

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Debido al grado de deterioro de la Mayoría de las redes viales, ha surgido entre los técnicos viales la necesidad de hacer un estudio previo de las mismas, aprovechando al máximo los materiales locales como así también los componentes del pavimento existente.

Los materiales estabilizantes que se emplean con frecuencia son el cemento y los agentes estabilizadores asfálticos, entre estos últimos contamos con las emulsiones asfálticas y el asfalto espumado.

El asfalto espumado (también conocido como asfalto celular) es una técnica relativamente nueva en su uso que permite producir mezclas asfálticas de un modo muy diferente a los sistemas tradicionales.

Las mezclas producidas con asfalto espumado tienen un comportamiento estructural similar a una mezcla tradicional, pero difieren en su estructura interna.

El espumado ocurre cuando se agrega una pequeña cantidad de agua al asfalto caliente, incrementando de esta forma el área superficial y reduciendo significativamente la viscosidad del ligante asfáltico. Esta forma de asfalto se emplea para su mezcla con áridos en frío.

El profesor Ladis Csanyi de la Estación Experimental de Ingeniería de la IOWA STATE UNIVERSITY en 1956 utilizó un proceso de inyección de vapor de agua para formar la espuma. Hubo poco interés en el nuevo proceso, hasta que en 1968 esta tecnología fue refinada posteriormente por la organización MOBIL OIL, quién desarrollo la primera campaña de expansión con la adquisición de la patente del invento, principalmente modificando el procedimiento original, agregando agua fría en lugar de vapor y desarrolló una serie de investigaciones relacionadas a la optimización del proceso.

Por ser un tema que se lo analiza de manera superficial, sin entrar en un profundo estudio del mismo, se quiere hacer conocer los métodos, técnicas y alternativas para el estudio de las propiedades de Sub rasantes con suelo limo/arcilloso estabilizados con asfalto

espumado en donde los agregados pueden provenir de la recuperación de áridos de un camino sin pavimentar. Ya que uno de los objetivos de esta aplicación es obtener mezclas de bajo costo y analizando en que situaciones es conveniente o no usarlas.

## **1.2 SITUACIÓN PROBLEMICA**

La estabilización con asfalto espumado es una gran innovación en el campo de construcción y estudio de las propiedades de la sub rasante lo cual permite mejorar el nivel de servicio en forma económica y ecológica.

Actualmente en nuestro país, este método no ha sido utilizado en el análisis previo de las propiedades de una sub rasante arcillosa y/o limosa, debido a esto, es de mucha importancia realizar un estudio que nos permita realizar el análisis y estudio de las características que este nuevo tipo de mezcla asfáltica pueda influir en una estabilización de sub rasantes.

La estabilización de una sub rasante es muy importante en la construcción de una calle, camino o carretera ya que si esta no cumpliera con sus propiedades mínimas para el diseño el colapso de la carpeta asfáltica sería inminente por la mala capacidad estructural de esta capa, ya que de la calidad de esta depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea flexible o rígido.

Las sub rasantes limo-arcillosas se pretenden estabilizar con asfalto espumado y a diferentes porcentajes de inyección del mismo y una cantidad optima de agua previamente determinada, que es de gran importancia para el manejo del proceso constructivo. Las sub rasantes de este tipo contienen un elevado limite liquido por lo que son propensas a la expansión y a la desecación temprana (asentamientos, agrietamientos), es por este motivo que con la técnica del asfalto espumado se pretende modificar las propiedades de la misma para realizar un análisis a fondo de los resultados obtenidos y determinar si cumple con las características adecuadas.

El no realizar un buen control y monitoreo previo de las propiedades mecánicas de las sub rasantes, es una de las causas por las que el pavimento tiende a fallar o deteriorarse a corto tiempo una vez ya emplazado y puesto al servicio del usuario. Debemos evitar todos estos impactos ambientales a través de nuevas tecnologías menos contaminantes como el

método de estabilización con asfalto espumado que se ve influenciado positivamente en el mejoramiento de la capacidad estructural de la Mayoría de los agregados.

Es posible que, mediante un estudio de las propiedades mecánicas de la sub rasante estabilizada con asfalto espumado, podría mejorar las condiciones de trabajo garantizando la resistencia de diseño sin reducir ni afectar dichas propiedades y más al contrario verificar si en todo caso llega a incrementar.

### **1.2.1 PROBLEMA**

¿La estabilización con asfalto espumado podrá mejorar las propiedades mecánicas de sub rasantes limo-arcillosas que serán utilizadas como estructura de fundación y soporte para pavimentos en nuestra región?

### **1.2.2 RELEVANCIA Y FACTIBILIDAD DEL PROBLEMA**

Actualmente en nuestro país, este método no ha sido utilizado en el análisis previo de las propiedades de una sub rasante arcillosa y/o limosa, debido a esto, es de mucha importancia realizar un estudio que nos permita realizar el análisis y estudio de las características que este nuevo tipo de mezcla asfáltica pueda influir en una estabilización de sub rasantes.

La estabilización de una sub rasante es muy importante en la construcción de una calle, camino o carretera ya que si esta no cumpliera con sus propiedades mínimas para el diseño el colapso de la carpeta asfáltica sería inminente por la mala capacidad estructural de esta capa, ya que de la calidad de esta depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea flexible o rígido.

### **1.2.3 DELIMITACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL PROBLEMA**

La investigación realizada se planifica para un tiempo de 14 semanas que contemplan alrededor de 3 o 4 meses; tomando las precauciones del tiempo necesario para realizar las actividades. El cronograma de actividades se contempla a detalle.

Los ensayos que requieren dicha investigación serán realizados en los laboratorios de la Universidad autónoma Juan Misael Saracho, tomando en cuenta que tipo de equipos será necesario para la caracterización del suelo y el asfalto en el desarrollo del proyecto

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

El deterioro de las sub rasantes, es el constante problema en el que se ven envueltos y perjudicados los usuarios, sobre todo en el periodo de lluvia, a esto se le suma la dejadez de nuestros caminos que ocasionan asentamientos, fallas y ausencia de seguridad cuando son transitados, por tal motivo se hace evidente la necesidad de encarar el estudio de las propiedades de los materiales de la sub rasante estabilizados con asfalto espumado como una nueva alternativa de solución al problema.

La aplicación de asfalto espumado en estabilizaciones es relativamente una técnica nueva, que nos permite producir mejoramientos a las propiedades de las capas con diferencias sustanciales a los sistemas tradicionales, permitiendo mezclar los agregados a bajas temperaturas con el asfalto en estado espumoso. Se realiza el presente estudio de aplicación porque el desarrollo de métodos alternativos de estudios de mejoramientos de sub rasantes estabilizadas de en la región ha sido descuidado, a pesar de que la aplicación de la tecnología del asfalto espumado se ha masificado en los últimos 30 años.

Se pretende modificar las propiedades del suelo con asfalto espumado manualmente y en condiciones controladas, para usarlo como agente estabilizante de la capa sub rasante en briquetas tipo C.B.R. con agregados limo/arcillosos obtenidos de distintos lugares de la ciudad de Tarija, para determinar el mejoramiento de sus propiedades mecánicas básicas después de ser estabilizadas con el asfalto espumado.

Se obtendrán resultados, una experimentación practica que arroje como resultados las características físicas y mecánicas de la sub rasante limo/arcillosa estabilizada con asfalto espumado, y así poder compararlas con las propiedades básicas que tenía antes de la estabilización, brindado información sobre la viabilidad de un método de estabilización nuevo, más económico y ambientalmente amigable que mejore las deficiencias de los suelos limo arcillosos.

De esta forma, se podrá actuar en el momento más oportuno previniendo que los defectos puedan comprometer las condiciones normales que debe tener la sub rasante y así no afectar la viabilidad y seguridad o agravarse de tal forma que las actuaciones correctoras posteriores sean mucho más costosas que las que hubieran realizado con un buen análisis

de sus propiedades con la estabilización de esta capa a su debido tiempo.

## **1.4 HIPÓTESIS**

Por medio de una investigación previa, espumar el asfalto es una técnica que altera temporalmente su estructura y por tanto sus propiedades, reduciendo considerablemente su viscosidad en el conjunto agua-aire-asfalto; Por lo tanto, **“si se realiza la mezcla de asfalto espumado a materiales de sub rasantes limo-arcillosas, entonces se logrará su estabilización obteniendo así las propiedades mecánicas de los materiales estabilizados”**.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar el análisis de las propiedades de materiales de sub rasantes estabilizadas con asfalto espumado a diferentes porcentajes y en condiciones controladas para verificar si cumple con las propiedades mínimas de diseño de una sub rasante.

### **1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el cemento asfáltico a utilizar en la aplicación mediante los ensayos correspondientes.
- Realizar un análisis técnico, económico, social y ambiental sobre la aplicabilidad del asfalto espumado en las sub rasantes.
- Realizar la caracterización de los agregados que se utilizarán en combinación con el asfalto espumado.
- Fabricar asfalto espumado, introduciendo agua manualmente en el asfalto caliente a una temperatura controlada para espumar el mismo y aplicarlo al material a estabilizar.

- Elaborar moldes “C.B.R.” con asfalto espumado a base de sub rasantes para determinar sus propiedades mecánicas y la aplicabilidad del mismo como una técnica innovadora en la estabilización de suelos.

## **1.6 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES**

### **1.6.1 VARIABLE INDEPENDIENTE**

Estabilización con asfalto espumado

### **1.6.2 VARIABLE DEPENDIENTE**

Propiedades físicas de las sub rasantes especialmente:

Tamaño de partículas

Plasticidad

Propiedades mecánicas de la estabilización especialmente:

Resistencia al corte

Expansión del suelo

Cantidad de agua en el asfalto espumado

Resistencia a la compresión.

**VARIABLE INDEPENDIENTE:**

<b>Variable</b>	<b>Conceptualización</b>	<b>Indicador</b>	<b>Valor Acción</b>
Estabilización Con Asfalto espumado	<p>Para la estabilización con asfalto espumado, el agregado debe ser incorporado mientras el asfalto se encuentre en estado de espuma. Al desintegrarse la burbuja en presencia del agregado, las gotitas de asfalto se aglutinan con las partículas más finas (especialmente con aquellas fracciones menores a 0.075 mm), produciendo una mezcla asfalto agregado fino, proceso que se denomina dispersión del asfalto. Esto resulta en una pasta de material y asfalto que actúa como un mortero.</p>	Experimento en laboratorio	Se realizarán ensayos.

**VARIABLES DEPENDIENTES:**

<b>Variable</b>	<b>Conceptualización</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Valor Acción</b>
Propiedades mecánicas de la estabilización	Son las propiedades de resistencia a la deformación o capacidad de soporte por esfuerzo cortante bajo cargas de tránsito.	Tipo de Propiedades	Resistencia al corte	Determinado por el ensayo C.B.R.
			Expansión	Determinado por el ensayo C.B.R.
			Cantidad de agua en el asfalto espumado	Se aplicará distintos porcentajes al suelo.
			Resistencia a la compresión	Determinado por el ensayo de compresión no confinada

<b>Variable</b>	<b>Conceptualización</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Valor Acción</b>
Propiedades físicas de las subrasantes	Son las propiedades que caracterizan físicamente y definen el tipo de material de estudio	Tipo de Propiedades	Tamaño de partículas	Determinado por el ensayo de granulometría
			Plasticidad del suelo	Determinado por el ensayo de límites de atterberg.

## **1.7 IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La metodología que se describe a continuación se empleó en forma independiente, pero representa, una solución técnica, para construir una estructura vial, dependiendo de los requerimientos, las características y objetivos de cada obra y del nivel al que se quiere llegar en las condiciones de la estructura vial.

## **1.8 UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL**

### **1.8.1 UNIDAD DE ESTUDIO**

La presente investigación comprende el Análisis de Propiedades de Materiales de Subrasante, que se realiza a través de un proceso de estabilización con Asfalto Espumado que involucra a condiciones de temperatura y agua controladas de trabajo.

## 1.8.2 POBLACIÓN

La estabilización de suelos con asfalto espumado es una de técnica que permite modificar las propiedades del suelo a estabilizar, utilizando el siguiente rango que se definió previamente de tipo de materiales según la clasificación de suelos AASHTO:

Tabla 1.1 Clasificación de suelos según AASTHO

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (igual o menor del 35% que pasa el tamiz Nº 200)							Materiales Limo - Arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz Nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
% que pasa el Tamiz: Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características del Material que pasa el tamiz Nº 40											
Límite Líquido			NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
Índice de Plasticidad	6máx	6 máx.		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de Material	fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno							Regular a Deficiente			

Materiales Limo - Arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz Nº 200)			
A-4	A-5	A-6	A-7
			A-7-5 A-7-6
36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Regular a Deficiente			

NOTA: El índice de plasticidad de los suelos A-7-5 es igual o menor que su Límite Líquido 30, el de los A-7-6 mayor que su Límite Líquido (fig. 1) se halla indicada la relación entre lo LL e IP de los materiales finos. Dicho de otro modo, el grupo A-7 es subdividido en A-7-5 ó A-7-6 dependiendo del Límite Plástico (L.P.)  
Si el LP ≥ 30, la clasificación es A-7-6  
Si el LP < 30, la clasificación es A-7-5

Fuente. elaboración propia

Una vez realizada la respectiva clasificación de los materiales utilizados para el estudio de aplicación se definirá exactamente a qué grupo de suelo pertenece.

## 1.8.3 MUESTRA

El comportamiento de las propiedades mecánicas de los materiales de sub rasante estabilizados con asfalto espumado, determinado mediante los ensayos de laboratorio. Para la obtención de los materiales de sub rasante, se recolectarán muestras de material limo/arcilloso ubicados en la ciudad de Tarija en cantidades necesarias para realizar la caracterización de los mismos y los ensayos de laboratorio necesarios para el estudio de las propiedades mecánicas de las sub rasantes estabilizadas con adición de asfalto espumado.

El ligante asfáltico será obtenido de algún lugar propio de la región para determinar sus características mecánicas para la obtención del asfalto espumado.

#### **1.8.4 SELECCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MUESTREO**

Lo que se va a muestrear van a ser el agregado fino de la mezcla espumada, el Asfalto que son ensayos de laboratorio para determinar o identificar rasgos peculiares o propios, la muestra de Asfalto estará en un recipiente con condiciones controladas, la muestra de los agregados limosos y arcillosos que se utilizaran para la estabilización será de los bancos de préstamo extraídos de zonas específicas en la ciudad de Tarija que serán colocados en bolsas de yute en cantidades necesarias.

#### **1.9 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

En este proyecto lo que se busca es dar a conocer los métodos, técnicas y alternativas para el estudio de las propiedades de sub rasantes limo/arcillosas estabilizadas con asfalto espumado.

Los agregados los obtendremos de una carretera y una calle en estado de construcción, ambos dispuestos en la ciudad de Tarija, para ver en q condiciones cuál de los materiales estabiliza mejor o mejora sus propiedades.

Para el asfalto espumado se desea fabricarlo de una manera artesanal utilizando un equipo para espumado donado al laboratorio de asfaltos, este será aplicado a diferentes porcentajes a la capa de sub rasante.

El principio de funcionamiento del equipo consta del colocado del asfalto a un porcentaje de humedad en una olla a presión modificada donde el vapor será atrapado ocasionando la expansión del asfalto modificando sus propiedades para luego ser utilizado como estabilizante en nuestro suelo que será trabajado en moldes de CBR.

En cuanto a los ensayos se realizará:

1. Ensayos de calidad de los agregados: sin estabilizar:
  - Granulometría.
  - Ensayos de hidrómetro

Peso específico y absorción.

Índice de plasticidad

2. Ensayos de caracterización del asfalto:

Ensayos de viscosidad.

Ensayo de penetración.

Ensayo de punto de ablandamiento.

Ensayo de ductilidad.

Punto de inflamación.

3. Ensayos de resistencia:

CBR

Compactación

Compresión Simple

NOTA: todos los ensayos serán realizados tomando en cuenta los requisitos mínimos necesarios para materiales de capa sub rasante para así determinar en qué condiciones sus propiedades mejoran o no.

## 1.10 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Análisis con la estadística descriptiva:

### **La Estadística Descriptiva**

Es el estudio de los métodos para reunir, clasificar, presentar y describir a un conjunto de datos. Se asume que es descriptivo el estudio de un conjunto de datos, cuando simplemente se describen o analizan a los datos.

### **La media Aritmética**

En la práctica la medida de posición de Mayor uso y más conocida es la Media Aritmética, a la Media Aritmética se la conoce directamente como Media o Promedio, la Media Aritmética es una medida de tendencia central.

De un conjunto de datos  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  de tamaño  $n$ , de una variable o característica  $X$ , se denota  $\bar{X}$  a su Media aritmética y se define como la suma de todos los valores

observados en la Muestra, dividida entre el número total de datos  $n$ .

$$\bar{X} = M_{(X)} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} = \frac{\sum X}{n}$$

### La Mediana

Es otra de las medidas de posición de amplio uso y de fácil comprensión.

La mediana que se denota por  $Me(X)$  o por  $\bar{A}$  se define como el valor central de un conjunto de datos  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  de tamaño  $n$ , de una variable o característica  $X$ , donde los datos están ordenados correlativamente.

Cuando se tiene de un número impar de datos la Mediana será el valor del dato central  $X_{(n+1)/2}$ ; Para un número par de datos se calcula la Media de los datos centrales:  $X_{n/2}, X_{n/2+1}$ .

### La Moda

Otra medida de posición de amplio uso es la Moda, que sin imaginarlo se usa frecuentemente.

En un conjunto de datos  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  de tamaño  $n$ , de una variable o característica  $X$ , la Moda se define como el valor que ocurre con Mayor frecuencia, se denota por  $Mo(X)$ . En algunos conjuntos de datos, la Moda puede no existir, o no ser única en otros casos.

### La Varianza

Es la principal medida de dispersión, es la más precisa y de Mayor uso, en especial su uso es más amplio en la Estadística inferencial.

Dependiendo de si los datos corresponden a una población o a una muestra, se obtendrán la Varianza poblacional o la Varianza muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La Varianza de una población o Varianza poblacional se designa por  $\sigma^2$  (Sigma cuadrado), la Varianza de una muestra o Varianza muestral se designa por  $s^2$

Para una ordenación de datos:  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  La Varianza se calcula como:

$$\text{Varianza Poblacional} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N} = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N} = \overline{(X - \mu)^2}$$

$$\text{Varianza Muestral} \quad s^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{n \sum X^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}$$

Donde la Media Aritmética de una población y de una Muestra respectivamente son  $\mu$ ,  $\bar{X}$  (Su modo de cálculo es el mismo), se toma en cuenta que el total de datos se representa por  $N$ ,  $n$  para una población o muestra respectivamente.

### Desviación Estándar

Con base en la Varianza, otra medida de dispersión es la Desviación Estándar, o Desviación Típica. Según se trabaje con una población o con una muestra, se obtendrán la Desviación Estándar poblacional o la Desviación Estándar muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La Desviación Estándar de una población se designa por  $\sigma$  (Sigma). La Desviación Estándar de una muestra se designa por  $s$ . Son las raíces cuadradas de las Varianzas de una población o muestra respectivamente, por tanto:

Para una ordenación de datos:  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  La Desviación Estándar se calcula por:

$$\text{Desviación Estándar Poblacional} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N}} = \sqrt{(X - \mu)^2}; N = \sum_{j=1}^k f_j$$

$$\text{Desviación Estándar Muestral} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{(X - \bar{X})^2}; n = \sum_{j=1}^k f_j$$

Donde  $\mu$ ,  $\bar{X}$  son la Media Aritmética de una población o de una muestra (Poseen el mismo valor).

### Coefficiente de Variación

Se llama también Coeficiente de dispersión, es una medida de dispersión relativa, permite efectuar comparaciones entre diversos conjuntos de datos que no necesariamente poseen la misma frecuencia total (Número total de datos).

Para un conjunto de datos, se llama Coeficiente de Variación al cociente de la Desviación Estándar muestral entre su Media Aritmética:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} * 10$$

Este coeficiente se expresa en porcentaje al multiplicarse por 100. Se considera que un Coeficiente de Variación menor a 50% significa baja dispersión, es decir que la Media Aritmética es una buena representación de un conjunto de datos. Si es Mayor al 50% significa alta dispersión, la Media Aritmética en tal caso no es una buena representación.

### 1.11 ALCANCE DEL ESTUDIO DE APLICACIÓN

El proyecto de estudio de aplicación considera determinar si la estabilización con mezclas asfálticas con asfalto espumado satisface los requerimientos mínimos deseados en sub rasantes limosas y arcillosas de acuerdo a especificaciones técnicas.

Dentro del "ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE MATERIALES DE SUB RASANTE ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO" se pretende también:

Conseguir agregados finos ya conocidos (limo/arcillosos) de bancos de préstamo de nuestra región para su caracterización en función a su estabilización.

Conseguir una muestra de cemento asfáltico determinar sus características particulares.

Realizar ensayos de laboratorio para determinar la cantidad de agua precisa y temperatura óptima del cemento asfáltico para la producción de un buen asfalto espumado que será utilizado como agente estabilizador de los agregados a analizar.

Utilizar un equipo de espumado proporcionado por el laboratorio de asfaltos para introducir agua manualmente en el asfalto caliente a una temperatura controlada, para después verterlo en porcentajes sobre una cantidad específica de agregado limo/arcilloso en condiciones de humedad óptima.

Espumar manualmente un asfalto, en condiciones ideales de temperatura y contenido de humedad, para fabricar moldes de C.B.R. que sean sometidas a estudios mecánicos.

Para concluir, se presentarán los resultados del análisis de las propiedades de los materiales de sub rasante ya estabilizados con asfalto espumado y se verificará si este nuevo método de estabilización logra cumplir con los requisitos mínimos para sub rasantes en carreteras.

**CAPÍTULO II**  
**GENERALIDADES Y DEFINICIONES.**

## **CAPÍTULO II**

### **GENERALIDADES Y DEFINICIONES**

#### **2.1 SUELO**

Suelo se describe como una mezcla no cementada de granos minerales, partículas orgánicas, en conjunto con el agua y los espacios vacíos, que se encuentra en la superficie terrestre y sirve como soporte de las obras civiles que construye el hombre, tales como cimiento para viviendas y edificios, componente de los morteros, y hormigones, parte de la estructura de carreteras y calles, etc.

Los suelos en general pueden ser denominados como gravas, arenas, limos o arcillas, en función al tamaño de las partículas que predominan en él.

##### **2.1.1 ARCILLA**

Las arcillas constituyen aproximadamente un 70% de la corteza terrestre, presentan una estructura laminar, son plásticos y su resistencia depende tanto del rozamiento interno de sus partículas sólidas como de la fuerza de cohesión de las mismas, por lo que también se denominan suelos cohesivos. Presentan una facilidad para modificar sus propiedades adecuándolas a cualquier aplicación y son geológicamente inestables.

La arcilla se define como partículas microscópicas menores a 0,002 mm en forma de escamas. Están constituidas en su mayoría por silicatos de aluminio hidratado, presentando, además, en ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas.

Los suelos arcillosos, son suelos desintegrados, transportados por el agua y por el viento hasta que se depositan y se acumulan como sedimentos. Estos depósitos se compactan por el peso de las sucesivas capas de material y se disponen en forma de capas y estratos.

### 2.1.2 LIMO

El **limo** está compuesto por sedimentos de rocas preexistentes, ricas en nutrientes. Lo forman partículas de arcilla, lodo y arena que han sido transportadas por la lluvia, corrientes de agua natural o el viento. Existen grandes depósitos de limo en el lecho de los ríos, zonas inundadas, glaciares o masas móviles de hielo. Es un sedimento no cohesivo. Su color depende de la composición de los granos, también de las manchas del agua subterránea. Puede observarse limo blanco, crema, anaranjado, rojo, verde, púrpura e inclusive negro. El tamaño de sus partículas varía, son más grandes que las partículas de arcilla (0,0039 mm). Pero más pequeñas que las de la arena fina (0,0625 mm).

**El limo se clasifica en orgánico e inorgánico.** El limo orgánico se forma en el suelo de ecosistemas húmedos. Es una mezcla de residuos vegetales, animales y minerales, útil en la preparación de los suelos para la agricultura. El limo inorgánico está compuesto sólo por polvo rocoso. Y cuando se presenta en forma de roca se denomina limolita y lutita, de acuerdo a su consolidación.

Se conoce además que el limo es un sedimento no cohesivo que puede construirse sobre suelos limosos siempre que se realice un buen trabajo de cimentación. En el campo de la construcción el limo se emplea como relleno secundario. Es un elemento masivo, pero de baja calidad.

## 2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

Entre los ensayos de caracterización de los suelos los que utilizaremos para el desarrollo del presente proyecto serán los siguientes:

### 2.2.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

El comportamiento el suelo se puede comparar con el de una esponja por su capacidad para retener agua dentro de su estructura y cuya cantidad depende de las características de sus partículas (textura y estructura). El contenido de humedad de un suelo es la relación existente entre la masa de agua que logra alojarse dentro de la estructura porosa del suelo, y la masa propia de las partículas de suelo. También se define el contenido de humedad de un suelo como la suma del agua libre, capilar e higroscópica. Este ensayo tiene como objetivo determinar el contenido de agua presente en una muestra de suelo.

### 2.2.2 LÍMITES DE ATTERBERG

Albert Mauritz Atterberg definió los límites de consistencia de los suelos finos, con el fin de caracterizar su comportamiento. Estos límites son: Límite de Cohesión, Límite de Pegajosidad, Límite de Contracción, Límite Plástico y Límite Líquido.

El Límite Líquido se define como el porcentaje de humedad del suelo, por debajo del cual se presenta un comportamiento plástico. Cuando los suelos alcanzan porcentajes de humedad Mayores al límite líquido, su comportamiento será el de un fluido viscoso.

Este límite además de ser un parámetro esencial para la clasificación de los suelos, puede ser útil para determinar problemas de potencial de volumen, para estimar asentamientos en problemas de consolidación y en conjunto con el Límite plástico para predecir la máxima densidad en estudios de compactación.

El límite plástico fue definido por Atterberg como la frontera que existe entre los estados plástico y semisólido del suelo. En términos de laboratorio este límite es definido como el momento en términos de contenido de humedad, en que rollitos de aproximadamente 3 mm de diámetro empiezan a presentar desmoronamiento y agrietamiento.

Es importante resaltar que el diámetro de los rollitos fue propuesto por Terzaghi, dado que Atterberg nunca especifico este parámetro.

El índice de plasticidad es la diferencia entre los valores de Límite Líquido y Límite Plástico. Un Índice de plasticidad bajo, significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la condición de líquido, es decir resulta muy sensible a los cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto, indica que para que un suelo pase del estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua.

Figura 2.5 Estados del suelo, límite de plasticidad

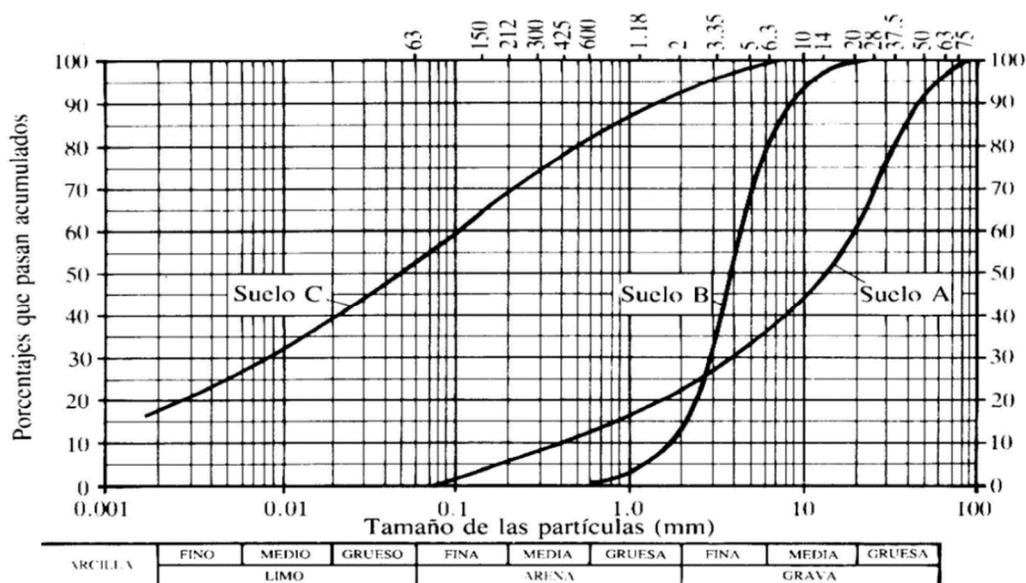


Fuente. Manual de procedimiento de ensayos de suelos UMNG

### 2.2.3 GRANULOMETRÍA

El análisis granulométrico consiste en la separación de las partículas de suelo por rangos de tamaños, haciendo uso de mallas o tamices con aberturas cuadradas. Mediante procesos de agitado se lleva a cabo la separación de las partículas en porciones, las cuales se pesan expresando dicho retenido como porcentajes en peso de la muestra total y aunque se considera físicamente imposible determinar el tamaño exacto de cada partícula, la prueba de granulometría sí permite agruparlas por rangos de tamaño. Universalmente se ha establecido la malla No. 200 (0,075mm) como medida divisoria en la clasificación de suelos; finos y gruesos.

Gráfica 2.1 Estados del suelo, límite de plasticidad.



Fuente. Manual de procedimiento de ensayos de suelos UMNG.

Tabla 2.1 Rangos de granulometría para estabilización.

Requisitos	Arena-asfalto	Suelo-Asfalto E.	Grava-arena-Asfalto
1 1/2"			100
1"	100		
3/4"			60-100
1/2"			
Nº4	50-100	50-100	35-100
Nº10			
Nº40		35-100	13-50
Nº200	5-25	35-100	8-35
L. liquido	-	<40	-
I. de plasticidad	<10	<12	<6

Fuente. Diseño estructural de pavimentos hidráulicos y asfaltos URP-Lima Perú.

Generalmente los suelos que tienen un  $LL < 40$  y un  $IP < 12$ , pueden ser pulverizados adecuadamente y, por lo tanto, mezclarse uniformemente con el asfalto. Si la plasticidad excediera del valor indicado la misma puede ser reducida mediante la incorporación al suelo plástico de arenas o suelos arenosos no plásticos.

### 2.2.4 PESO ESPECÍFICO

La gravedad específica se define como la relación entre una unidad de volumen de los sólidos de un suelo y la masa de un volumen igual de agua destilada a una temperatura de 20°C. La gravedad específica se presenta bajo el símbolo de “Gs” y se presenta en condición adimensional.

Joseph Bowels presenta en su “Manual De Laboratorio De Suelos En Ingeniería Civil” valores típicos para algunos tipos de suelos, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 2.2 Rangos de gravedad específica propuestos por Bowels

Tipo de Suelo	Rango Gravedad específica
Arena	2,65-2,67
Arena Limosa	2,67-2,70
Arcilla inorgánica	2,70-2,80
Suelos con micas o hierro	2,75-3,00
suelos Orgánicos	Variable. Puede ser inferior a 2,00

Fuente. Manual de procedimiento de ensayos de suelos UMNG

### 2.2.5 COMPACTACIÓN DEL SUELO

El proceso de compactación en los suelos produce un mejoramiento considerable en sus propiedades ingenieriles, en el aumento de su resistencia al corte, la disminución en su deformabilidad, un aumento en su peso específico seco y mejoramiento de su condición de permeabilidad.

El ensayo busca obtener mediante el análisis de una curva denominada curva de compactación, la relación que existe entre la humedad del suelo y el peso unitario seco del mismo, a partir de una serie de ensayos repetitivos que se realizan en un molde de 4 o 6 “ de diámetro. Una vez es analizada la gráfica se puede determinar el peso unitario máximo

al que se puede llevar el suelo por métodos de compactación, con el porcentaje de humedad al que se logra tal condición. Dichos parámetros se convierten en condicionantes en las obras a los cuales se deben manejar los suelos trabajados y que una vez conseguidos dichos valores de peso unitario se emitirá la aprobación de las obras que se estén realizando.

### 2.2.6 C.B.R. (CALIFORNIA BEARING RATIO)

La abreviación “CBR” corresponde al California Bearing Ratio, método de análisis de materiales desarrollado en el año de 1929 por la División de Carreteras de California, con el fin de darle una clasificación a la capacidad del suelo para ser utilizado en proyectos de construcción. También denominado ensayo de relación de soporte, es el procedimiento por medio del cual mediante pruebas de laboratorio y bajo condiciones de humedad y densidad controlada se puede medir la resistencia al corte de un suelo en el estado en que este se encuentre en ese momento.

El método de CBR es normalmente utilizado para analizar materiales cuyo diámetro máximo de partículas es de  $\frac{3}{4}$ ".

En ensayo de CBR permite igual brindar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura e indicando la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo. A continuación, se presenta una tabla donde con base a los valores de CBR se establece una clasificación general para el suelo.

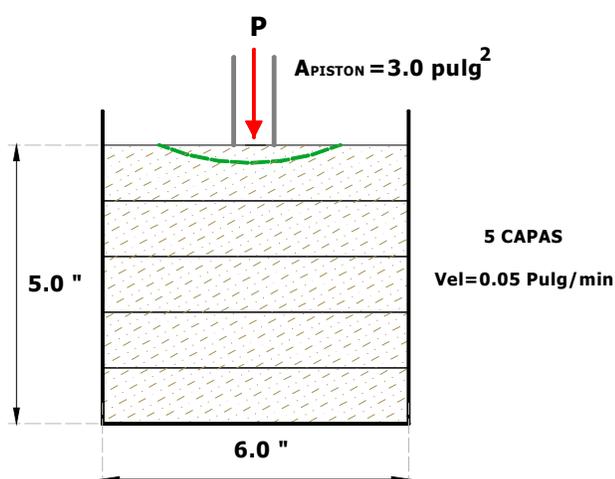
Tabla 2.3 Clasificación de suelos según C.B.R.

Valor CBR	Clasificación General	Usos
0--3	Muy Pobre	Sub Rasante
3--7	Pobre a Regular	Sub Rasante
7--20	Regular	Sub-Base
20--50	Bueno	Base, Sub-Base
>50	Excelente	Base

Fuente. Manual de laboratorios de suelos Joseph Bowles

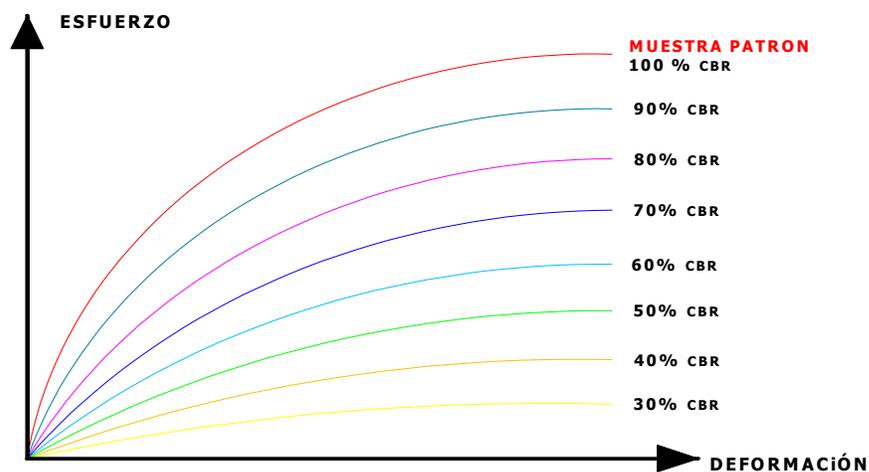
Los suelos por debajo del nivel superior de la sub rasante, en una profundidad no menor a 0.60m, deberán ser suelos adecuados y estables con  $\text{CBR} \geq 6\%$ . En caso el suelo, debajo del nivel superior de la sub rasante, tenga un  $\text{CBR} < 4\%$  (Sub rasante pobre o sub rasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos, para lo cual se debe analizar según la naturaleza del suelo alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo del suelo de cimentación, estabilización química de suelos, etc...

Figura 2.6 Vista del equipo CBR en perfil.



Fuente. Elaboración Propia

Grafica 2.2 Esfuerzo vs deformación a distintos CBR.



Fuente. Elaboración Propia

Se toma como deformación máxima en el ensayo CBR, 0.5 pulg (1.25 mm), debido a que, a esta magnitud de deformación plástica o Mayor, se considera que el suelo ha fallado. El valor de CBR en suelos no estabilizados, se determina a 0.1” y 0.2” de deformación, porque a esos niveles son las sollicitaciones normales que soportan los suelos.

Figura 2.7 Especificaciones del CBR y expansión.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
CBR mínimo requerido (%)	4
Expansión máxima requerida (%)	3

Fuente. Especificaciones técnicas del asfalto espumado  
(CSIR Transportek, 1999)

### 2.2.7 COMPRESIÓN SIMPLE

El ensayo de compresión no confinada, también conocido como ensayo de compresión simple o ensayo de compresión uniaxial, es muy importante en la mecánica de suelos, ya que permite obtener un valor de carga última de suelo, el cual se relaciona con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de carga que puede utilizarse en proyectos que no requieran de un valor impreciso, ya que entrega un resultado conservador.

Es importante comprender el comportamiento de los suelos sometidos a cargas, ya que es en ellos que van a fundar las estructuras, ya sea puentes edificios o carreteras, que requieren de una base firme, o más aún que puedan aprovechar la resistencia del suelo en beneficio de su propia capacidad y estabilidad, siendo el estudio y la experimentación las herramientas para conseguirlo, y finalmente poder predecir, con una cierta aproximación, el comportamiento ante las cargas de estas estructuras.

Debido a la compleja y variable naturaleza de los suelos, en especial a lo referido a la resistencia al esfuerzo cortante, existen muchos métodos de ensayo para evaluar sus características. Aun cuando se utilizan otros métodos más representativos como el triaxial,

el ensayo de compresión simple el objetivo buscado sin tener que hacer un método tan complejo ni usar un equipo tan complejo que a veces puede ser inaccesible, lo que significaría un Mayor costo. Este método es aplicable a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que admiten su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o suelos cementados. Los suelos secos friables, los materiales fisurados, laminados o varvados, los limos, las turbas y las arenas no pueden ser analizados por este método para obtener valores significativos de la resistencia a la compresión no confinada.

Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo ultimo de un suelo cohesivo a la compresión no confinada, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación y utilizando una muestra de suelo inalterada tallada en forma de cilindro, generalmente con una relación alto/diámetro igual a 2.

Tabla 2.4 Clasificación de acuerdo a su consistencia y carga última de suelo.

<b>Consistencia del Suelo</b>	<b>Carga última (Kg. /cm<sup>2</sup>)</b>
Muy blanda	< 0,25
Blanda	0,25-0,50
Media	0,50-1
firme	1-2
Muy firme	2-4
dura	>4

Fuente. (Terzagui y Peck 1955).

## 2.3 ESTUDIO DE LA SUB RASANTE

### 2.3.1 DEFINICIÓN

La Sub rasante, se define como la parte de la corteza terrestre, que le va a servir de soporte a la estructura del pavimento; puede ser sub rasante natural (en el caso de los cortes), o constituirse en el sitio (artificial, para los terraplenes).

La Sub rasante se compone principalmente de material limoso, arcilloso, arenas y algunas gravas pequeñas.

### 2.3.2 FUNCIÓN DE LA SUB RASANTE

La función de la sub rasante es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad; es por eso que se debe verificar la calidad de la misma con estudios previos y si es necesario estabilizarla para mejorar su calidad.

Otra de las funciones de la sub rasante es evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

### 2.3.3 POSIBILIDAD DE MEJORAMIENTO DE LA SUB RASANTE

Procedimientos para mejorar los suelos:

Métodos Físicos:

Consolidación previa (suelos finos)

Confinamiento (suelos granulares)

Mezclas de suelos

Métodos Químicos:

Sal (suelos finos)

Cemento (suelos con fracción granular)

**Asfalto (suelos granulares, finos)**

Cal (suelos finos)

Otros (Dynasolo, Aceite quemado, Cenizas, escorias)

Métodos Mecánicos:

Compactación

## **2.4 ESTABILIZACIÓN**

La estabilización es el proceso físico y/o químico por medio del cual se modifican las propiedades de suelos que no son adecuados para las construcciones civiles de modo que se puedan aprovechar al máximo sus propiedades.

Al estabilizar un suelo se alteran sus propiedades iniciales en cuanto a resistencia y deformación.

### **2.4.1 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

#### **Estabilización mecánica**

Utiliza la compactación del suelo como base.

#### **Estabilización física**

Utiliza como complemento la compactación para los cambios físicos y la mezcla con otros suelos.

#### **Estabilización química**

Se refiere a la utilización de sustancias químicas que involucran cambios en la constitución de los suelos

### **2.4.2 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA**

Este método para estabilizar se utiliza generalmente en suelos finos ya que las arcillas son susceptibles a los cambios en su estructura interna.

La estabilización química es un proceso mediante el cual se incorpora un aditivo químico, el cual produce cambios físicos y reacciones químicas que permiten incrementar la densidad y reducir la plasticidad de los suelos brindando una estabilidad volumétrica. Los agentes químicos que más se utilizan para este fin son: el cemento, la cal, **los asfaltos**, las sales y los polímeros.

En el presente trabajo estudiaremos la estabilización con asfalto espumado ya que estos productos se encuentran con facilidad en el mercado, y se adaptan a las condiciones climáticas.

#### **2.4.2.1 ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO**

La estabilización de bloques con asfalto se fundamenta en el hecho de que la arcilla es el único componente del suelo que es inestable en presencia de humedad.

El asfalto emulsificador que se usa como estabilizador de suelos consiste de glóbulos microscópicos de asfalto que están rodeados y suspendidos en medio acuoso.

Se recomienda mantener el estabilizador a una temperatura superior a 0° centígrado.

El estabilizador hace contacto con la parte arcillosa del suelo y a medida que se realiza la evaporación del agua, los glóbulos de asfalto forman una fina película que rodea a las partículas de arcilla, cuando está totalmente seca, la masa tratada con la emulsión de asfalto mantiene aproximadamente la misma firmeza y resistencia a la compresión que un suelo que ha sido mezclado solamente con agua.

Pese a que un contacto con el agua puede producir cierta absorción, las partículas de arcilla no se expandirán o perderán cohesión.

#### **Suelos Apropriados**

Se recomienda suelos con una composición básica de arena y arcilla, la segunda actuará, como un cementante de la primera. La fracción fina de un suelo debe contener suficiente arcilla para formar una pasta delgada alrededor de las partículas más gruesas.

Suelos arcillosos ocasionan demasiado encogimiento y rajaduras, además el constante aumento y disminución de volumen en presencia de agua producen adobes fácilmente erosionables; suelos con excesiva arena no tienen suficiente ligazón entre partículas, generando adobes de poca fuerza cohesiva que se desmoronan.

Suelos con excesivo contenido de materia orgánica no son aptos por su gran encogimiento, baja resistencia y poca duración ante la humedad.

Las sales y álcalis aún en cantidades reducidas ocasionan deterioro en los adobes expuestos a ciclos de humedecido y secado.

El problema principal radica en la identificación de los elementos nocivos y en los porcentajes máximos admisibles.

### **2.4.3 PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DE LA ESTABILIZACIÓN**

El mecanismo básico de la estabilización con asfalto es la impermeabilización del suelo teniendo en cuenta que el asfalto rellena los vacíos.

Adicionalmente se logra un aumento en resistencia por adhesión entre el asfalto y las partículas de suelo.

Se pueden utilizar varios tipos de asfaltos y emulsiones.

Entre Mayor sea la cantidad de finos se requiere una Mayor cantidad de asfalto.

### **2.4.4 VENTAJAS DE LA ESTABILIZACIÓN**

Entre las ventajas que se puede conseguir con la estabilización tenemos:

Reducir el índice de vacíos y el contenido de humedad disminuyendo de esta manera la permeabilidad del suelo.

Minimizar la retracción y la expansión.

Dar estabilidad volumétrica causada por la humedad.

Aumentar la resistencia.

En resumen, el objetivo de la estabilización es mejorar la calidad de los suelos obteniendo un material eficiente para el uso propuesto.

### 2.4.5 PROCESO DE DIMENSIONAMIENTO

Para el dimensionamiento o estabilización de la sub rasante se debe elegir el método más adecuado de acuerdo a la clasificación o tipo de suelo que se presente teniendo así las siguientes recomendaciones del Asphalt Institute:

#### “1A”

**suelos:** sw o sp

**aditivo recomendado:**

1. asfalto
2. cemento portland
3. cenizas + cal + cemento

**restricción:** ip no debe ser Mayor de 25

#### “1B”

**suelos:** SW-SM; SP-SM; SW-SC; SP-SC

**aditivos:**

1. asfalto  $ip \leq 12$
2. cemento portlant  $ip \leq 30$
3. cal  $ip \leq 12$
4. ceniza + cal + cemento  $ip \leq 25$

#### “1C”

**suelos:** SM; SC; SM-SC

**aditivos:**

1. asfalto  $ip \leq 12$  – no más del 30% de finos
2. cemento portlant  $ip \leq 20 + \frac{50 - \% \text{pasa } 200}{4}$
3. ceniza + cal + cemento  $ip \leq 25$

#### “2A”

**Suelos:** GW GP

**Aditivos:**

1. asfalto

2. cemento (más de 45% de pasantes tamiz 4)
3. cenizas + cal + cemento

**“2B”****Suelos:** GW-GM GP-GM GW-GC GP-GC**Aditivos:**

1. asfalto  $ip \leq 12$
2. cemento  $ip \leq 30$
3. cenizas + cal + cemento  $ip \leq 25$

**“2C”****Suelos:** GM GC GM-GC**Aditivos:**

1. asfalto  $ip \leq 12$
2. cemento portlant  $ip \leq 20 + \frac{50 - \% \text{pasa } 200}{4}$
3. cal  $ip \geq 12$
4. cenizas + cal + cemento  $ip \leq 25$

**“3”****Suelos:** CH; CL; MH; OH; OL; ML-C**Aditivos:**

1. cemento  $ip \leq 40$ ;  $II < 40$
2. cal  $ip \geq 12$
3. asfalto E.  $ip \leq 16$

**2.5 CEMENTO ASFALTICO**

El Asfalto es un material de color marrón oscuro a negro, cementante, termoplástico encontrado en un estado natural o fabricado en refinerías de petróleo por procesos de destilación atmosférica o vacío. El asfalto es sólido o altamente viscoso a temperatura ambiente. Es un material extremadamente complejo que contiene una gran cadena de componentes orgánicos de alto peso molecular.

El Asfalto de Penetración, también llamado Cemento Asfáltico, es el material por excelencia para la pavimentación, en virtud de sus propiedades y características. Es un material altamente cementante, termoplástico, repelente del agua y es resistente al ataque de la Mayoría de los ácidos, álcalis y sales.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas del agregado y por lo tanto es un excelente cemento para unir partículas del agregado en un pavimento de mezcla caliente.

El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales.

Esto significa que un pavimento de cemento asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daños químicos.

### **2.5.1 ESPECIFICACIONES NECESARIAS PARA EL CEMENTO ASFALTICO**

Considerando que el concreto asfáltico es el más apropiado para vías de tránsito intenso, se hará especial énfasis a este tipo de mezcla. Un pavimento de concreto asfáltico debe cumplir los siguientes objetivos principales:

Suficiente estabilidad en la mezcla como para satisfacer las exigencias del servicio y las demandas del tránsito sin distorsiones o desplazamientos.

Suficiente asfalto para asegurar la obtención de un pavimento durable, que resulte del recubrimiento completo de las partículas de agregado pétreo, impermeabilizando y ligando las mismas entre sí, bajo una compactación adecuada.

Suficiente trabajabilidad como para permitir una eficiente operación constructiva en la elaboración de la mezcla con que se procederá a la pavimentación.

Suficientes vacíos en la mezcla compactada, para proveer una reserva que impida, al producirse una pequeña compactación adicional bajo las cargas del tránsito, afloramientos de asfalto y pérdidas de estabilidad.

Las proporciones de agregados y asfalto en la mezcla, deben seleccionarse de manera que esta cumpla, tanto los requisitos de gradación dados por las especificaciones, como los de calidad de la mezcla exigidos por los procedimientos corrientes del diseño. Además, la mezcla debe tener la fluidez necesaria para que pueda compactarse a la densidad exigida y producir una textura superficial adecuada. Generalmente no es posible fijar la fórmula de trabajo hasta que haya comenzado la producción, por cuanto los materiales que pasan por la planta no son idénticos a las mezclas utilizadas en el laboratorio. La manufactura de las mezclas se hace en plantas especiales a altas temperaturas y con sistemas de control muy precisos que permiten asegurar la correcta dosificación de los materiales.

Su colocación en obra se hace por medio de máquinas terminadoras, construidas para tal efecto y la compactación posterior debe ser suficiente para alcanzar las densidades y estabilidades exigidas.

### **2.5.2 PROPIEDADES DEL CEMENTO ASFALTICO**

Para los estudios técnicos y la construcción hay tres características o propiedades del asfalto importantes a considerar:

#### **Consistencia:**

Para caracterizar a los asfaltos es necesario conocer su consistencia a distintas temperaturas, puesto que son materiales termoplásticos que se licúan gradualmente al calentarlos. Consistencia es el término usado para describir el grado de fluidez o plasticidad del asfalto a cualquier temperatura dada. Para poder comparar la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro, es necesario fijar una temperatura de referencia.

Si se expone al aire el cemento asfáltico en películas delgadas y se le somete a un calentamiento prolongado, como por ejemplo en las mezclas con agregado pétreo, el asfalto tiende a endurecerse y aumentar su consistencia. Se permite un aumento limitado de ésta, por lo cual un control no adecuado de la temperatura y del mezclado puede provocar un daño al cemento asfáltico, tanto como el servicio en el camino terminado.

Comúnmente, para especificar y medir la consistencia de un asfalto para pavimento, se usan ensayos de viscosidad o de penetración.

**Pureza:**

El cemento asfáltico se compone casi enteramente de betunes, los cuales, por definición, son solubles en bisulfuro de carbono. Los asaltos refinados son, generalmente, más del 99,5 % solubles en bisulfuro de carbono y, por lo tanto, casi betunes puros. Las impurezas son inertes o insolubles, si existieran. Normalmente el cemento asfáltico, cuando sale de la refinería, está libre de humedad, pero puede haberla en los tanques de transporte. Si hay agua inadvertida, ésta provoca espumas cuando se calienta por encima de los 100 °C (212 °F).

**Seguridad:**

La espuma puede constituir un riesgo para la seguridad, por lo tanto, las normas requieren que el asfalto no forme espuma hasta temperaturas de 175 °C (347 °F). El cemento asfáltico, si se le somete a temperaturas suficientemente elevadas, desprende vapores que arden en presencia de una chispa o llama. La temperatura a que esto ocurre, normalmente es más elevada que la de trabajo en obras de pavimentación. Sin embargo, para tener la certeza de que existe un adecuado margen de seguridad, se debe conocer el punto de inflamación del asfalto, lo que será estudiado en los próximos capítulos.

**2.5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFALTICOS**

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes, ellos son: viscosidad, viscosidad después del envejecimiento y penetración. Cada sistema abarca diferentes grados, cada uno con diferentes grados de consistencia.

**Viscosidad:**

Este es el sistema más usado en los Estados Unidos. La tabla 2 muestra el sistema en forma de tablas. En el sistema de viscosidad el poise es la unidad normal de medida para viscosidad absoluta. Refiriéndose a la tabla 2 se observa que cuanto más alto es el número de poises más viscoso es el asfalto.

El AC-2.5 (Cemento asfáltico con una viscosidad de 250 poises a 60 ° C ó 140 ° F) es conocido como un asfalto “blando”. El AC-40 (Cemento asfáltico con una viscosidad de 4000 poises a 60 ° C ó 140 ° F) es conocido como un asfalto “duro”.

**Viscosidad después del envejecido:**

La idea es identificar cuáles son las características de viscosidad después de que se ha colocado el asfalto en el pavimento. Para poder simular el envejecimiento que ocurre en la planta asfáltica durante el mezclado, el asfalto debe ser ensayado en el laboratorio utilizando un ensayo patrón de envejecimiento. El residuo asfáltico que queda después del envejecimiento es clasificado, posteriormente, de acuerdo a su viscosidad. Una vez más la unidad normal de medida es el poise.

La tabla 3 identifica los posibles grados bajo este sistema.

En la tabla 3 la abreviación “AR” corresponde a “residuo envejecido”. Obsérvese que el AR-10 (viscosidad de 1000 poises) se conoce como un asfalto “blando”, mientras que el AR-160 (viscosidad de 16 000 poises) se conoce como un asfalto “duro”.

Tabla 2.5 Requisitos para cemento asfáltico clasificado por viscosidad a 60° C

(Clasificación basada en el asfalto original)						
<b>Grado de Viscosidad</b>						
<b>Prueba</b>	<b>AC-2.5</b>	<b>AC-5</b>	<b>AC-10</b>	<b>AC-20</b>	<b>AC-30</b>	<b>AC-40</b>
Viscosidad, 60° poises	250-50	500+-100	1000+-200	2000+-400	3000+-600	4000+-800
Viscosidad, 135° Cs-mínima	125	175	250	300	350	400
penetración, 25° C 100 g., 5 segundos mínimo	220	140	80	60	50	40
punto inflamador, elevand. °C(°F) mínimo	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)	232(450)
solubilidad en tricloroetileno, por cierto-minimo	99	99	99	99	99	99
pruebas sobre el residuo del ensayo TFO:						
perdida por calentamiento, porcentaje-máximo (opcional) <sup>3</sup>		1	0,5	0,5	0,5	0,5
Viscosidad, 60° poises-máximos	1000	2000	4000	8000	12000	16000
ductilidad, 25°C, 5cm por minuto, cm mínimo	100(1)	100	75	50	40	25
prueba de mancha (cuando y como se especifique) <sup>2</sup> con:						
solvente normal de nafta	negativo para todos los grados					
solvente de nafta-xileno, %xileno	negativo para todos los grados					
solvente de heptano-xileno, %xileno	negativo para todos los grados					

Fuente. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente del Asphalt Institute. serie de manuales N° 22 (MS-22).

<sup>1</sup> Si la ductilidad es menor que 100, el material será aceptado si la ductilidad a 15. 6° C

tiene un valor mínimo de 100

<sup>2</sup> El uso de la prueba de mancha es opcional. El ingeniero deberá especificar el tipo de solvente usado cuando se va a usar la prueba. En el caso de los solventes de xileno, deberá de especificar el porcentaje de xileno a ser usado.

<sup>3</sup> El uso de requisito de perdida por calentamiento es opcional.

Tabla 2.6 Requisitos para cemento asfaltico clasificado por viscosidad a 60° C

(Clasificación basada en el residuo del ensayo RTFO)					
<b>Grado de Viscosidad</b>					
<b>Prueba</b>	<b>AR-10</b>	<b>AR-20</b>	<b>AR-40</b>	<b>AR-80</b>	<b>AR-160</b>
Viscosidad, 60° poises	1000+- 250	2000+ -500	4000+- 1000	8000+- 2000	16000+- 4000
Viscosidad, 135° Cs-mínima	140	200	275	400	550
penetración, 25° C 100 g., 5 segundos mínimo	65	40	25	20	20
porciento de penetracion original, 25°C-minimo	-	40	45	50	52
ductilidad, 25°C, 5cm por minuto, cm mínimo	100(2)	100(2)	75	50	52
pruebas sobre el asfalto original:					
punto inflamador, elevand. °C(°F) mínimo	205(400)	219(425)	227(440)	232(450)	238(460)
solubilidad en tricloroetileno, por cierto-mínimo	99	99	99	99	99

Fuente. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente del Asphalt Institute. Serie de Manuales N° 22 (MS-22).

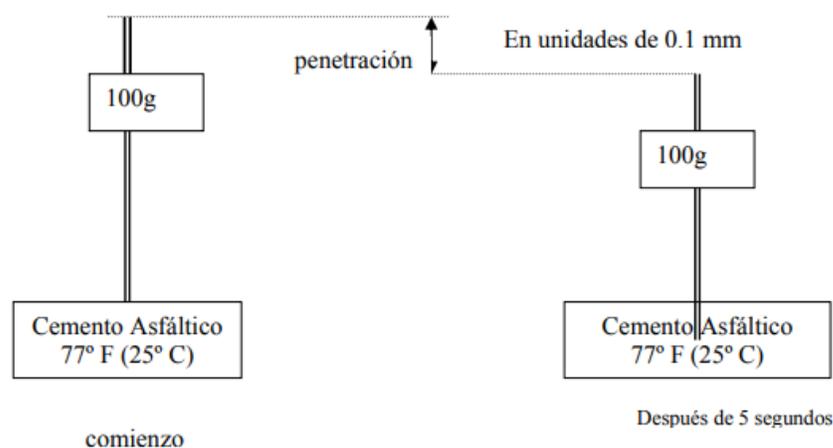
<sup>1</sup> AASHTO 179 (TFO) puede ser usado, pero AASHTO T 240 deberá ser el método de referencia.

<sup>2</sup> Si la ductilidad es menor que 100 el material será aceptado si la ductilidad a 15.60 C tiene un valor / mínimo de 100

### Penetración:

El tercer método usado para clasificar asfaltos es el de penetración. La figura 6 muestra cómo se efectúa el ensayo de penetración. Una aguja normal se deja penetrar dentro de la muestra de asfalto bajo una carga dada. La distancia que la aguja penetra en la muestra en un tiempo determinado es medida en décimas de milímetro (0.1 mm). Un grado 200-300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones específicas, de 200 a 300 décimas milímetro. Esto es indicación de un asfalto “blando”. Un grado 40-50, por otro lado, es indicación de un asfalto “duro” en el cual la aguja fue capaz de penetrar solamente de 40 a 50 décimas de milímetro. La Tabla 1.3 muestra los distintos grados incluidos bajo este sistema.

Figura 2.8 Diagrama de prueba de penetración



Fuente. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente del Asphalt Institute. Serie de Manuales N° 22 (MS-22).

Tabla 2.7 Sistema de clasificación por penetración para cemento asfáltico

<b>Grado de Penetración</b>										
<b>Prueba</b>	<b>40-50</b>		<b>60-70</b>		<b>85-100</b>		<b>120-150</b>		<b>200-300</b>	
	Min	Ma x	Min	Ma x	Min	Ma x	Min	Ma x	Min	Ma x
penetración, 25° C 100 g., 5 segundos	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
punto inflamador, elevand. °C	450	-	450	-	230	-	425	-	350	-
ductilidad, 25°C, 5cm por minuto		-	100	-	100	-	100	-	-	-
solubilidad en tricloroetileno, por cierto		-	99	-	99	-	99	-	99	-
TFO 3.2mm,63° C, 5 horas										
perdida por calentamiento, por ciento	-	0,8	-	0,8	-	1	-	1,3	-	1,5
penetración del residuo, por ciento del original	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
ductilidad del residuo a 25°C, 5cm por min, cm	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-
prueba de mancha (cuando y como se especifique):										
solvente normal de nafta	negativo para todos los grados									
solvente de nafta-xileno, %xileno	negativo para todos los grados									
solvente de heptano-xileno, %xileno	negativo para todos los grados									

Fuente. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente del Asphalt Institute. Serie de Manuales N° 22 (MS-22).

## 2.5.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO

El Asfalto es un material TERMOPLASTICO y su consistencia varía considerablemente con la Temperatura.

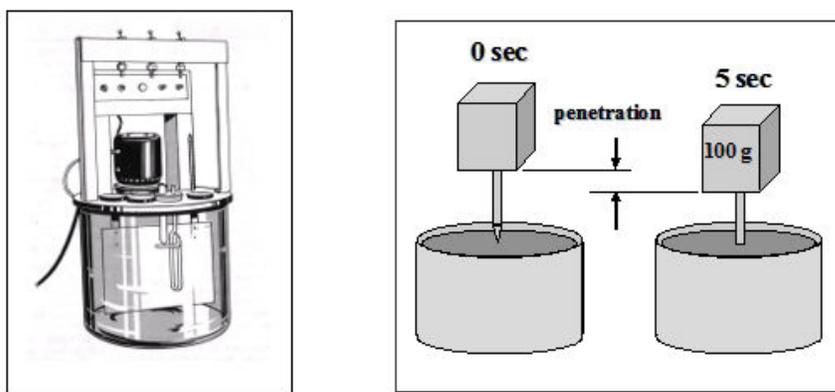
### Ensayo de viscosidad

La viscosidad determina la Resistencia al desplazamiento en el rango de temperaturas usadas durante los usos de aplicación. Es indicativo de la “Consistencia” del Asfalto y se mide con Viscosímetros Cinemáticas.

### Ensayo de penetración

La Consistencia es medida por el ensayo de PENETRACION que es una medida de profundidad de una aguja que penetra en una muestra dada.

Figura 2.9 Equipo de penetración de laboratorio.



Fuente. Maestría en explicaciones y firmas UAJMS

### Punto de ablandamiento (pa)

Es otra medida empírica de Consistencia, que corresponde aproximadamente a la temperatura en la cual el asfalto se torna “Blando”. Es una especie de punto de fusión. “Cuando más alto es el punto de ablandamiento, mejor es su resistencia a la susceptibilidad térmica”.

### Ensayo de ductilidad

Indica la adhesividad, es decir resistencia a la tracción. Una alta ductilidad indica mejor

susceptibilidad térmica. Esa medida por extensión y la elongación es medida en cm.

### **Punto de inflamación**

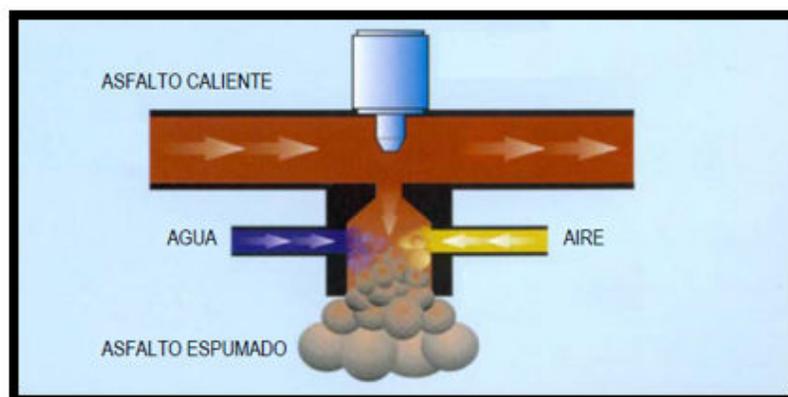
Llamado también “punto de Chispa”, indica la temperatura a la que puede calentarse el material, sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura, usualmente, es muy inferior a aquella a la que el material ardería o su punto de fuego. Por lo tanto, este análisis sirve como prueba de seguridad en la operación de las plantas asfálticas en caliente.

## **2.6 ASFALTO ESPUMADO**

### **2.6.1 PRODUCCIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO**

El asfalto espumado (también conocido como asfalto celular), se logra mediante un proceso, en el cual se inyecta una pequeña cantidad de agua fría (1 a 4% del peso del asfalto) y aire comprimido a una masa de asfalto caliente (140° C - 180° C), dentro de una cámara de expansión (Figura 2.10), generando espontáneamente espuma.

Figura 2.10 Cámara de expansión



Fuente. Tecnología del asfalto espumado, Univ. católica de Chile

El proceso de expansión se puede explicar de la siguiente manera: en el momento que las gotas de agua fría toman contacto con el asfalto caliente, se produce un intercambio de energía entre el asfalto y las gotas de agua, lo que eleva la temperatura del agua hasta los 100 °C, esta transferencia energética genera en forma instantánea vapor y una expansión explosiva del asfalto, se crean burbujas de vapor que se encapsulan dentro del asfalto.

Esta mezcla se libera a través de la boquilla y el vapor encapsulado se expande formando burbujas de asfalto aumentando su volumen (de 12 a 20 veces Mayor) que alcanza el equilibrio debido a la tensión superficial.

Este proceso reduce la viscosidad del asfalto lo que permite el mezclado con los suelos humedecidos a temperatura ambiente. Sin embargo, este equilibrio dura menos de 1 minuto debido a la baja conductividad térmica del asfalto y el agua. Una vez que el asfalto espumado llega a temperatura ambiente las burbujas de vapor colapsan por condensación y se desintegra la espuma. El asfalto recupera su volumen inicial.

### **2.6.2 PROPIEDADES DEL ASFALTO ESPUMADO**

El asfalto espumado se caracteriza en función de dos propiedades empíricas:

#### **Razón de expansión (Ex)**

Es la razón entre el volumen de asfalto espumado y el volumen del asfalto original. La razón de expansión indica la trabajabilidad de la espuma, y su capacidad de cubrimiento y mezclado con los agregados.

#### **Vida media ( $t_{1/2}$ )**

Es el tiempo, en segundos, que tarda el asfalto en reducir su volumen a la mitad del volumen expandido. La vida media es un indicador de la estabilidad de la espuma y entrega una idea del tiempo disponible para mezclar el asfalto espumado con los agregados antes de que colapse la espuma.

La razón de expansión y vida media son medidas que dependen de muchos factores, entre éstos:

Temperatura del asfalto: Las propiedades de espumación de la Mayoría de los asfaltos mejoran con temperaturas más altas. Espumas aceptables se consiguen con temperaturas sobre 140 ° C (Abel, 1978).

Dosis de agua inyectada: Generalmente la Razón de Expansión aumenta, con un incremento en la cantidad de agua inyectada, mientras la Vida Media decrece.

Presión bajo la cual el asfalto es inyectado en la cámara de expansión: Bajas presiones (menores a 3 bar) afectan negativamente tanto a la Razón de Expansión como a la Vida Media.

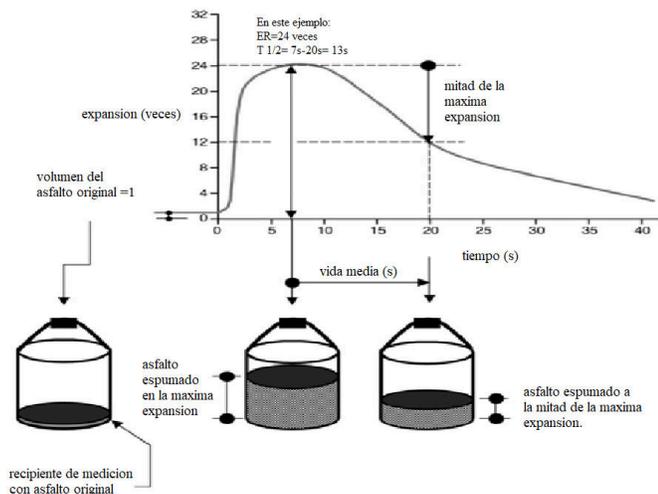
Uso de agentes antiespumantes, tales como compuestos de silicona, en el asfalto virgen (Abel, 1978).

Viscosidad del asfalto: En cuanto a la viscosidad del asfalto, los resultados obtenidos en varios estudios no permiten relacionar de forma concluyente esta característica con las variaciones en la Razón de Expansión y Vida Media (Brennen et al., 1983).

Siendo los principales factores, la temperatura del asfalto y la dosis de agua. A Mayores temperaturas de espumado y Mayor cantidad de agua se incrementa la Razón de Expansión, pero a su vez disminuye la Vida Media, sin embargo, el mejor espumado es generalmente considerado como aquel que optimiza tanto la Razón de Expansión como la Vida Media. En general no existen especificaciones estándar para optimizar estas propiedades, pero es recomendable aumentar levemente el valor óptimo de la Vida Media, a partir del punto de intersección, aún en desmedro de la Razón de Expansión.

Las características de espumado (Razón de Expansión y Vida Media) no son medidas exactas, sino más bien órdenes de magnitud. En general se recomienda una Razón de Expansión entre 8 y 20, y al menos 15 segundos de Vida Media (Macarrone et. al., 1994).

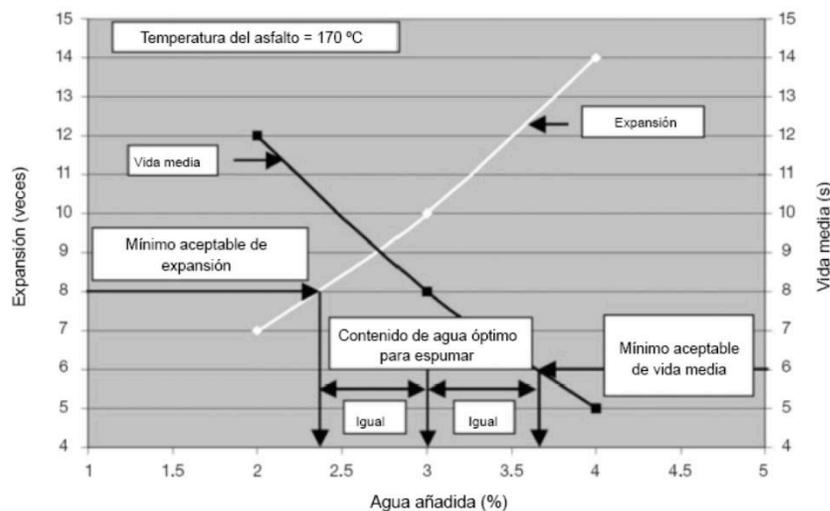
Figura 2.11 Optimización de la razón de expansión y vida media



Fuente. Programa de infraestructura del transporte (PITRA)

Como se puede observar el contenido de agua a añadir es muy importante para el espumado, este debe ser calculado, por lo que para el desarrollo de este proyecto se adicionara distintos porcentajes de agua sobre la masa de asfalto y se graficara la expansión y la vida media para obtener el contenido de agua optimo a utilizar. Se pueden usar los siguientes porcentajes: 2%; 3% y 4% como ejemplo, y graficar ambas características en un solo grafico como se muestra en la siguiente figura:

Gráfica 2.3 Relación entre propiedades del asfalto espumado.



Fuente. Programa de infraestructura del transporte (PITRA).

### 2.6.3 VENTAJAS DEL ASFALTO ESPUMADO

Esta técnica presenta las siguientes ventajas frente a la utilización del asfalto tradicional:

Como estabilizante ayuda a controlar la expansión de capas sub rasantes y también puede utilizarse junto con gran variedad de otros tipos de suelos.

Aumenta la resistencia a cortante y reduce la susceptibilidad a daño por humedad de los materiales estabilizados, da Mayor rigidez a la capa sub rasante volviéndola flexible y resistente a la fatiga.

Ahorro en los tiempos de puesta en servicio, pues se puede abrir al tránsito en un menor tiempo después de haber sido compactada la capa.

Amigable con el ambiente, pues no se presenta evaporación de volátiles al aire libre en todo el proceso desde el mezclado hasta el curado.

Y, principalmente la conservación de la energía, solo se necesita calentar el asfalto antes de ser espumado, los suelos se pueden mezclar en frío y húmedos (no requieren de secado).

### 2.6.4 CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

El contenido óptimo de asfalto para estabilizar sub rasantes no puede ser determinado con la precisión de las mezclas asfálticas en caliente, sin embargo, una buena aproximación a este valor puede ser obtenida mediante la optimización de sus propiedades mecánicas.

Otra de las aproximaciones al contenido óptimo de asfalto es el uso de la relación asfalto-material fino, debido al importante rol que este juega en las propiedades mecánicas. **En la tabla 2.8.** se presenta una serie de valores que pueden ser usados como guía para seleccionar el contenido óptimo de asfalto en función del contenido de finos (Csiir transportek, 1999).

Tabla 2.8 Guía de valores para el contenido óptimo de asfalto

% pasa tamiz 4.75mm	% pasa tamiz 0.075	% asfalto espumado
< 50 (gravas)	3 a 5	2,5
	5 a 7,5	3
	7,5 a 10	3,5
	>10	4
> 50 (arenas, limos y arcillas)	15 a 20	2,5
	20 a 25	3,5
	>30	4,5

Fuente. Programa de infraestructura del transporte (PITRA)

### 2.6.5 APLICACIONES DEL ASFALTO ESPUMADO

Existen principalmente dos tipos de aplicaciones para el asfalto espumado, el reciclado en frío de pavimentos asfálticos y la estabilización de suelos (Thenoux y Jamet, 2002).

**Reciclado en frío de pavimentos asfálticos:** Consiste en la recuperación del material de un pavimento asfáltico existente, el cual es mezclado con asfalto espumado, adiciones (cemento o cal) y agregados nuevos (si es necesario) para formar una base asfáltica que será colocada en el mismo lugar o en otro distinto. La recuperación puede ejecutarse mediante un equipo fresador capaz de disgregar el material o mediante métodos convencionales donde el proceso de disgregación ocurre con posterioridad a la recuperación. En general el material recuperado está formado no sólo por concreto asfáltico disgregado, sino también por agregados aportados por la base y sub base granular existente.

**Estabilización de suelos:** Consiste en la estabilización de suelos de relativa baja plasticidad ( $IP < 16$ ) con asfalto espumado en donde los suelos pueden provenir de la recuperación de áridos de un camino sin pavimentar o de nuevos pozos. Principalmente se emplean agregados recuperados cuya granulometría es mejorada por agregados nuevos (si es necesario), ya que uno de los objetivos de esta aplicación es obtener mezclas de bajo costo. El proceso de recuperación de los agregados es similar al descrito para el reciclado en frío de pavimentos asfálticos.

**CAPÍTULO III**  
**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS**  
**DE PROPIEDADES DE LOS**  
**MATERIALES ESTABILIZADOS.**

### **CAPÍTULO III**

## **CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ESTABILIZADOS**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

En los capítulos anteriores se trataron aspectos sobre la estabilización con asfalto espumado y sus propiedades, las características de los agregados finos, las propiedades de la sub rasante, así como las normas aplicables al diseño de las mismas.

En el presente capítulo se desarrollan las pruebas de laboratorio necesarias para llevar a cabo la estabilización y análisis de propiedades propuestas en el estudio, éstas se las realizara a las muestras de agregado obtenidas en 2 tramos de camino ubicados en la localidad de "San Pedro" y "Barrio 2 de Mayo", se presenta el procedimiento para la caracterización del cemento asfáltico, aclarando que estos ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos y asfaltos de la U.A.J.M.S. por tal motivo, se describen dichos ensayos con la respectiva norma que los ampara.

El capítulo está dividido principalmente en tres partes: La primera que constituye la descripción detallada del procedimiento para la caracterización de los materiales pétreos (limos y arcillas), la segunda parte constituye al análisis del cemento asfáltico y finalmente se aborda las pruebas realizadas a la espuma expansiva (relación de expansión y vida media) y estabilización de la misma.

El procedimiento para el diseño esta propuesto por el manual de carreteras de la ABC

### 3.2 RECONOCIMIENTO Y UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El primer tramo donde se realizó la toma de muestras, está ubicado en la ciudad de Tarija, en las siguientes coordenadas:

Latitud: 21° 30' 39,80" *S*

Longitud: 64° 43' 02,25" *O*

Figura 3.1 Ubicación del primer sitio de estudio: barrio 2 de Mayo



Elevacion: 1890 m.sn.m.

Fuente. Google Earth.

Se optó por realizar la toma de muestras en esta zona, porque este tramo es una calle que conectará a un puente que está en construcción, además los alrededores del lugar se encuentran aún despobladas por lo que es de prever la construcción de más obras civiles y más vías de acceso, en un futuro cercano.

En los alrededores predominan los suelos finos arcillosos, por tanto, suelos expansivos, lo que afectaría en gran manera a las obras que se construyan en el lugar, y a las que se encuentran en construcción.

Figura 3.2 Tramo donde se extrajo la muestra de suelo: barrio 2 de Mayo



Fuente. Elaboración propia.

El segundo lugar donde se realizó la toma de muestras, está ubicado en la ciudad de Tarija, en las siguientes coordenadas:

Latitud:  $21^{\circ} 29' 21,95'' S$

Longitud:  $64^{\circ} 42' 33,71'' O$

Figura 3.3 Ubicación del segundo sitio de estudio: carretera San Pedro



Elevación: 1952 m.s.n.m

Fuente. Google Earth.

Se optó por realizar la toma de muestras en esta zona, porque este tramo es una carretera que está en proceso de mantenimiento y construcción, será una vía de acceso a la represa de sella y además los alrededores del lugar se encuentran aún despobladas por lo que es de prever la construcción de más obras civiles y más vías de acceso, en un futuro cercano.

Figura 3.4 Tramo donde se extrajo la muestra: carretera San Pedro



Fuente. Elaboración propia.

### **3.3 UNIDAD DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL**

#### **3.3.1 MUESTRA**

La muestra es la obtención de material por ser aprovechado en este proyecto la cual se extrajo de 2 tramos, una calle y una carretera en el departamento de Tarija, siendo ambos partes de la capa de sub rasante.

Se utilizó agua en varias proporciones para realizar la espuma expansiva, esta agua fue introducida a la cámara con ayuda de una jeringa.

#### **3.3.2 MUESTREO**

Para el muestreo se tuvo que realizar un aparato especial construido para poder espumar el asfalto y así poder mezclar con la sub rasante y realizar la estabilización, con este muestreo se pretende variar los porcentajes de agua para espumar el asfalto.

#### **3.3.3 CÁMARA DE EXPANSIÓN**

La cámara de expansión a usar será un equipo artesanal que fue donado un tiempo atrás al laboratorio, tomando todas las medidas de seguridad, especificaciones mínimas y reacondicionándolo si es necesario para su correcto funcionamiento.

Entre los materiales que la compone tenemos los siguientes:

Olla a presión

Termómetro

Tubo de cobre

Válvula tipo mariposa

Tubería de  $\frac{3}{4}$

Cinta teflón

Silicona

### **3.3.4 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

El método utilizado para este trabajo será correlacional mediante el cual estudiaremos, seleccionaremos, agruparemos las variables a analizar, así estudiar las propiedades mecánicas de los materiales (sub rasantes) adhiriendo espuma expansiva para poder estabilizarlos y por ende mejorar su resistencia característica.

Se estudiará todos los ensayos necesarios para la caracterización de los asfaltos.

Se analizará los resultados la vida útil con relación a la expansión del asfalto espumado.

De acuerdo a las técnicas empleadas nos permitirá obtener la resistencia final de la sub rasante estabilizada con espuma expansiva para poder realizar las comparaciones pertinentes de las propiedades empíricas, e iniciales.

### **3.3.5 ELECCIÓN DEL PORCENTAJE OPTIMO DE AGUA A INYECTAR.**

Para definir la cantidad necesaria de agua a inyectar en el asfalto para generar una óptima expansión y duración de la espuma, es que se siguió el procedimiento que se detalla a continuación:

Se estableció un volumen inicial de asfalto de  $60\text{cm}^3$  y se calculó su peso.

Se calculó la cantidad de agua en ml a ser inyectada a la muestra de asfalto, con variaciones entre 2 y 4%, con incrementos de 0.5%.

Para la elaboración del ensayo se escogieron temperaturas de 140, 150, 160, 170 y  $180^{\circ}\text{C}$ .

Se calentó una muestra de asfalto a la temperatura más baja, a la que se inyectó el primer porcentaje de agua en ml, se registró el máximo volumen de expansión y el tiempo de duración de la espuma de asfalto; posteriormente con una nueva muestra de asfalto, se repitió el procedimiento, y se inyectó otro porcentaje de agua.

El mismo procedimiento se repitió para las 5 cantidades de agua correspondientes a las 4 temperaturas escogidas para la realización del ensayo.

Con el resultado más favorable se procederá con la estabilización de los materiales de sub rasante con espuma expansiva a las cuales se hará variar los contenidos de asfalto espumado para obtener los valores de sus propiedades mecánicas.

### 3.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Para realizar la caracterización de los agregados de la sub rasante, se realizaron los ensayos de **Granulometría, Hidrómetro, Peso Específico, Límites de Atterberg, Compactación y C.B.R.** Con la finalidad de determinar el comportamiento del agregado para la estabilización de la misma.

Tabla 3.1 Ensayos de laboratorio para caracterización de suelo puro

<b>Ensayos de Caracterización de Suelos</b>	
<b>Ensayo</b>	<b>Norma ABC</b>
Análisis granulométrico	S0204. (ASTM D421 ASTM D2217 AASHTO T87)
Contenido de humedad del suelo	S0301. (ASTM D2216)
Análisis granulométrico por tamizado	S0302. (ASTM D422 AASHTO T88)
Análisis granulométrico - hidrómetro	S0303. (ASTM D422)
Límite líquido	S0304. (ASTM D4318 AASHTO T89)
Límite plástico e índice de plasticidad	S0305. (ASTM D4318 AASHTO T90)
Peso específico	S0307. (ASTM D854 AASHTO T100)
Compactación estándar	S0402. (ASTM D698 AASHTO T180)
C.B.R.	ASTM D 1883 – 07

Fuente. Elaboración propia

### 3.4.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

Este ensayo tiene como objetivo determinar el contenido de agua presente en una muestra de suelo.

La determinación del contenido de agua en un suelo es de vital importancia en el momento de tratar propiedades del mismo como la cohesión, consistencia, cambios de volumen y estabilidad mecánica.

Figura 3.5 Taras con muestra de suelo.



Fuente. Elaboración propia.

#### **Preparación de muestras**

Seleccionar un recipiente de referencia y masa conocida. Una vez seleccionada la muestra a ensayar, depositar la misma dentro del recipiente y determinar la masa del conjunto (recipiente + muestra).

Se procede a dejar el recipiente con la muestra dentro del horno, a una temperatura constante de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ . Se debe dejar en el horno el tiempo suficiente para que se alcance una masa constante. Para tener seguridad de lo anterior se deben hacer mediciones de masa en intervalos de tiempo.

Una vez se haya secado el material se retira del horno y se deja secar a temperatura constante para luego determinar su peso seco.

Tabla 3.2 Resultados de contenido de humedad promedio de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	% de humedad (%w)
	2,62
<b>M. Suelo San Pedro</b>	% de humedad (%w)
	2,09

Fuente. Elaboración propia

### **Análisis de resultados.**

Los contenidos de humedad calculados para ambos materiales son relativamente bajos, esto es debido a que esta dependerá principalmente de las condiciones atmosféricas y del lugar de extracción de la muestra ya que pueden existir zonas donde la lluvia puede formar grandes charcos, zonas en que la evaporación no sea rápida o se haya extraído la muestra en época no lluviosa.

El contenido de humedad real con que se trabaja en el estudio es aquel donde la muestra sea la más representativa.

### **3.4.2 PESO ESPECÍFICO**

También llamada gravedad específica. Se define como la relación entre el peso específico de la mezcla y el peso específico del agua. Mediante este ensayo se determina la densidad de las partículas sólidas de los materiales.

Figura 3.6 Ensayo de peso específico



Fuente. Elaboración propia. Fotografía de laboratorio.

### Preparación de mezclas

Para su ejecución se tomó 80 gramos de material, tamizados previamente por el tamiz N°10.

Se colocó la muestra en un plato donde se le agregó una cantidad de agua necesaria para diluirla completamente y retirar todo el aire atrapado entre las partículas, se removió durante 10 minutos formando una pasta homogénea.

Posteriormente se procedió como un ensayo de suelo común como indica el procedimiento y uso de materiales del ensayo “S0307. *Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T100)*”, cabe resaltar que se utilizó el mismo frasco para todos los ensayos.

Tabla 3.3 Resultados de peso específico de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )
	2,673
<b>M. Suelo San Pedro</b>	Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )
	2,695

Fuente. Elaboración propia

### Análisis de resultados.

Después de determinar el peso específico relativo de las 2 muestras de suelo se procede a comparar con los datos de la **tabla 2.2** del capítulo 2 donde podemos verificar que los resultados obtenidos son próximos a los especificados en la misma:

Tabla 3.4 Comparación de peso específico de suelos 1 y 2.

	Calculado	Tabla 2.2
<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )	Arena Limosa
	2,673	2,67-2,70
<b>M. Suelo San Pedro</b>	Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )	Arcilla Inorgánica
	2,695	2,70-2,80

Fuente. Elaboración propia

Para la muestra de suelo del barrio 2 de Mayo su rango se encuentra dentro de las especificaciones de la tabla 2.2 perteneciendo así a las arenas limosas.

Para la muestra de suelo de la carretera a San Pedro su rango es muy próximo a las arcillas inorgánicas por tanto este se encuentra en la categoría de arcillas inorgánicas, pero también presenta en su composición cantidad de material limoso.

### 3.4.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

El análisis granulométrico consiste en la separación de las partículas de suelo por rangos de tamaños, haciendo uso de mallas o tamices con aberturas cuadradas. Mediante procesos de agitado se lleva a cabo la separación de las partículas en porciones, las cuales se pesan expresando dicho retenido como porcentajes en peso de la muestra total y aunque se considera físicamente imposible determinar el tamaño exacto de cada partícula, la prueba de granulometría si permite agruparlas por rangos de tamaño. Universalmente se ha establecido la malla No. 200 (0,075mm) como medida divisoria en la clasificación de suelos; finos y gruesos.

Figura 3.7 Grafica de tamizado de cada abertura de malla.



Fuente. Elaboración propia.

### **Preparación de muestras**

Primeramente, se efectúa un muestreo para el agregado grueso mediante el cuarteo que consiste en colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el Mayor tamaño de partículas.

La muestra escogida de agregado grueso se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra.

Se procede a lavar la muestra de material con el tamiz N200 para eliminar las arcillas y residuos en los agregados más gruesos por el método de lavado para luego ser secado al horno.

Tomamos la muestra, se coloca sobre los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°80, N°200, inmediatamente con el equipo de tamizado realizamos el proceso y facilitamos que las partículas puedan retenerse o pasar en cada uno de los tamices

Los resultados del ensayo se dan en porcentajes del peso total del material que pasa cada tamiz de dimensiones conocidas, para lo cual se pesan las respectivas cantidades retenidas y sumadas en forma acumulativa a las anteriores de tamaño Mayor, estos pesos acumulados se dividen para el peso total de la muestra ensayada

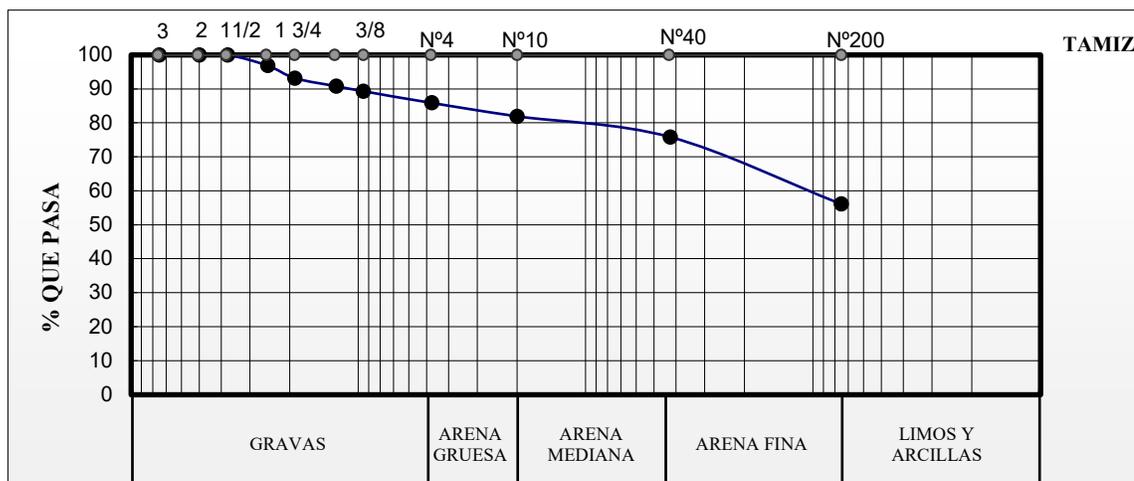
y se multiplica por 100. La diferencia a 100 de cada uno de estos porcentajes acumulados nos da el porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente, los resultados de este ensayo se pueden ver en las siguientes Tablas:

Tabla 3.5 Granulometría promedio suelo 2 de Mayo

<b>Peso Total Seco</b>	<b>2921,4 gr</b>		<b>Abertura</b>
Tamiz	Muestra 2 de Mayo		Tamiz
Nº	Peso Ret.	% Que Pasa	mm.
<b>1 1/2"</b>	0	100	37,5
<b>1"</b>	90,93	96,89	25,0
<b>3/4"</b>	109,07	93,15	19,0
<b>1/2"</b>	68,50	90,81	12,5
<b>3/8"</b>	42,80	89,34	9,5
<b>Nº4</b>	100,60	85,90	4,75
<b>Nº10</b>	115,50	81,95	2,0
<b>Nº40</b>	178,23	75,85	0,425
<b>Nº200</b>	576,37	56,12	0,075
<b>BASE</b>	1633,17	0,21	-
<b>TOTAL</b>	2915,17		

Fuente. Elaboración propia

Grafica 3.1 Curva Granulométrica – suelo 2 de Mayo.



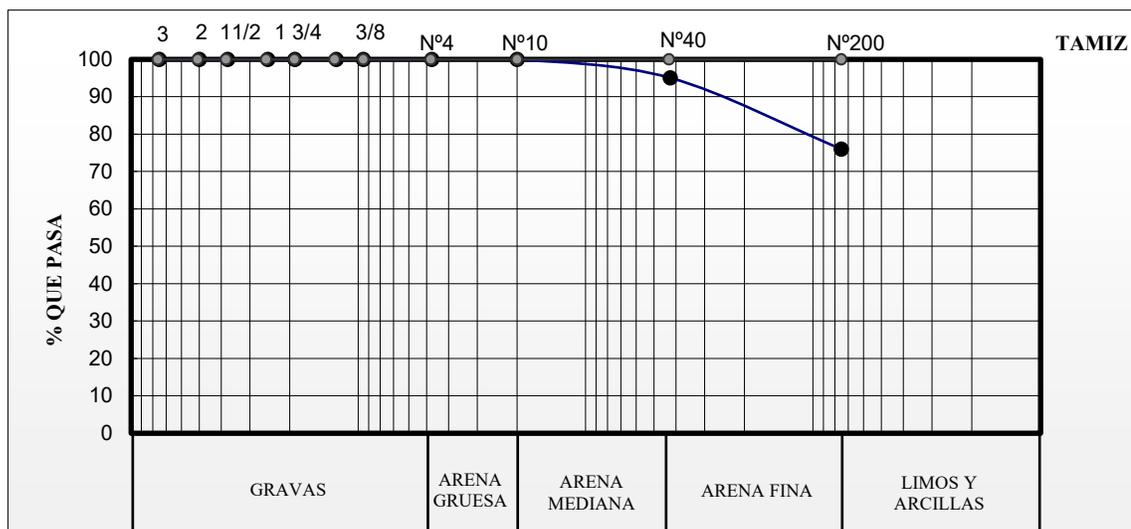
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.6 Granulometría promedio suelo San Pedro

<b>Peso Total Seco</b>	<b>401.6 gr</b>		<b>Abertura</b>
Tamiz	Muestra San Pedro		Tamiz
N°	Peso Ret.	% Que Pasa	mm.
<b>1 1/2"</b>	0	100	37,5
<b>1"</b>	0,00	100,00	25,0
<b>3/4"</b>	0,00	100,00	19,0
<b>1/2"</b>	0,00	100,00	12,5
<b>3/8"</b>	0,00	100,00	9,5
<b>N°4</b>	0,00	100,00	4,75
<b>N°10</b>	0,00	100,00	2,0
<b>N°40</b>	15,62	95,08	0,425
<b>N°200</b>	68,40	76,00	0,075
<b>BASE</b>	317,58	0,00	-
<b>TOTAL</b>	401,60		

Fuente. Elaboración propia

Gráfica 3.2 Curva Granulométrica – suelo San Pedro



Fuente. Elaboración propia.

### Análisis de resultados.

Haciendo un análisis de las curvas de granulometría de las 2 muestras analizadas se puede ver que en todos los porcentajes que pasa el tamiz N° 200 (0.075 mm de diámetro) es más del 50%, correspondiente a un material fino compuesto por limos o arcillas.

Realizando una comparación con la **tabla 2.1** del capítulo 2 podemos definir que nuestra granulometría para las 2 muestras cumple con los requisitos mínimos para estabilización con asfalto:

Tabla 3.7 Comparación granulometría de suelos 1 y 2 con tabla.

Tabla 2.1		Calculado	
requisitos	Suelo-asfalto E.	2 de Mayo	San Pedro
N°4	50-100	85,9	100
N°40	35-100	75,85	95,08
N°200	35-100	56,12	76,00

Fuente. Elaboración propia

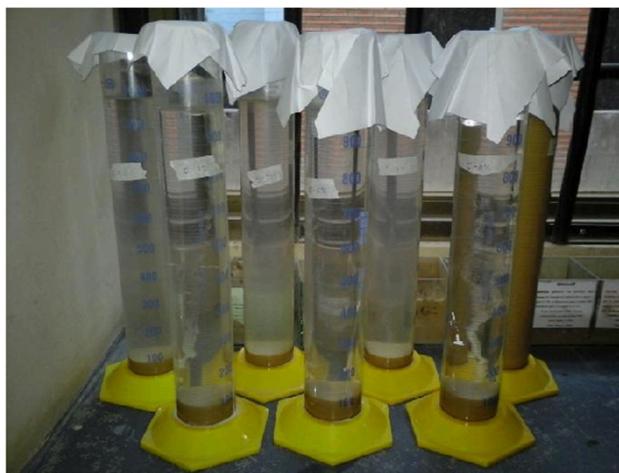
### 3.4.4 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDRÓMETRO

Este ensayo consiste en clasificar por tamaños los granos que componen un suelo y los resultados son representados gráficamente.

El análisis de este ensayo se basa en la ley de Stokes que relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente a través de un fluido, con el diámetro de la esfera. El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados que permanecen en suspensión en un determinado tiempo.

Mediante este ensayo de laboratorio determinamos el porcentaje de arcillas y limos contenidos en una determinada muestra.

Figura 3.8 Ensayos de hidrómetro finales.



Fuente. Elaboración propia. Fotografía de laboratorio.

#### **Preparación de muestras**

La muestra utilizada para el este ensayo, fue de 80 gramos para ambos suelos, de material que pasa el tamiz N°200.

Estas mezclas se dejan saturar por 15 minutos con silicato de sodio para su completa separación de partículas.

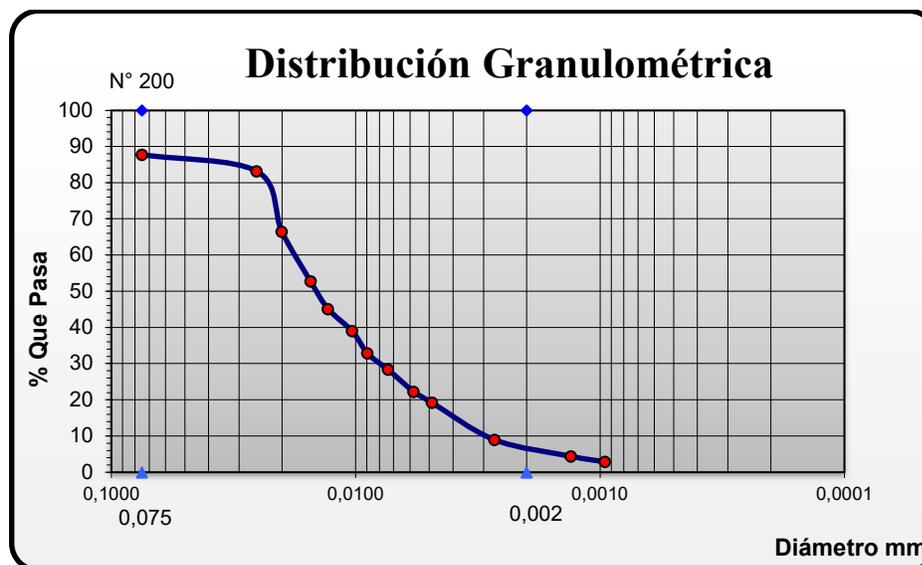
posteriormente se vierte a la probeta la muestra, se llena de agua destilada y se sigue el procedimiento y uso de materiales del ensayo “S0303. Análisis granulométrico por medio del Hidrómetro (ASTM D422)”

Tabla 3.8 Resultados hidrómetro de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	% de limos	93,58
	% de arcillas	6,42
<b>M. Suelo San Pedro</b>	% de limos	57,11
	% de arcillas	42,89

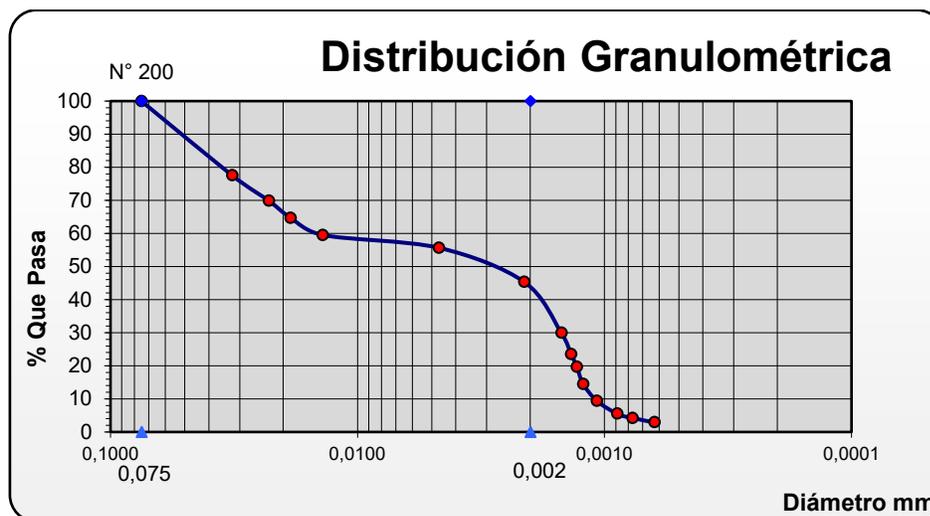
Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 3.3 Granulometría hidrómetro – suelo 2 de Mayo



Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 3.4 Granulometría hidrómetro – suelo San Pedro



Fuente. Elaboración propia.

### Análisis de resultados.

Haciendo un análisis de las curvas de granulometría por hidrómetro de las 2 muestras analizadas se puede ver que en todos los porcentajes que pasa el tamiz N° 200 (0.075 mm de diámetro) es más del 50%, correspondiente a un material fino compuesto por limos o arcillas.

### 3.4.5 LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO

Este ensayo tiene por objeto la determinación del límite líquido de las diferentes muestras mediante la copa de Casagrande.

**El límite líquido** es la humedad, expresada en porcentaje, de la masa de suelo seco remoldeado que corresponde a la humedad necesaria para que entren en contacto las porciones divididas de la copa de Casagrande, aplicando 25 golpes.

Figura 3.9 Copa de Casagrande con muestra para ensayo de límite líquido.



Fuente. Elaboración propia. Foto de laboratorio.

### **Preparación de muestras**

Se toman 200 gramos de material seco que pasa el tamiz N°40 (0,425mm).

Posteriormente se procede a ejecutar el ensayo como indica el procedimiento y uso de materiales del ensayo “S0304. Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89)”

El **límite plástico** de los suelos es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco remoldeado, es el límite entre el estado plástico y el estado semisólido. Es la humedad que corresponde a la necesaria para ser re amasados sin que se disgreguen o se rompan, el valor corresponde a la frontera entre el estado semilíquido y plástico. En forma conjunta con el límite líquido se determina el índice de plasticidad del suelo en estudio, muy importante en la clasificación del suelo y del potencial de expansión del mismo.

### **Preparación de muestras**

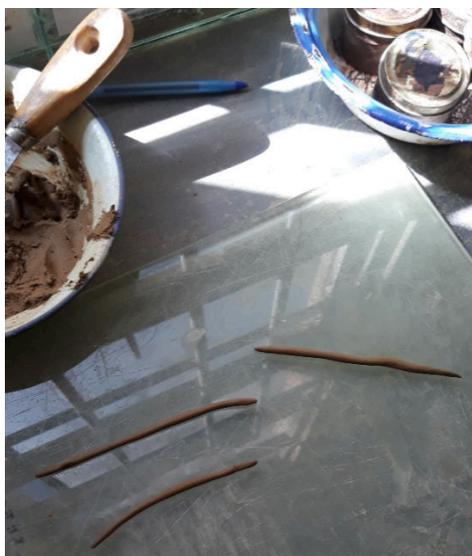
Este ensayo fue ejecutado tomando una porción de mezcla humedecida con la que se preparó el ensayo de límite líquido. La porción de muestra fue aproximadamente de 60

gramos, la cual se amasa con la mano hasta formar una especie de cilindro largo.

Al momento en que este comienza a fisurarse se coloca en la tara, se pesa y finalmente se coloca al horno para ser secado y luego pesado nuevamente.

De esta manera se siguieron los procedimientos y uso de materiales del ensayo “S0305. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90)”

Figura 3.10 Ensayo de limite plástico.



Fuente. Elaboración propia. Foto de laboratorio

Tabla 3.9 Resultados de limite liquido de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	Límite Líquido (LL)
	25,83
<b>M. Suelo San Pedro</b>	Límite Líquido (LL)
	35,47

Fuente. Elaboración propia

Tabla 3.10 Resultados de limite Plástico de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	Límite Plástico (LP)
	22,02
<b>M. Suelo San Pedro</b>	Límite Plástico (LP)
	24,08

Fuente. Elaboración propia

Tabla 3.11 Resultados de índice de plasticidad de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	Índice de plasticidad (IP)
	3,81
<b>M. Suelo San Pedro</b>	Índice de plasticidad (IP)
	11,39

Fuente. Elaboración propia

Tabla 3.12 Resultados de índice de grupo de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	Índice de grupo (IG)
	(6)
<b>M. Suelo San Pedro</b>	Índice de grupo (IG)
	(8)

Fuente. Elaboración propia

### **Análisis de resultados.**

Se puede hacer el análisis que en las 2 muestras tenemos el límite Líquido inferior a 50 que es el valor límite de las arcillas y limos de plasticidad elevada.

Se puede observar que el índice de plasticidad en el suelo de la carretera San Pedro es superior al 10% siendo el límite de acuerdo a la cantidad de arcillas que contienen nuestras muestras y el análisis del índice de grupo nos verifica que nuestra muestra se encasilla en suelos finos ya que suelos granulares tienen un máximo de 4 como índice de grupo.

Se puede observar que el índice de plasticidad en el suelo del barrio 2 de Mayo es inferior al 4% siendo el límite de acuerdo a la cantidad de limos y arenas que contienen nuestras muestras y el análisis del índice de grupo nos verifica que nuestra muestra se encasilla en suelos limo arenosos ya que suelos granulares tienen un máximo de 4 como índice de grupo.

También se puede observar que el límite líquido y el índice de plasticidad cumplen con las especificaciones mínimas mencionadas en la **tabla 2.1** del capítulo 2 para estabilizaciones con asfalto espumado:

Tabla 3.13 Comparación de resultados con tabla 2.1 en suelos 1 y 2.

Tabla 2.1		Calculado	
requisitos	Arena-asfalto	2 de Mayo	San Pedro
L. líquido	<40	25,83	35,47
I. de plasticidad	<12	3,81	11,39

Fuente. Elaboración propia

### 3.4.6 CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Para la clasificación del tipo de suelo de las 2 zonas en estudio, se siguió el mismo procedimiento para la determinación de la humedad, granulometría, plasticidad tabulando los datos y resultados en planillas Excel, (ver anexos N° 3) para el procedimiento y la metodología utilizada nos apoyamos en guía de laboratorio de suelos escrita (ver anexo N°1) se usaron las tablas y diagramas de clasificación de los métodos AASHTO y SUCS y se comprobaron resultados mediante el programa clasificación de suelos para la calculadora HP 50G “Clasificación de Suelos creado por el Ing. Omar Trujillo”.

Los resultados del análisis de las 2 muestras se tabularon en la siguiente tabla:

Tabla 3.14 Resumen de clasificación de los suelos 1 y 2.

<b>Clasificación Suelo San Pedro</b>		<b>Descripción</b>
<b>SUCS:</b>	CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad
<b>AASHTO:</b>	A-6 (8)	partículas finas arcillosas con contenido de limos
<b>Clasificación Suelo 2 de Mayo</b>		<b>Descripción</b>
<b>SUCS:</b>	ML	suelo limo arenoso de baja compresibilidad
<b>AASHTO:</b>	A-4 (6)	partículas finas limosas

Fuente. Elaboración propia

### **Análisis de resultados.**

Analizando los resultados obtenidos de clasificación se puede determinar que la muestra de suelo de la carretera san pedro es clasificado según AASHTO en A-6 correspondiente a un suelo arcilloso, y en la clasificación SUCS en CL que es un suelo arcilloso de plasticidad media; comparadas entre ambas se encuentran en el rango de lo más probable.

La muestra de suelo del barrio 2 de Mayo es clasificado según AASHTO en A-4 correspondiente a un suelo limoso, y en la clasificación SUCS en ML que es un suelo limo arenoso de baja compresibilidad; comparadas entre ambas se encuentran en el rango de lo más probable.

### **3.4.7 COMPACTACIÓN ESTÁNDAR**

Este ensayo se divide en 2 métodos que son: prueba Proctor modificado al igual que la Proctor estándar se utiliza para determinar el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptimo. Este ensayo se aplica solamente a suelos con menos del

30 % en peso de partículas retenidas en el tamiz de 19 mm.

Para conducir la prueba Proctor modificado, se utilizó el mismo molde con un volumen de 943.3 cm<sup>3</sup> (1/30 pie<sup>3</sup>), el suelo es compactado en cinco capas por un pisón que pesa 44.5 N ± 0.01 kg, la caída del pisón es 457.2 ± 1.6 mm, la cara de golpe del pisón tiene un diámetro de 50.8 ± 0.25 mm. El pisón debe ser reemplazado cuando el diámetro de la cara de golpe es desgastado o expandido en 12 mm.

El número de golpes del pisón para cada capa se conserva en 56. El pisón debe estar equipado con un tubo que le permita desplazarse en la caída con facilidad, el tubo debe tener al menos cuatro agujeros en cada extremo espaciados 90° entre sí, el diámetro mínimo de estos agujeros es de 9.5 mm

### **Preparación de muestras**

La muestra debe estar seca, suelta y disgregada, se debe conocer la granulometría del material, por que dependerá de ella la elección del método adecuado para la realización ya sea estándar o modificado.

De acuerdo al método elegido trabajar la compactación en capas de misma cantidad de material y a distintas humedades variables de 5%, -20% para nuestro caso.

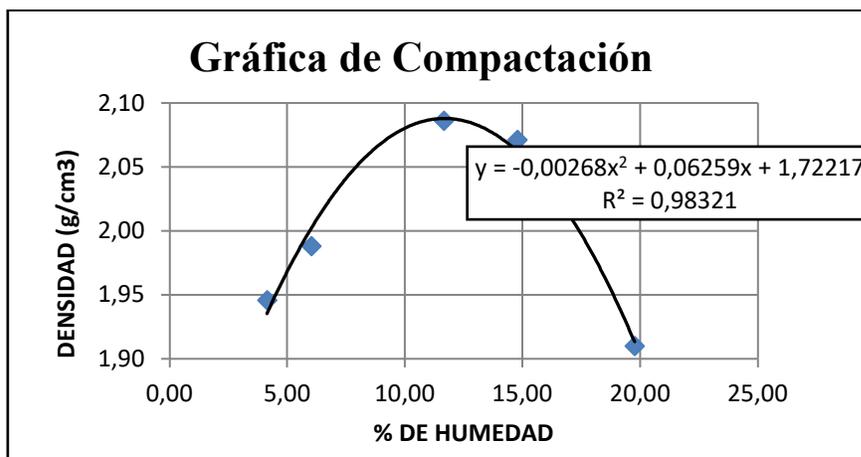
De esta manera se siguieron los procedimientos y uso de materiales del ensayo “S0402. Compactación estándar (ASTM D698 AASHTO T99)”

Tabla 3.15 Resultados de compactación promedio suelo 1.

<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	Densidad máxima(gr/cm <sup>3</sup> )
	2,09
	Humedad optima (%)
	11,68

Fuente. Elaboración propia

Grafica 3.5 Curva Proctor modificado T-99 suelo 1.



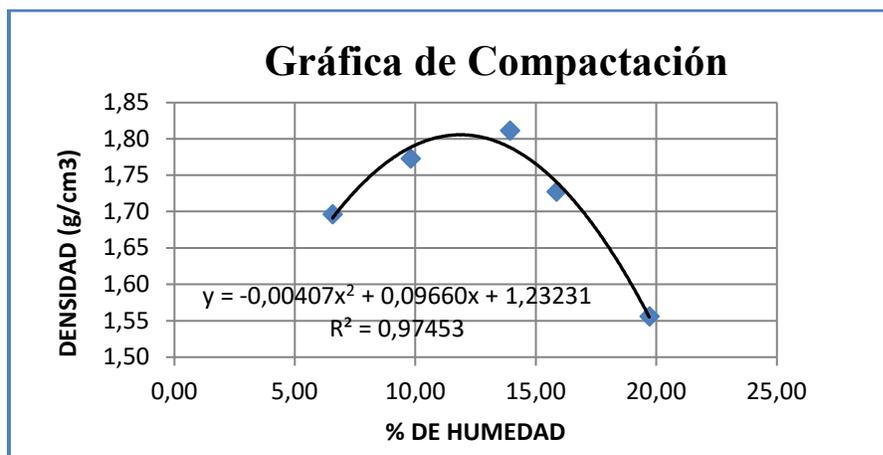
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.16 Resultados de compactación promedio suelo 2.

<b>M. Suelo San Pedro</b>	Densidad máxima(gr/cm <sup>3</sup> )
	1,81
	Humedad optima (%)
	11,87

Fuente. Elaboración propia

Grafica 3.6 Curva Proctor modificado T-99 suelo 2



Fuente. Elaboración propia.

### **Análisis de resultados.**

Los valores iniciales de la humedad y densidad servirán para hacer comparaciones, y evaluaciones a los suelos estabilizados con asfalto espumado.

Se observa en el suelo de San Pedro que es un suelo con una densidad seca baja y una elevada humedad óptima de compactación característico de suelos arcillosos.

Se observa en el suelo de 2 de Mayo que es un suelo con una densidad seca media y una humedad óptima de compactación Mayor a 10% característico de suelos limo arenosos.

### **3.4.8 ENSAYO DE C.B.R. (CALIFORNIA BEARING RATIO)**

La abreviación “CBR” corresponde al California Bearing Ratio, método de análisis de materiales desarrollado en el año de 1929 por la División de Carreteras de California, con el fin de darle una clasificación a la capacidad del suelo para ser utilizado como material de base o subbase. También denominado ensayo de relación de soporte, es el procedimiento por medio del cual mediante pruebas de laboratorio y bajo condiciones de humedad y densidad controlada se puede medir la resistencia al corte de un suelo en el estado en que este se encuentre en ese momento.

El método de CBR es normalmente utilizado para analizar materiales cuyo diámetro máximo de partículas es de  $\frac{3}{4}$ ", existiendo metodologías adicionales para los casos en los cuales no se cumpla con este tipo de granulometría, pero debido a que dichos métodos no forman parte del alcance de este manual, no se detallara sobre los mismos.

#### **Preparación de muestras**

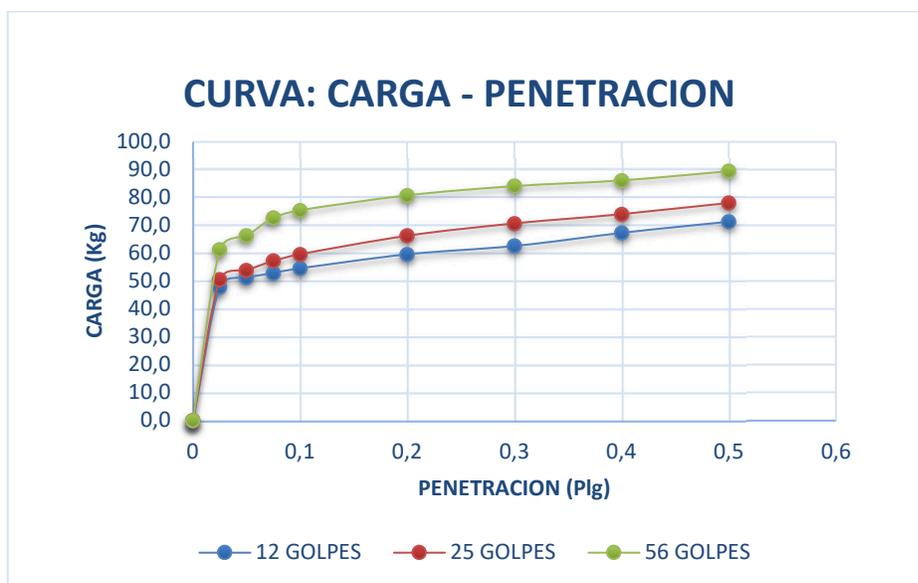
Como ya se mencionó la muestra a ensayar debe tener tamaños máximos de partículas de 19 mm. Se debe preparar una muestra de masa superior a 5,0 kg cuya humedad sea la determinada como óptima en el ensayo de compactación.

Joseph Bowles (1980) en su manual de procedimientos recomienda que, si se desea curar el suelo para obtener una distribución más uniforme de la humedad, se debe mezclar con el porcentaje necesario de humedad y almacenar en un recipiente sellado por espacio de 12 a 24 horas antes del ensayo.

Tomar una muestra representativa del material mezclado y humedecido, para determinar el porcentaje de humedad inicial.

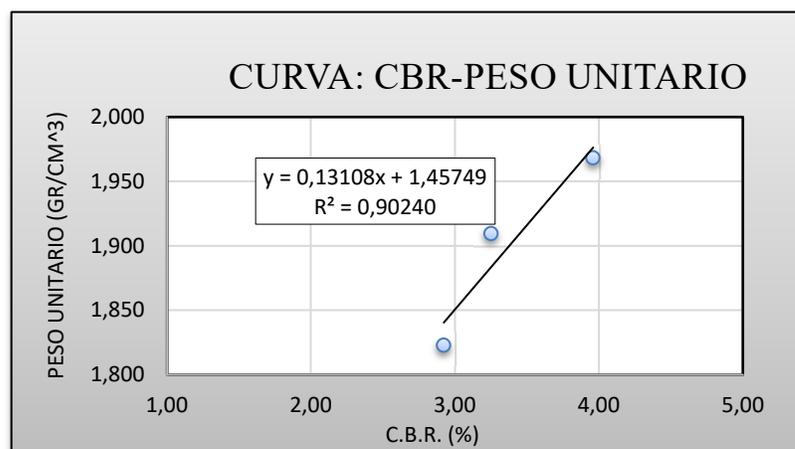
### C.B.R. MUESTRA 2 DE MAYO

Grafica 3.7 Curva carga-penetración (CBR 1) suelo 1



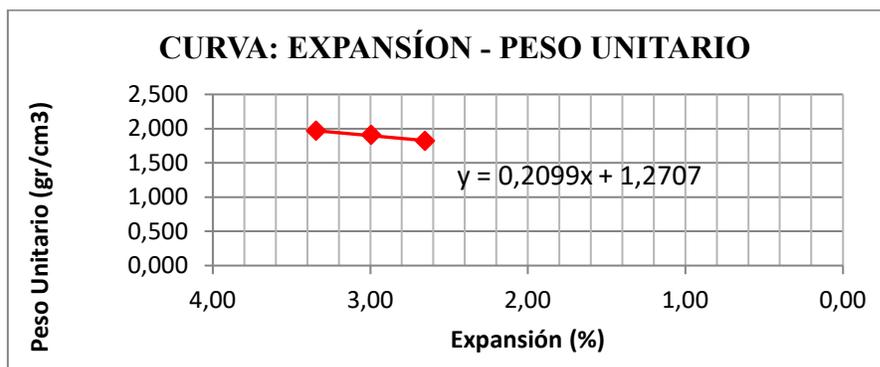
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.8 Curva CBR-peso unitario (CBR 1) suelo 1



Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.9 Curva Expansión-peso unitario (CBR 1) suelo 1



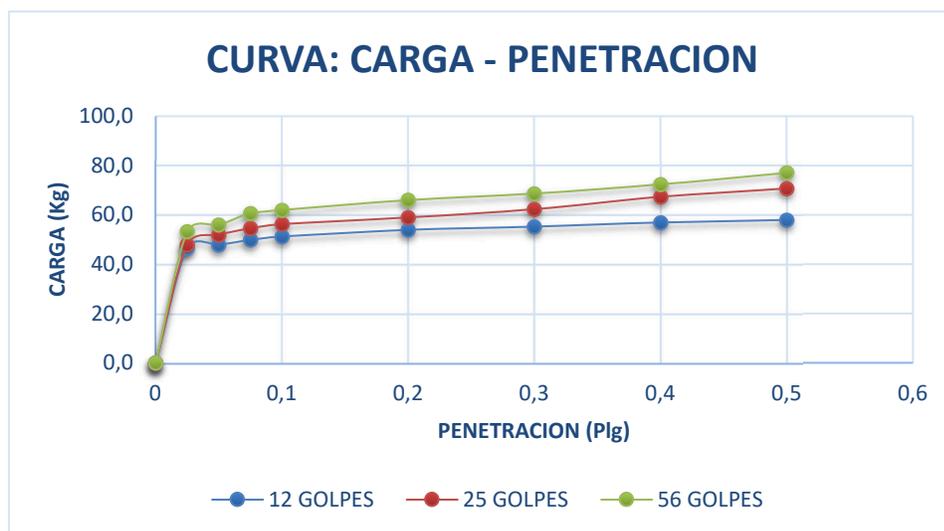
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.17 Resultados de ensayo CBR 1, suelo 1.

<b>M. Suelo 2 de Mayo (CBR 1)</b>	CBR 100% D. Max
	4,83
	CBR 95% D. Max
	4,03
	Expansión (%)
	3,90

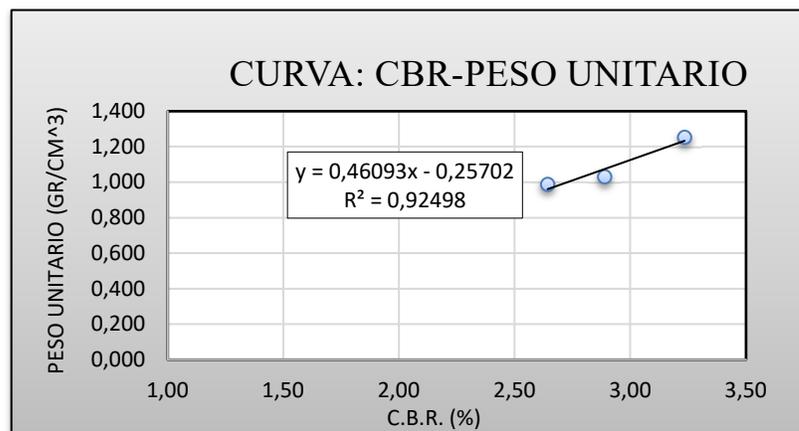
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.10 Curva carga-penetración (CBR 2) suelo 1



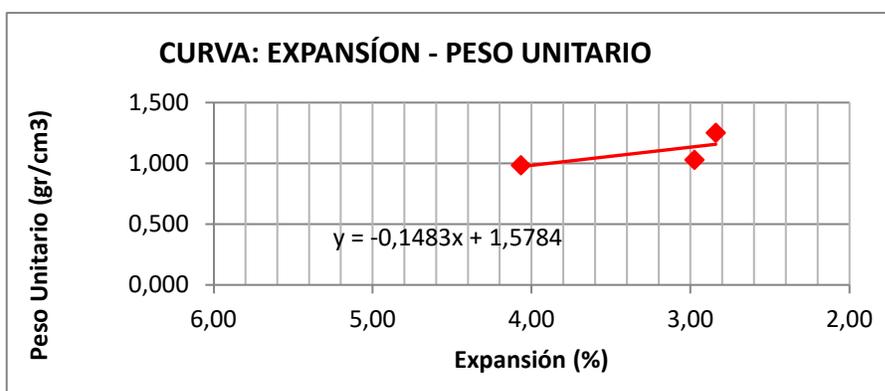
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.11 Curva CBR-peso unitario (CBR 2) suelo 1.



Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.12 Curva Expansión-peso unitario (CBR 2) suelo 1



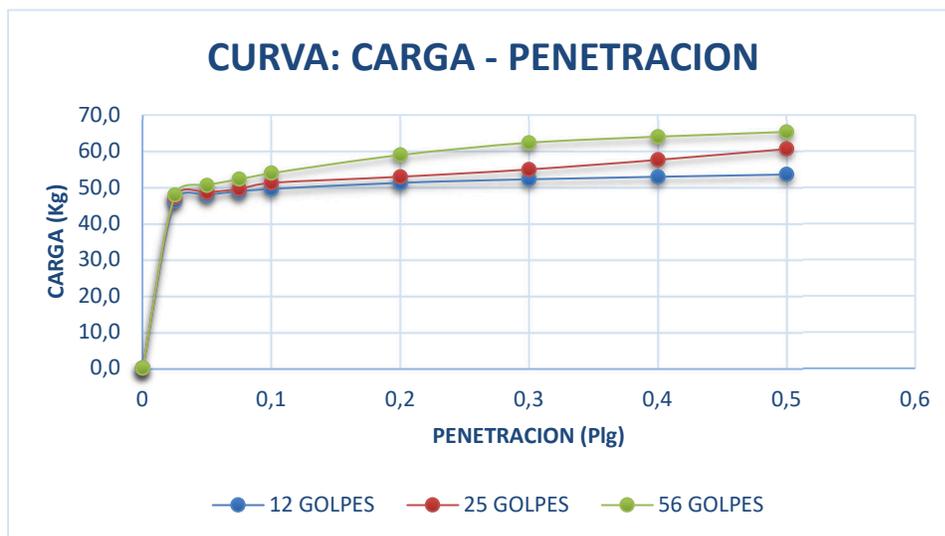
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.18 Resultados de ensayo CBR 2, suelo 1.

<b>M. Suelo 2 de Mayo (CBR 2)</b>	CBR 100% D. Max
	3,98
	CBR 95% D. Max
	3,75
	Expansión (%)
	3,46

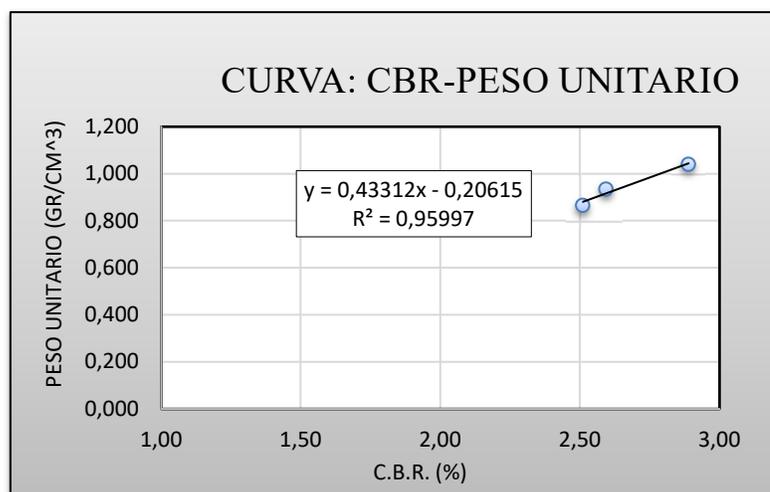
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.13 Curva carga-penetración (CBR 3) suelo 1.



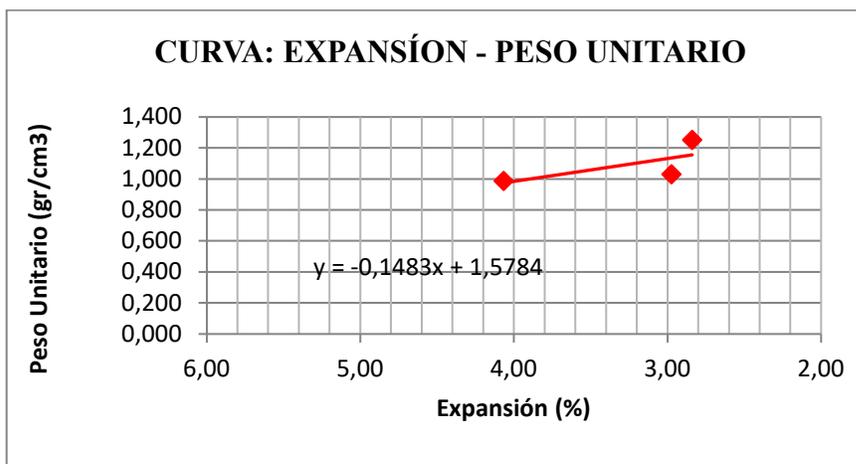
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.14 Curva CBR-peso unitario (CBR 3) suelo 1.



Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.15 Curva Expansión-peso unitario (CBR 3) suelo 1



Fuente. Elaboración propia.

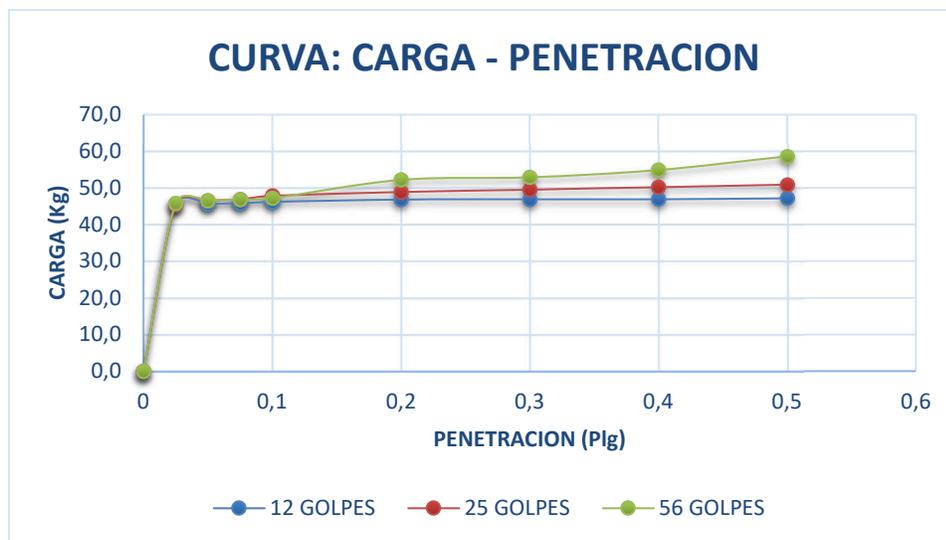
Tabla 3.19 Resultados de ensayo CBR 3 suelo 1.

<b>M. Suelo 2 de Mayo (CBR 3)</b>	CBR 100% D. Max
	4,35
	CBR 95% D. Max
	4,11
	Expansión (%)
	3,99

Fuente. Elaboración propia.

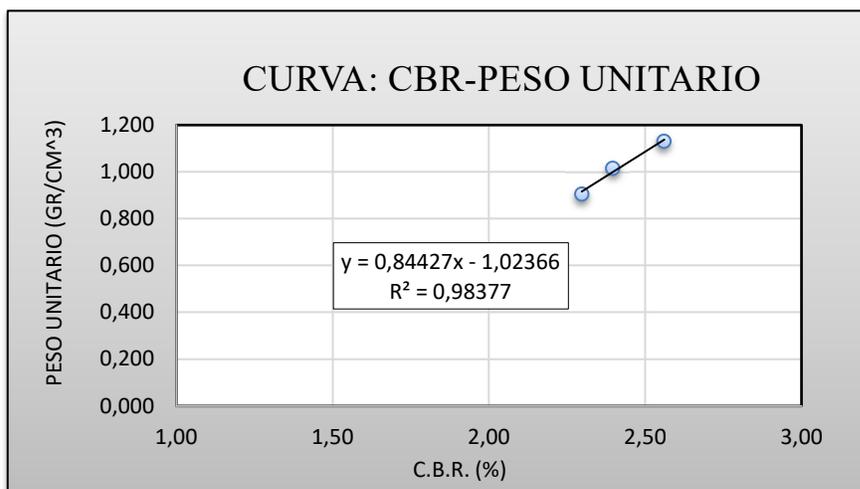
### C.B.R. MUESTRA 2 SAN PEDRO

Grafica 3.16 Curva carga-penetración (CBR 1) suelo2.



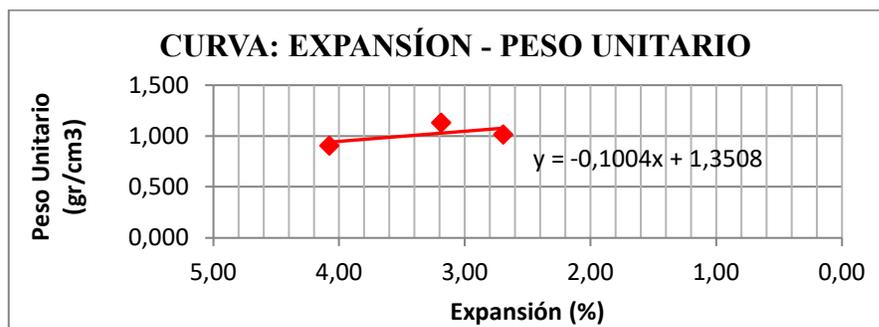
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.17 Curva CBR-peso unitario (CBR 1) suelo 2



Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.18 Curva Expansión-peso unitario (CBR 1) suelo 2.



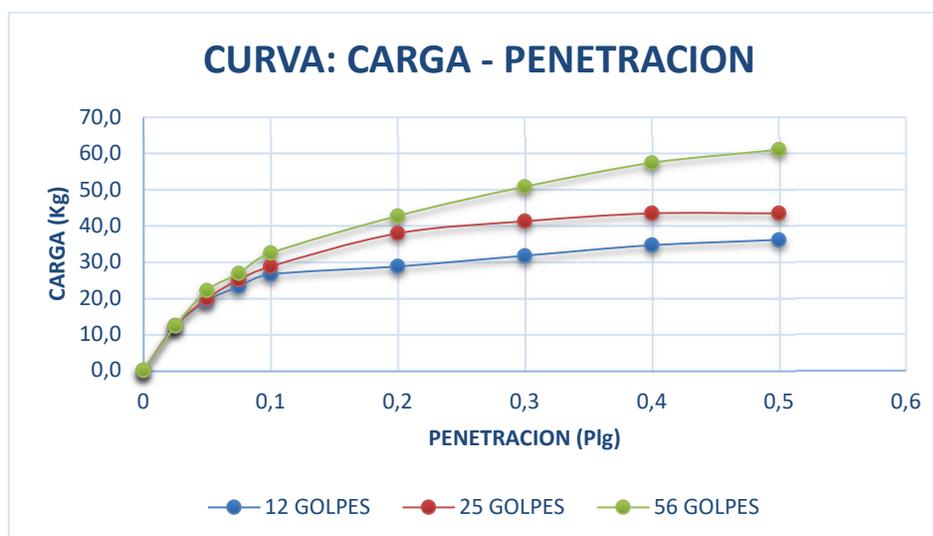
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.20 Resultados de ensayo CBR 1, suelo 2.

<b>M. Suelo San Pedro (CBR 1)</b>	CBR 100% D. Max
	3,309
	CBR 95% D. Max
	3,204
	Expansión (%)
	4,18

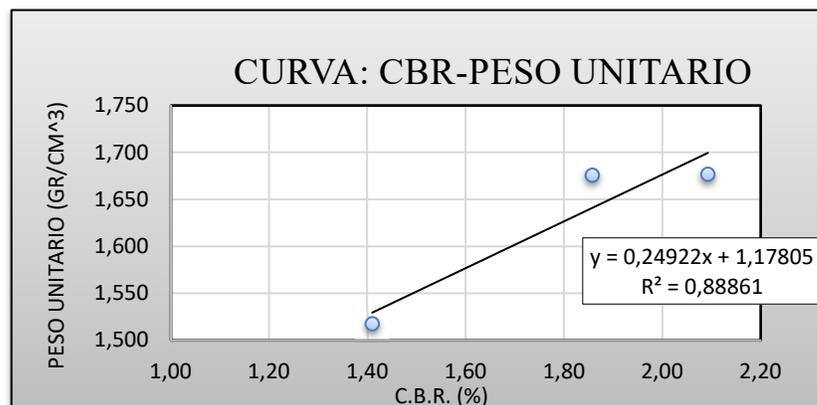
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.19 Curva carga-penetración (CBR 2) suelo2.



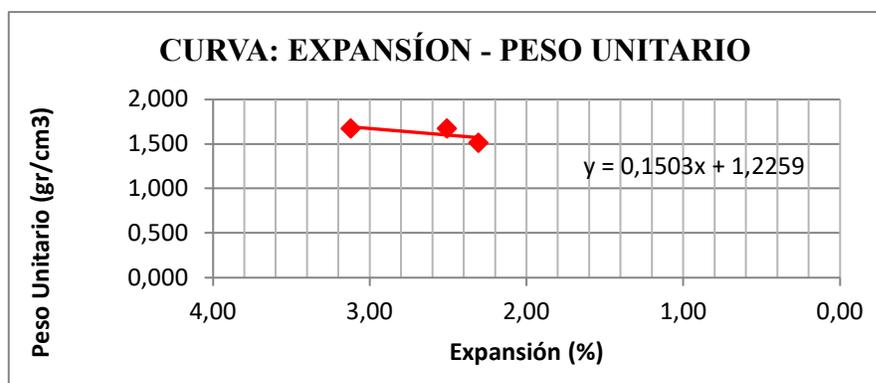
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.20 Curva CBR-peso unitario (CBR 2) suelo 2.



Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.21 Curva Expansión-peso unitario (CBR 2) suelo 2.



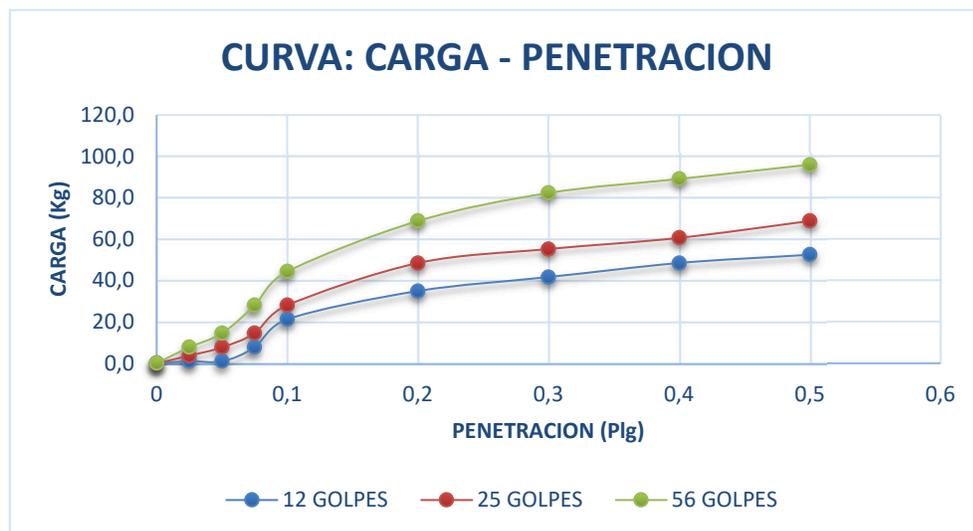
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.21 Resultados de ensayo CBR 2, suelo 2.

<b>M. Suelo San Pedro (CBR 2)</b>	CBR 100% D. Max
	2,38
	CBR 95% D. Max
	2,02
	Expansión (%)
	3,62

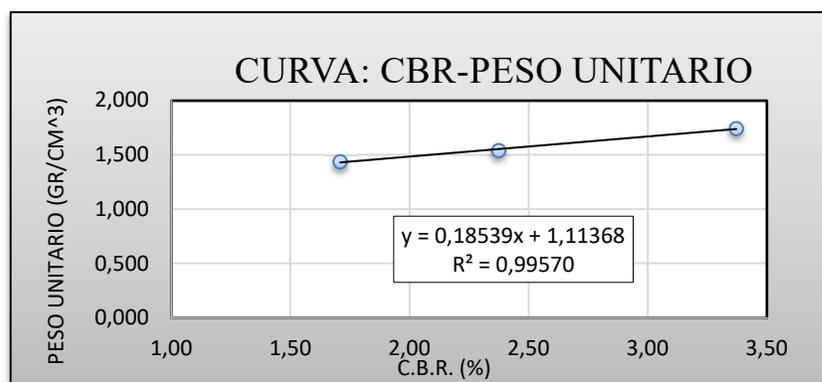
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.22 Curva carga-penetración (CBR 3) suelo2.



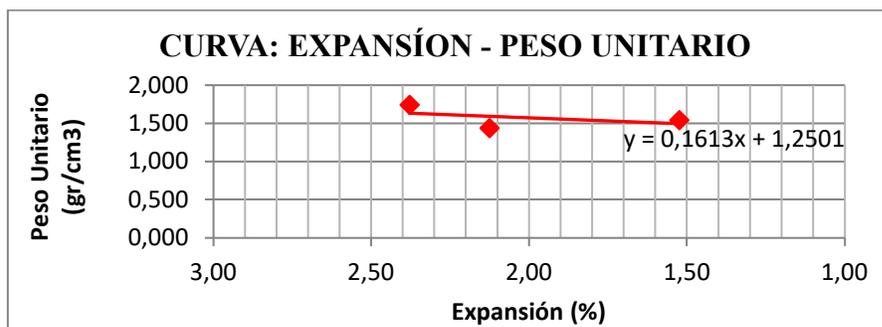
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.23 Curva CBR-peso unitario (CBR 3) suelo 2.



Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.24 Curva Expansión-peso unitario (CBR 3) suelo 2.



Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.22 Resultados de ensayo CBR 3, suelo 2.

<b>M. Suelo San Pedro (CBR 3)</b>	CBR 100% D. Max
	3,54
	CBR 95% D. Max
	3,06
	Expansión (%)
	3,22

Fuente. Elaboración propia.

**Análisis de resultados.**

Se realizó un promedio de los resultados de los 3 C.B.R. de cada muestra de suelo para posteriormente verificar las propiedades resistentes de los mismos estabilizados a diferentes porcentajes de asfalto espumado, teniendo los siguientes resultados:

Tabla 3.23 Resultados de ensayo CBR promedio suelo 1.

<b>M. Suelo 2 de Mayo (Resultados promedio)</b>	CBR 100% D. Max
	4,39
	CBR 95% D. Max
	3,96
	Expansión (%)
	3,78

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.24 Resultados de ensayo CBR promedio suelo 2.

<b>M. Suelo San Pedro</b> <b>(Resultados promedio)</b>	CBR 100% D. Max
	3,08
	CBR 95% D. Max
	2,76
	Expansión (%)
	3,67

Fuente. Elaboración propia.

Realizando una comparación de los resultados con los datos de la **tabla 2.3** del capítulo 2 tenemos los siguientes análisis:

Tabla 3.25 Resultados de ensayo CBR promedio suelo 2.

Tabla 2.3			Calculado	
valor CBR	clasificación general	usos	2 de Mayo	San Pedro
0 a 3	muy pobre	sub rasante	3,96	2,76
3 a 7	pobre a regular	sub rasante		

Fuente. Elaboración propia.

Se puede observar que el material que conforma el suelo natural de ambas zonas en estudio es un material expansivo y de bajo valor de soporte, se puede decir que son suelos que necesitan ser mejorados ya que según especificaciones para la conformación de sub rasantes, la expansión deberá ser menor a 3% y el CBR Mayor a 4% (manual de especificaciones técnicas del asfalto espumado-CSIR Transportek, 1999).

### 3.4.9 ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

Tiene por finalidad determinar la resistencia a la compresión no confinada ( $q_u$ ), de un cilindro de suelo cohesivo o semicohesivo, e indirectamente la resistencia al corte ( $q_c$ ), según la siguiente expresión:

$$q_c = \frac{q_u}{2}$$

Donde:

$q_c$  = resistencia al corte en (Kg. /cm<sup>2</sup>)

$q_u$  = resistencia a la compresión no confinada en (Kg. /cm<sup>2</sup>)

Este cálculo se basa en el hecho que el esfuerzo principal menor es cero (ya que al suelo lo rodea solo la presión atmosférica) y que el ángulo de fricción interno ( $\phi$ ) del suelo se supone cero.

Debido a numerosos estudios, se ha hecho evidente que este ensayo generalmente no proporciona un valor bastante confiable de la resistencia al corte de un suelo cohesivo, debido a la pérdida de la restricción lateral provista por la masa del suelo, las condiciones internas del suelo como el grado de saturación o la presión de poros que no puede controlarse y la fricción de los extremos producidos por las placas de apoyo. Sin embargo, si los resultados se interpretan adecuadamente, estos serán razonablemente confiables.

### **Preparación de muestras**

El ensayo de la compresión simple es un caso especial del ensayo triaxial, en el cual solamente se aplica a la probeta tensión longitudinal. Ya que no es necesario el dispositivo para aplicar la presión lateral y además la muestra no necesita estar envuelta en una membrana de caucho. El aparato es tan solo útil para ensayos rápidos sobre suelos arcillosos que están saturados o casi saturados. Se podrá realizar de dos maneras, mediante un control de deformación, o bien mediante un control de esfuerzos. El primero es ampliamente utilizado, controlando la velocidad de avance de la plataforma del equipo. El segundo, requiere ir realizando incrementos de carga, lo que puede causar errores en las deformaciones unitarias al producirse una carga adicional de impacto al aumentar la carga.

Grafica 3.25 Esfuerzo vs Deformación suelo San Pedro



Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.26 Esfuerzo vs Deformación suelo 2 de Mayo



Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.26 Resultados de resistencia a compresión suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 2 de Mayo</b>	(qu) Kg/cm <sup>2</sup>
	9,499
<b>M. Suelo San Pedro</b>	(qu) Kg/cm <sup>2</sup>
	8,304

Fuente. Elaboración propia

### Análisis de resultados.

Realizando una comparación de los resultados con los datos de la **tabla 2.4** del capítulo 2 tenemos los siguientes análisis:

Tabla 3.27 Resultados de resistencia a compresión suelos 1 y 2.

Tabla 2.4		Calculado	
Valor qu	clasificación general	2 de Mayo	San Pedro
>4	dura	9,499	8,304

Fuente. Elaboración propia

Como Podemos observar ambos suelos tienen una consistencia dura siendo el suelo más granular (2 de Mayo) el de mayor resistencia al corte, esto debido a que presenta partículas de mayor tamaño y por tanto un Mayor drenaje y menor cantidad de poros.

## 3.5 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO

Por condiciones de disponibilidad con los equipos necesarios para realizar los ensayos de caracterización del cemento asfáltico, se realizaron los ensayos de: Viscosidad Saybolt Furol, Punto de Inflamación, Punto de ablandamiento, Penetración, Ductilidad y Peso Específico en instalaciones del Laboratorio de Suelos y Asfaltos de la UAJMS.

### 3.5.1 ENSAYO DE VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

Para la realización del ensayo de viscosidad se realizó el siguiente procedimiento:

Se obtuvo un valor estable de temperatura para el baño, de 140 °C.

Paralelamente, se calentó el cemento asfáltico, sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento prematuro, a una temperatura entre 80 y 100 °C, de manera que una vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135°C), el calentado previo no debe exceder los 1.7 °C (3°F) por encima de la temperatura de ensayo.

Se agitó la muestra y posteriormente filtró con un tamiz #100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto.

Se insertó un tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.

Se vertió el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel quede por encima del borde de reboce, es decir, que rebalse un poco de asfalto por encima del vaso que lo contiene.

Se agitó la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, empleando un movimiento circular y cuidando de no votar el asfalto fuera del vaso; Cuando la temperatura de la mezcla permaneció constante a la temperatura del ensayo ( $\pm 0.05$  °C) durante un minuto de agitación, se retiró el termómetro.

Se verificó que el matraz se encontraba en la posición adecuada; se retiró el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en el mismo instante se puso a funcionar el cronómetro.

Se detuvo en el instante en que el fondo del menisco del cemento alcanzó la marca de graduación de 60 ml. del frasco receptor.

Se anotó el tiempo del flujo en segundos.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.28 Resultados de ensayo de viscosidad.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Prom.	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt 135 °C AASHTO T-72	Seg.	130,0	132,0	131,0	85	-----

Fuente. Elaboración propia.

### **Análisis de resultados.**

La viscosidad obtenida es de 131 valor que cumple con la especificación mínima de 85.

También cumple los requisitos mínimos de la **tabla 2.7** del capítulo 2

### **3.5.2 ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN**

Para la realización de este ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

Se preparó el equipo, colocándolo sobre un mesón firme y a nivel, se cerraron momentáneamente las ventanas y se apagó el ventilador para eliminar corrientes de aire.

Se lavó la copa de ensayo con gasolina para remover cualquier aceite o residuo de asfalto de un ensayo anterior.

Se colocó el termómetro en posición vertical, cuidando de que el extremo inferior esté a 6,4 mm (1/4") del fondo de la copa y localizado en un punto medio entre el centro y la pared de la misma.

Se llenó la copa con el cemento asfáltico, cuidando que la temperatura no

excediera de 100 °C, precisamente a la temperatura necesaria para que el asfalto pueda verterse.

Se colocó la copa en posición, cuidando el espacio entre el extremo inferior del termómetro y el fondo de la copa.

Se encendió la llama del mechero, aplicando calor inicialmente de manera que la tasa de incremento de temperatura de la muestra sea de 14 a 17°C por minuto, cuando la temperatura se aproximó a los 160°C se disminuyó el calor de manera que el incremento se redujo a un rango constante entre 5 a 6°C por minuto.

Cuando la temperatura se aproximó a los 210°C, se aplicó la llama, una vez por cada aumento de 2°C, en un tiempo de aproximadamente 1 segundo.

Cuando la temperatura se aproximó a los 230°C, se tuvo la precaución de no aproximarse bruscamente, puesto que cualquier movimiento de aire, dispersa los gases que se acumulan en la parte superior.

Se registró como punto de inflamación, la lectura de temperatura del termómetro cuando apareció una llama sobre la superficie de la copa producto de la combustión de los gases emitidos por el calentamiento del asfalto.

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 3.29 Resultados de ensayo de punto de inflamación.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Prom.	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
<b>Punto de inflamación</b>	Seg.	256	258	257	232	-----

Fuente. Elaboración propia.

**Análisis de resultados.**

El punto de inflamación obtenido es de 257 valor que cumple con la especificación mínima de 232.

También cumple los requisitos mínimos de la **tabla 2.7** del capítulo 2.

**3.5.3 ENSAYO DE PENETRACIÓN**

El ensayo de penetración se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

Se calentó el asfalto homogéneamente para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar la fluidez del material para verterlo en los moldes.

Se cuidó que la temperatura de calentamiento previo no exceda en 100 °C al punto de ablandamiento, también con el objeto que, colocado el asfalto en los moldes, el tiempo que demore hasta enfriarse a una temperatura estable no sea demasiado.

Se llenaron los moldes, teniendo cuidado de que la profundidad de llenado sea por lo menos 10 mm Mayor al rango de penetración esperada, y se prepararon dos moldes con las mismas dimensiones y características de la misma muestra.

Se dejaron enfriar a temperatura ambiente hasta alcanzar entre 20 y 30 °C durante un periodo aproximado de 2 horas, cubiertos para protegerlos del polvo.

Se puso los moldes en un baño de agua a una temperatura de 25 °C manteniendo esta temperatura constante durante un periodo de tiempo similar al anterior.

Se montó el equipo de penetración y se comprobó que el vástago que soporta la aguja esté completamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre la guía, a su vez se limpió con gasolina la aguja de penetración y se secó con un trozo de papel higiénico, se la fijó firmemente en su soporte.

La penetración se realizó en un baño pequeño auxiliar, en el que se colocó la muestra de asfalto, completamente sumergido, hasta un nivel de 3 mm sobre la

cara superior del asfalto.

Una vez montado todo el equipo para la realización del ensayo, se aproximó la aguja del penetrómetro hasta que la punta tocó la superficie de la muestra.

Se verificó que el penetrómetro se encuentre en cero, la aguja no penetre nada aún y se soltó la misma, iniciando en el mismo instante el cronometro para medir un tiempo de 5 segundos.

Finalmente, se lecturo y anotó la distancia expresada en decimas de milímetro.

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 3.30 Resultados de ensayo de penetración.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones		
					Mínimo	Máximo	
Penetración a 25 °C, 100g,5 seg. AASHTO T49	Lect. 1	Mm	90	90	90	-----	-----
	Lect. 2	Mm	89	93	91	-----	-----
	Lect. 3	Mm	89	90	90	-----	-----
	Prom.	Mm			90,2	85	100

Fuente. Elaboración propia.

#### **Análisis de resultados.**

El grado de penetración obtenido es de 90,2 valor que cumple con la especificación mínima de 85 y la máxima de 100, verificando así que pertenece al asfalto de tipo 85/100.

También cumple los requisitos mínimos de la **tabla 2.7** del capítulo 2

#### **3.5.4 ENSAYO DE DUCTILIDAD**

El ensayo de ductilidad se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

Se hizo calentar el cemento asfáltico hasta un punto que este manejable.

Se preparó las probetas para colocar el asfalto limpiándolas.

Se recubrió las probetas con una vaselina y maicena para evitar que el cemento se prenda en las paredes.

Se llenó los moldes con mucho cuidado sin hacer rebalsar y evitando burbujas.

Se dejó enfriar las probetas a temperatura ambiente durante 30 min. y a continuación se introdujo los moldes ya preparados en el baño de agua a temperatura de 25°C durante 90 min.

Se quita los moldes y se deja al descubierto las probetas y se da inicio al ensayo. El material asfáltico es estirado por las pinzas hasta formar un hilo produciendo la ruptura.

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 3.31 Resultados de ensayo de ductilidad.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom.	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	130	127	129	129	≥100	-----

Fuente. Elaboración propia.

#### **Análisis de resultados.**

La ductilidad a 25°C obtenida es de 129 valor que cumple con la especificación mínima de 100.

También cumple los requisitos mínimos de la **tabla 2.7** del capítulo 2

### 3.5.5 ENSAYO DE PESO ESPECÍFIO

El ensayo de peso específico se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

Se limpia perfectamente el picnómetro y su tapón con el líquido de limpieza, enjuagándolo a continuación con agua destilada y secándolo finalmente.

Esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración, o bien cuando se observe cualquier falla en el escurrimiento uniforme de los líquidos, en las paredes interiores del picnómetro o en el capilar del tapón.

Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa el picnómetro vacío.

Se seca el vaso del baño y se llena el picnómetro con agua destilada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo.

Se sumerge completamente el picnómetro en el vaso y se aprieta entonces el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el picnómetro en esta operación.

El vaso con el picnómetro se vuelve a colocar en el baño de agua a 25 °C, se deja el picnómetro en el interior del vaso por un mínimo de 30 minutos, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie superior del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma; a continuación, se seca rápidamente el resto del picnómetro y se pesa con aproximación de 0.1 mg. el picnómetro lleno de agua.

Para la preparación de la muestra se debe calentar con cuidado la misma, agitándola para evitar sobrecalentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que pueda ser vertida.

Verter una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad.

Tomar precaución para evitar que el material se ponga en contacto con las paredes del picnómetro por encima del nivel final y para evitar la inclusión de burbujas de aire.

Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente durante un período no menor de 40 minutos y pesar junto con el tapón con aproximación a 1 mg.

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro, no deben permitirse burbujas de aire en el picnómetro.

Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retornar luego el vaso al baño de agua a 25° C.

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 3.32 Resultados de ensayo de peso específico.

ENSAYO	UNIDAD	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Peso Picnómetro	grs.	62,02	62,02	
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	142,75	142,75	
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	125,72	122,55	
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	143,9	143,96	
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	1,015	1,017	1,016

Fuente. Elaboración propia.

### **Análisis de resultados.**

El peso específico promedio obtenido del asfalto es de 1,016 gr/cm<sup>3</sup>, este valor no tiene un rango mínimo ni tampoco un máximo para comparar.

### 3.6 RELACIÓN DE EXPANSIÓN Y VIDA MEDIA

Para definir la cantidad necesaria de agua a inyectar en el asfalto para generar una óptima expansión y duración de la espuma, es que se siguió el procedimiento que se detalla a continuación:

Se estableció un volumen inicial de asfalto de  $50\text{cm}^3$ .

Se calculó el peso de ese volumen de asfalto.

Se calculó la cantidad de agua en ml a ser inyectada a la muestra de asfalto, con variaciones entre 2 y 4%, con incrementos de 0.5%.

Para la elaboración del ensayo se escogieron temperaturas de 140, 150, 160, 170°C.

Se calentó una muestra de asfalto a la temperatura más baja, a la que se inyectó el primer porcentaje de agua en ml, se registró el máximo volumen de expansión y el tiempo de duración de la espuma de asfalto

Posteriormente con una nueva muestra de asfalto, se repitió el procedimiento, a la misma temperatura, pero se inyectó otro porcentaje de agua.

El mismo procedimiento se repitió para las 4 temperaturas escogidas para la realización del ensayo.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

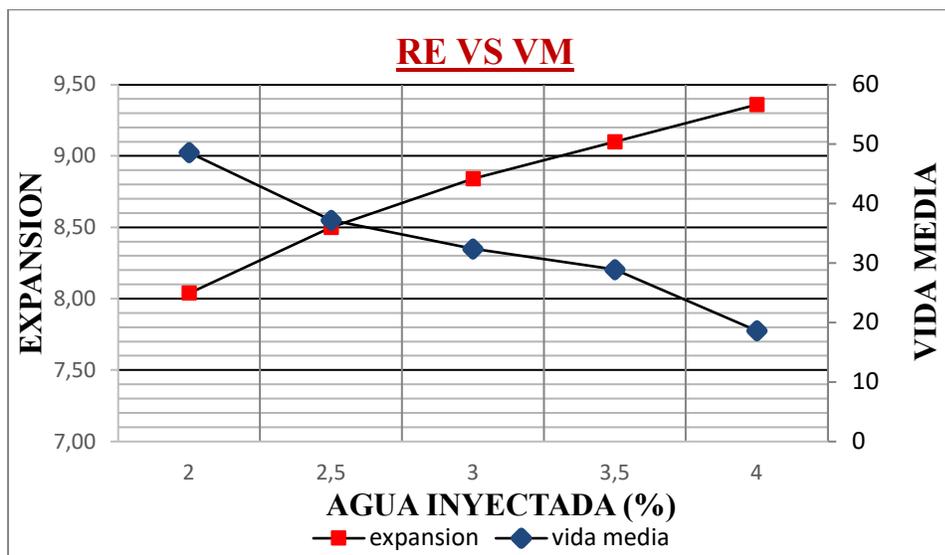
### 1er Ensayo – 140°C - RE vs VM

Tabla 3.33 Resultados de ensayo de RE y VM a 140°C.

<b>Temperatura (°C)</b>	140					
<b>Peso del asfalto (g)</b>	51					
<b>Vol. inicial de asfalto (cm<sup>3</sup>)</b>	50					
<b>% Agua</b>	2	2,5	3	3,5	4	
<b>Vol. Agua (ml)</b>	1,020	1,275	1,530	1,785	2,04	<b>Especific.</b>
<b>VIDA MEDIA</b>	48,6	37,2	32,4	28,9	18,6	>15
<b>Vol. final de asfalto (cm<sup>3</sup>)</b>	402	425	442	455	468	
<b>Relación Expansión</b>	8,04	8,50	8,84	9,10	9,36	12-20

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.27 Curva Expansión -Vida media – 140 °C



Fuente. Elaboración propia.

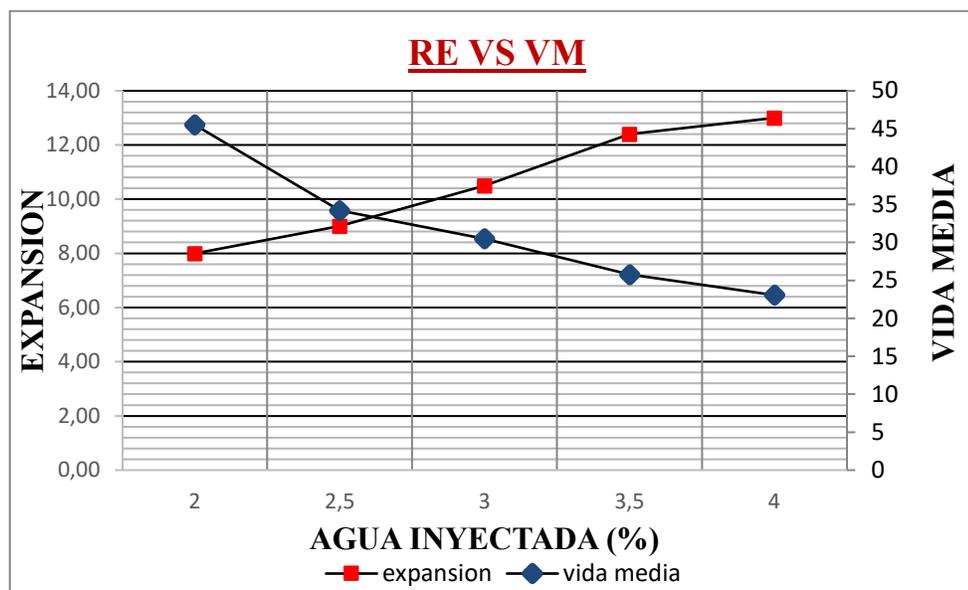
## 2do Ensayo – 150°C - RE vs VM

Tabla 3.34 Resultados de ensayo de RE y VM a 150°C.

<b>Temperatura (°C)</b>	150					
<b>Peso del asfalto (g)</b>	51					
<b>Vol. inicial de asfalto (cm<sup>3</sup>)</b>	50					
<b>% Agua</b>	2	2,5	3	3,5	4	
<b>Vol. Agua (ml)</b>	1,020	1,275	1,530	1,785	2,04	<b>Especific.</b>
<b>VIDA MEDIA</b>	45.5	34,21	30,5	25.78	23.09	>15
<b>Vol. final de asfalto (cm<sup>3</sup>)</b>	400	450	525	620	650	
<b>Relación Expansión</b>	8,0	9,0	10,50	12,40	13,0	12-20

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.28 Curva Expansión -Vida media – 150 °C



Fuente. Elaboración propia.

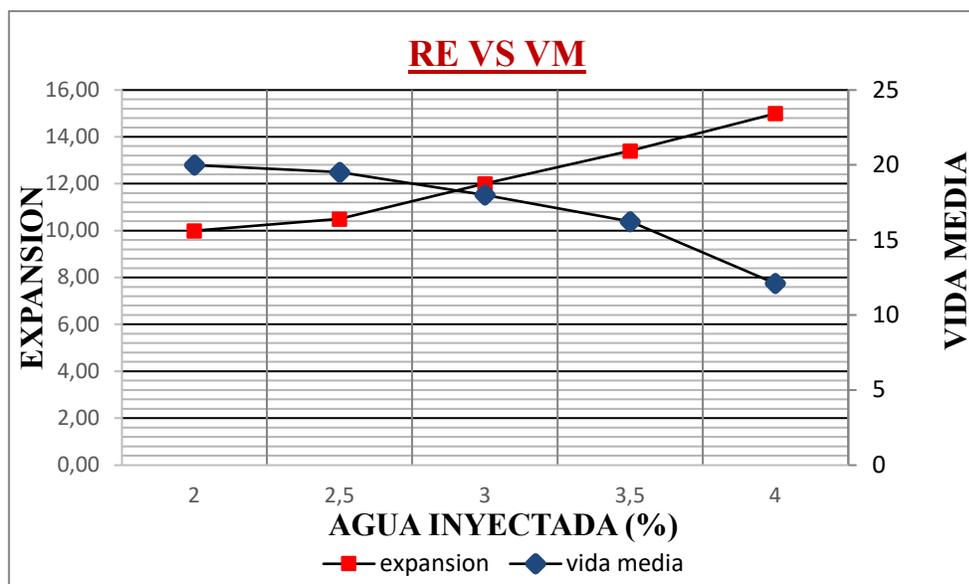
### 3er Ensayo – 160°C - RE vs VM

Tabla 3.35 Resultados de ensayo de RE y VM a 160°C.

<b>Temperatura (°C)</b>	160					
<b>Peso del asfalto (g)</b>	51					
<b>Vol. inicial de asfalto (cm<sup>3</sup>)</b>	50					
<b>% Agua</b>	2	2,5	3	3,5	4	
<b>Vol. Agua (ml)</b>	1,020	1,275	1,530	1,785	2,04	<b>Especific.</b>
<b>VIDA MEDIA</b>	20	19,52	18	16.23	12.1	>15
<b>Vol. final de asfalto (cm<sup>3</sup>)</b>	500	525	600	670	750	
<b>Relación Expansión</b>	10,0	10,50	12,00	13,40	15,0	12-20

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.29 Curva Expansión -Vida media – 160 °C



Fuente. Elaboración propia.

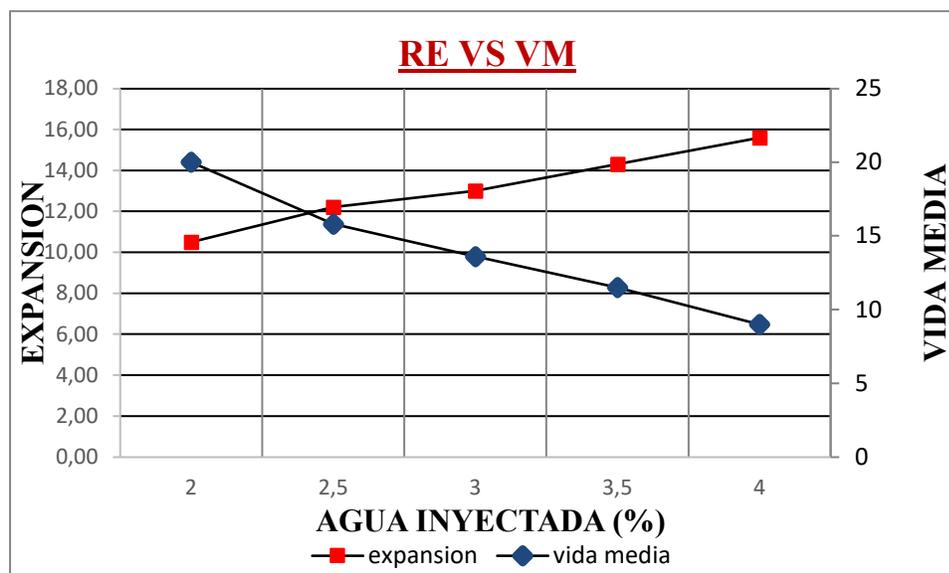
#### 4to Ensayo – 170°C - RE vs VM

Tabla 3.36 Resultados de ensayo de RE y VM a 170°C.

<b>Temperatura (°C)</b>	170					
<b>Peso del asfalto (g)</b>	51					
<b>Vol. inicial de asfalto (cm<sup>3</sup>)</b>	50					
<b>% Agua</b>	2	2,5	3	3,5	4	
<b>Vol. Agua (ml)</b>	1,020	1,275	1,530	1,785	2,04	<b>Especific.</b>
<b>VIDA MEDIA</b>	20	15,8	13,6	11,5	9,0	>15
<b>Vol. final de asfalto (cm<sup>3</sup>)</b>	525	610	650	715	780	
<b>Relación Expansión</b>	10,5	12,20	13,00	14,30	15,60	12-20

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.30 Curva Expansión -Vida media – 170 °C



Fuente. Elaboración propia.

### **Análisis de resultados.**

La temperatura elegida para realizar el espumado de asfalto para todos los ensayos es de 150°C, esto debido a que en estas condiciones cumple con las especificaciones mínimas de vida media Y de relación de expansión teniendo los siguientes resultados como los más favorables de las 4 pruebas que se realizó:

Vida media = **25,78s** > 15s, este es valor más alto de los 4 ensayos que es el tiempo que dura el espumado del asfalto.

Relación de expansión =  $12 \leq \mathbf{12,40} \leq 20$ , este valor indica el número de veces que el asfalto multiplicó su volumen inicial.

El criterio de selección está basado en el resultado que arroje el valor más alto de vida media de la espuma asfáltica; es por eso que se eligió esta temperatura, mas no así las demás.

El porcentaje de inyección de agua al asfalto para todos los ensayos será de **3,5%**.

### **3.7 ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO ESPUMADO**

Para la realización de la estabilización Suelo-Asfalto espumado se utilizan diferentes porcentajes de estabilizante, de acuerdo al porcentaje óptimo de la **tabla 2.7** del capítulo 2, Se evaluarán las características técnicas del porcentaje de estabilizante adecuado mediante los ensayos de Compactación Proctor Modificado T-180 y CBR analizando como la variación del porcentaje logra mejorar las propiedades mecánicas de la muestra.

### 3.7.1 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD OPTIMA Y LA MÁXIMA DENSIDAD UTILIZANDO DIFERENTES PORCENTAJES DE ASFALTO ESPUMADO COMO ESTABILIZANTE

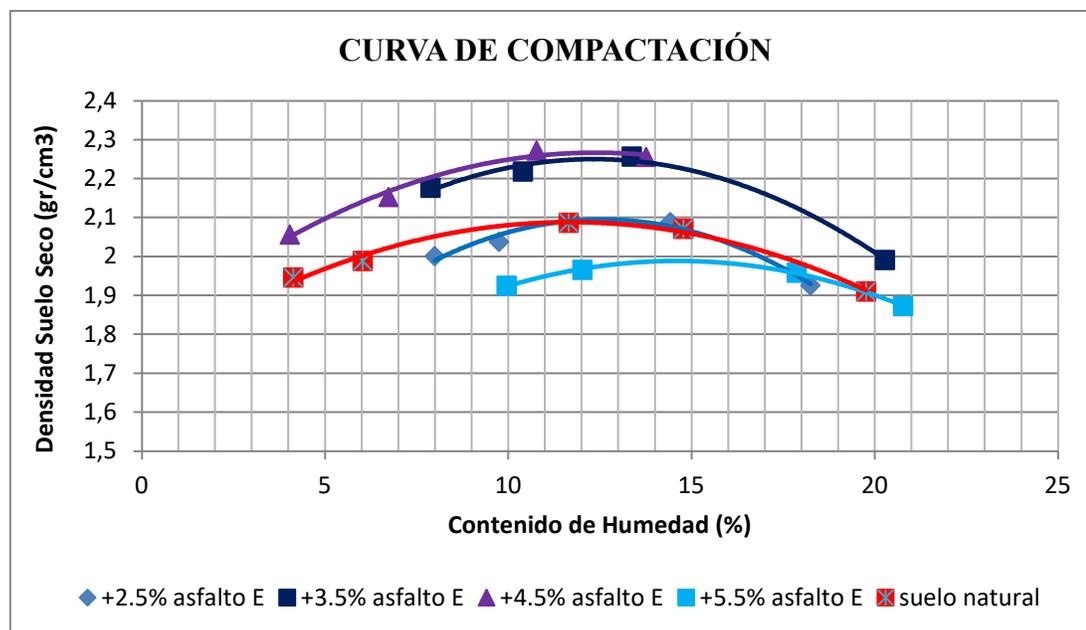
#### Muestra de suelo de 2 de Mayo

Tabla 3.37 Humedad optima y máxima densidad alcanzada a diferentes porcentajes de suelo 1 – asfalto E.

Muestra suelo +	suelo natural	2,5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4,5% Asfalto E.	5,5% Asfalto E.
Humedad optima (%)	11,68	12,70	12,50	12,67	14,67
Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2,09	2,10	2,25	2,27	1,99

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.31 Curvas de compactación para la mezcla suelo 1 - Asfalto E. a diferentes porcentajes de estabilizante.



Fuente. Elaboración propia.

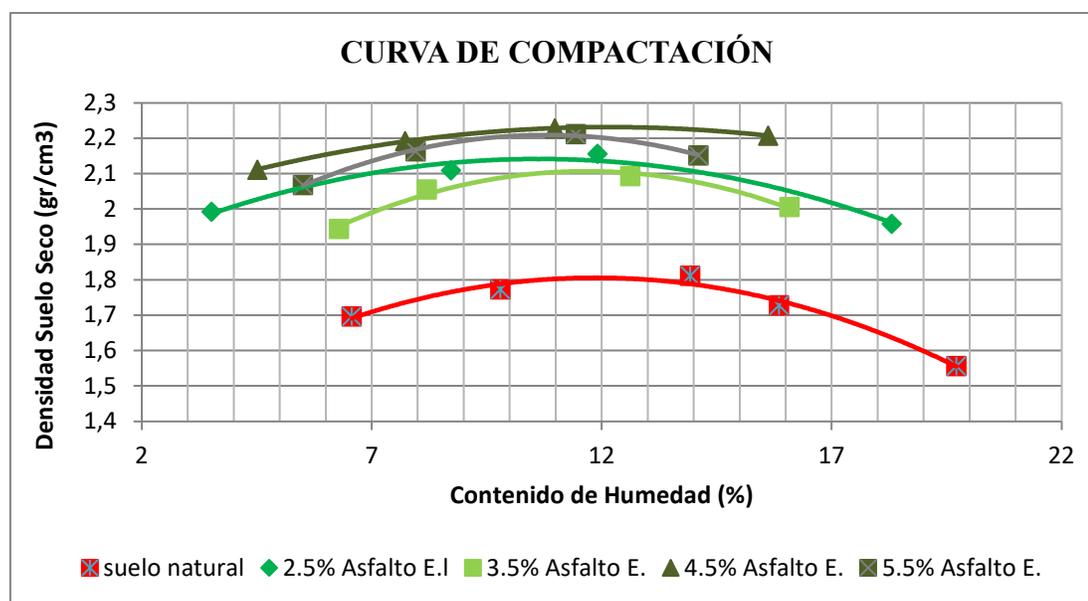
### Muestra de suelo de San Pedro

Tabla 3.38 Humedad óptima y máxima densidad alcanzada a diferentes porcentajes de suelo 2 – asfalto E.

Muestra suelo +	suelo natural	2,5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4,5% Asfalto E.	5,5% Asfalto E.
Humedad óptima (%)	11,87	10,67	12,50	12,25	11,00
Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1,81	2,14	2,16	2,23	2,22

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.32 Curvas de compactación para la mezcla suelo 2 -Asfalto E. a diferentes porcentajes de estabilizante.



Fuente. Elaboración propia.

### Análisis de resultados.

Se puede verificar que los valores asumidos de estabilizante para nuestros 2 tipos de suelo (según la tabla 2.8 ver capítulo II) son el valor óptimo y cercanos a este, y los resultados lo verifican, también se observa que al contenido de 4,5% de asfalto espumado, se tiene

una máxima densidad seca y en contenidos de 5,5% o Mayores a estos la máxima densidad seca alcanzada vuelve a bajar. El porcentaje óptimo de humedad tiende a subir a Mayor contenido de asfalto espumado ya que este mismo tiene más contenido de agua inyectado.

### 3.7.2 DETERMINACIÓN DEL C.B.R. Y EXPANSIÓN DEL SUELO ESTABILIZADO A DIFERENTES PORCENTAJES DE ASFALTO ESPUMADO COMO ESTABILIZANTE.

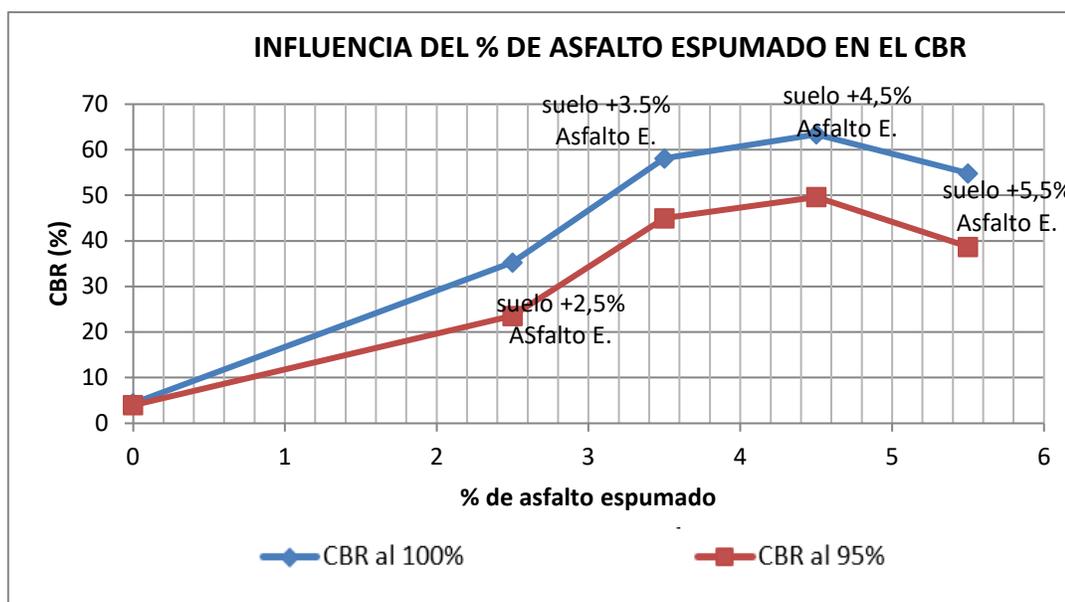
#### Muestra de suelo de 2 de Mayo

Tabla 3.39 CBR al 100% y CBR al 95% de la mezcla suelo 1 - asfalto E.

Muestra	suelo natural	2,5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4,5% Asfalto E.	5,5% Asfalto E.
CBR al 100%	4,39	35,27	58,14	63,43	54,82
CBR al 95%	3,96	23,54	44,99	49,66	38,68

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.33 Influencia del % de asfalto E. en el CBR con relación al suelo natural.



Fuente. Elaboración propia.

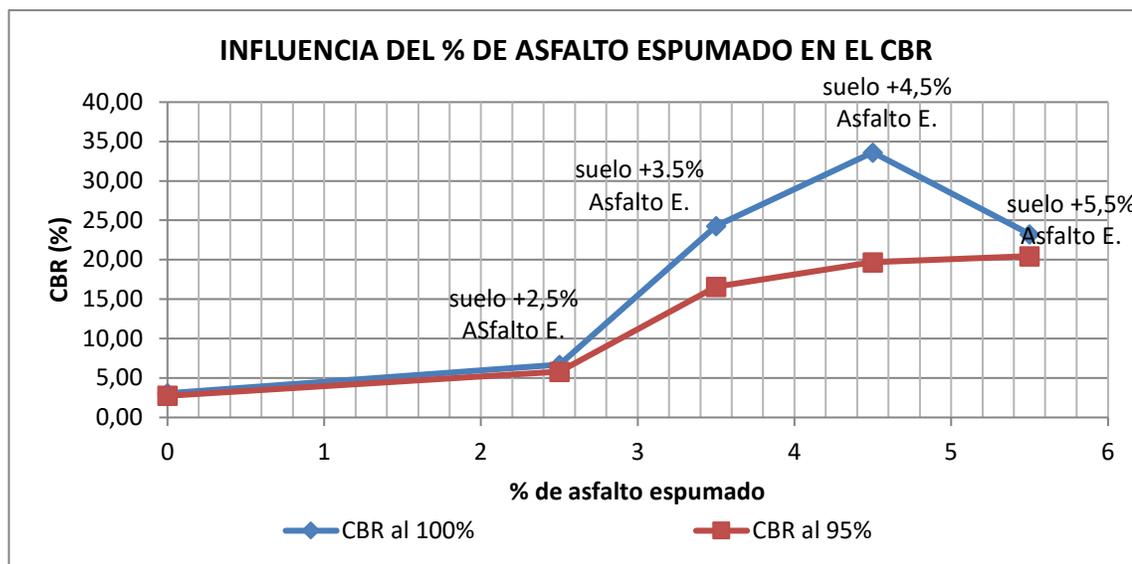
### Muestra de suelo de San pedro

Tabla 3.40 CBR al 100% y CBR al 95% de la mezcla suelo 2 - asfalto E.

Muestra	suelo natural	2,5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4,5% Asfalto E.	5,5% Asfalto E.
CBR al 100%	3,08	6,69	24,29	33,63	23,25
CBR al 95%	2,76	5,79	16,57	19,69	20,48

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.34 Influencia del % de asfalto E. en el CBR con relación al suelo natural.



Fuente. Elaboración propia.

#### Análisis de resultados.

Se observa que ya a pequeñas cantidades de asfalto espumado aplicado sobre el suelo natural de ambas muestras existe una gran elevación del porcentaje de CBR llegando a valores óptimos al 4,5%.

Nótese también que en la muestra 2 de Mayo el valor del C.B.R. es Mayor que la de san pedro, esto es debido a que el primero presenta Mayor cantidad de agregado granular lo que facilita una mejor adherencia del asfalto espumado a sus partículas y por ende una Mayor resistencia.

Los valores de C.B.R. obtenidos en ambas muestras de suelos estabilizadas con asfalto espumado ahora cumplen con las especificaciones mínimas para sub rasante de la **figura 2.7** del capítulo II.

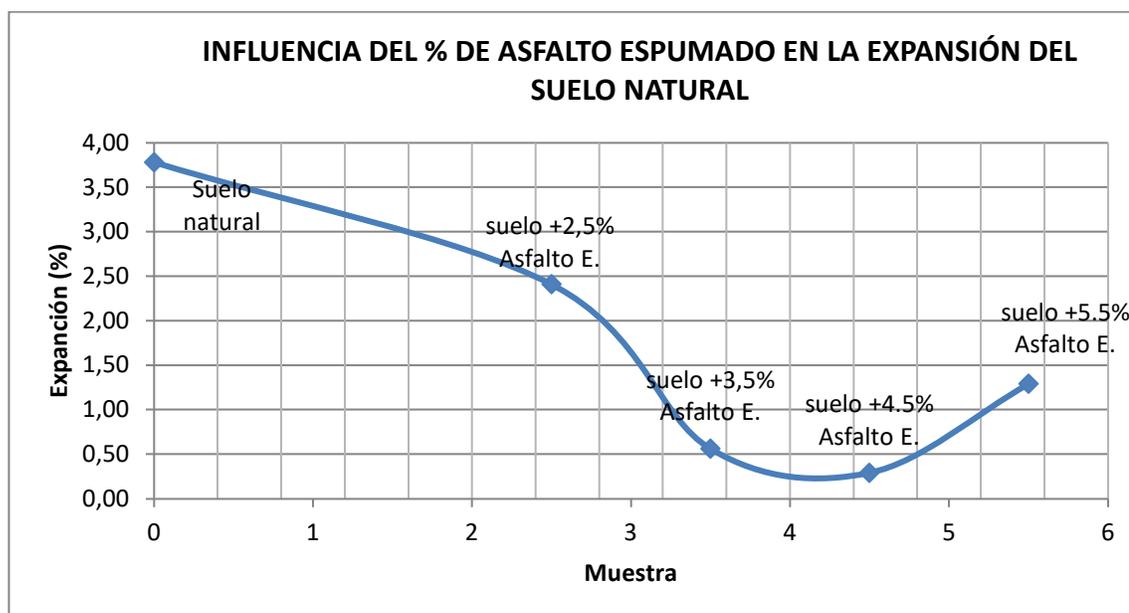
### Muestra de suelo de 2 de Mayo

Tabla 3.41 Expansión de la mezcla del suelo 1 - asfalto E.

Muestra	suelo natural	2,5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4,5% Asfalto E.	5,5% Asfalto E.
Expansión	3,78	2,41	0,56	0,29	1,29

Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.35 Influencia del % de asfalto E. en la expansión con relación al suelo natural.



Fuente. Elaboración propia.

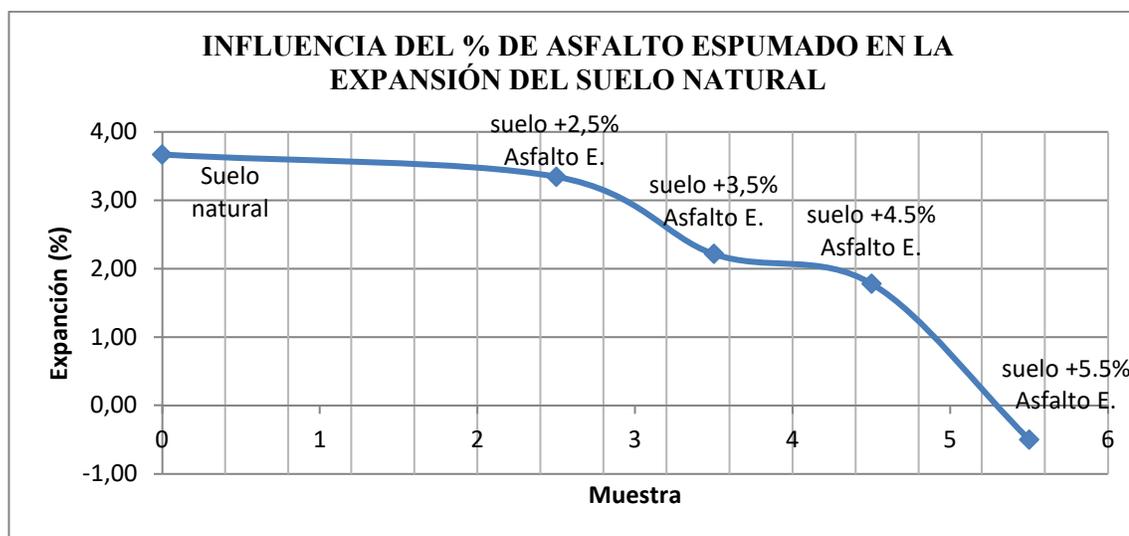
### Muestra de suelo de San Pedro

Tabla 3.42 Expansión de la mezcla del suelo 2 - asfalto E.

Muestra	suelo natural	2,5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4,5% Asfalto E.	5,5% Asfalto E.
Expansión	3,67	3,34	2,216	1,780	-0,500

Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 3.36 Influencia del % de asfalto E. en la expansión con relación al suelo natural.



Fuente. Elaboración propia.

#### Análisis de resultados.

Se observa en la gráfica que el suelo natural para ambas muestras no cumplen las especificaciones técnicas de expansión para una sub rasante valor que deberá ser menor a 3%(ver **figura 2.7** capítulo II), sin embargo al hacer la mezcla suelo – Asfalto Espumado se ve una notoria mejoría ya que los valores de la expansión arrojan valores mucho más bajos e inclusive arrojan valores negativos, resultado de una contracción mínima que sufren las probetas en el 3 y 4 día de saturación en la prueba de CBR, contracción debida al efecto del asfalto Espumado, al empezar su proceso de endurecimiento.

se puede verificar también que los valores de expansión son más bajos en el suelo 1 (A-4 2 de Mayo) esto debido a que el asfalto espumado se adhiere de mejor manera en suelos más granulares.

### 3.7.3 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE DEL SUELO ESTABILIZADO A DIFERENTES PORCENTAJES DE ASFALTO ESPUMADO COMO ESTABILIZANTE.

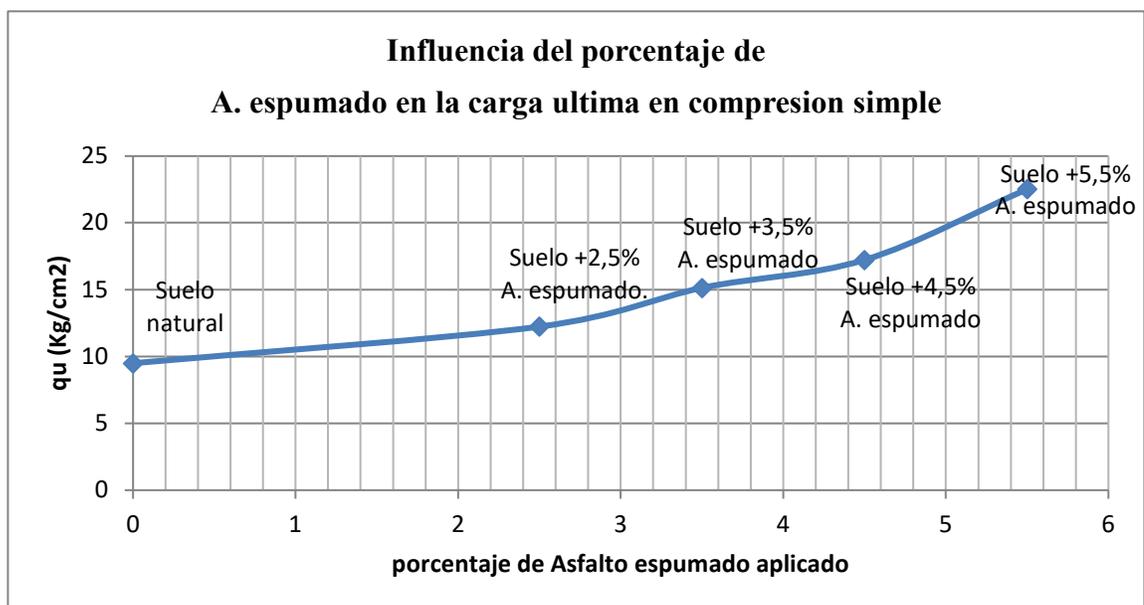
#### Muestra de suelo de 2 de Mayo

Tabla 3.43 Resistencia última a compresión simple del suelo 1 - asfalto E.

Valores obtenidos en la prueba Compresión simple de la estabilización suelo-A. espumado					
Muestra	suelo natural	2,5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4,5% Asfalto E.	5,5% Asfalto E.
qu (kg/cm2)	9,499	12,24	15,135	17,233	22,529

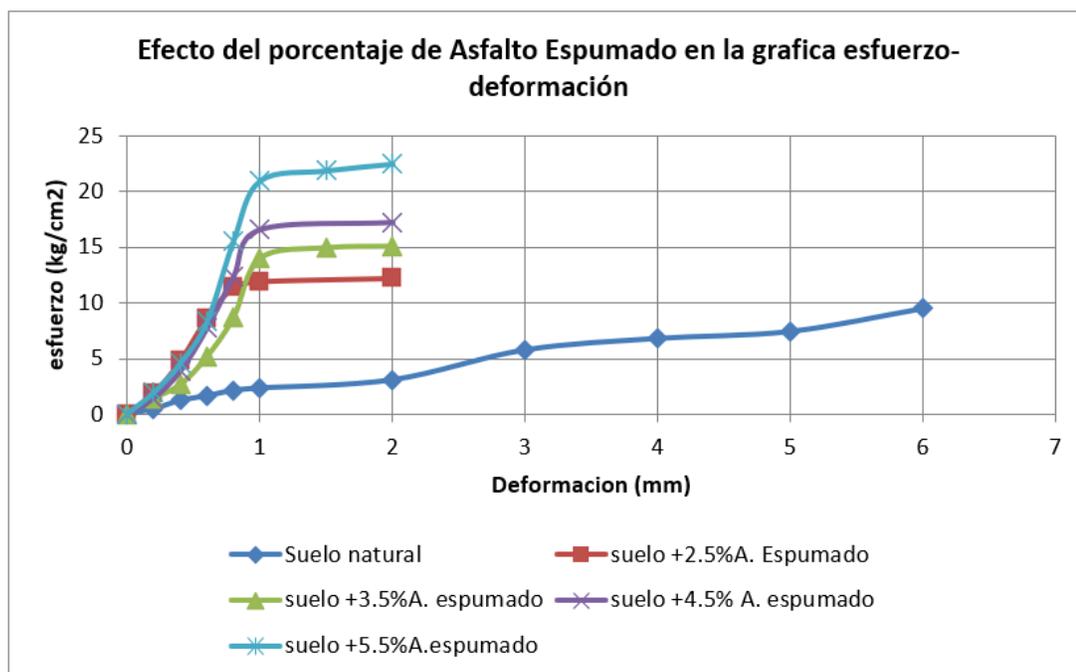
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.37 Influencia del % de asfalto E. en la carga ultima.



Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.38 Grafica Esfuerzo Deformación.



Fuente. Elaboración propia.

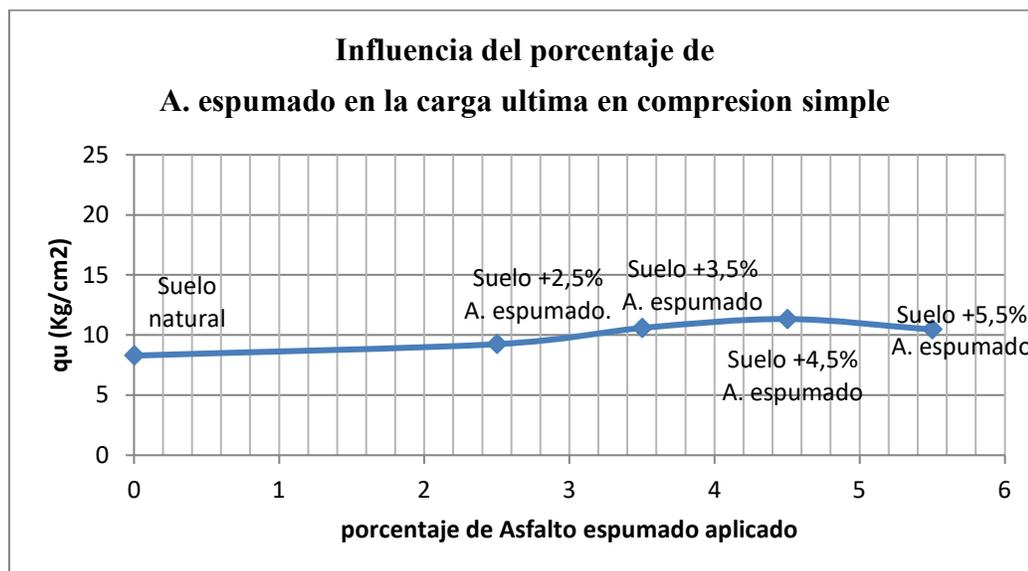
### Muestra de suelo de San Pedro

Tabla 3.44 Resistencia última a compresión simple del suelo 2 - asfalto E.

Valores obtenidos en la prueba Compresión simple de la estabilización suelo-A. espumado					
Muestra	suelo natural	2,5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4,5% Asfalto E.	5,5% Asfalto E.
qu (kg/cm <sup>2</sup> )	8,304	9,257	10,594	11,337	10,476

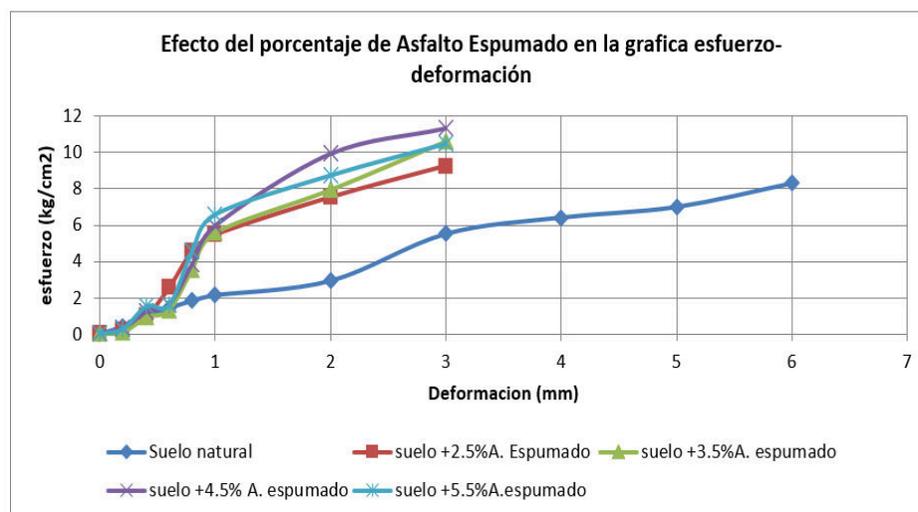
Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.39 Influencia del % de asfalto E. en la carga ultima.



Fuente. Elaboración propia.

Grafica 3.40 Grafica Esfuerzo Deformación.



Fuente. Elaboración propia.

### Análisis de resultados.

Se ve un notable mejoramiento gradual a un Mayor porcentaje de asfalto espumado llegando a cargas muy superiores comparada con la carga máxima antes de rotura que

puede presentar el suelo en estado natural.

Comparando el suelo 1 y 2, se puede notar que en el suelo de 2 de Mayo se obtiene mejores resultados de carga de ruptura y deformación esto debido a que la presencia de material más granular en su estructura ayuda a dar una mejor resistencia y con la ayuda del asfalto espumado se evita porosidades que pueden crear vacíos y ayuda a la pérdida de plasticidad.

Se puede observar en las **gráficas 3.38 y 3.40** que el suelo natural ofrece Mayor grado de deformación y a cargas no elevadas, presentando una deformación gradual accedente hasta su carga de ruptura, en cambio las mezclas con asfalto espumado presentan una deformación ascendente hasta valores de 1 mm de deformación y después su deformación se mantiene casi constante en forma vertical hasta la carga de ruptura, pero siendo aun así menores a la del suelo natural.

### 3.8 RESULTADOS OBTENIDOS

#### 3.8.1 RESULTADOS ALCANZADOS PARA LAS 2 MUESTRAS DE SUELO.

Tabla 3.45 Resumen de propiedades del suelo 1 estabilizado.

Propiedad	Ensayo	Resultados suelo 2 De Mayo				
		suelo natural	2.5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4.5% Asfalto E.	5.5% Asfalto E.
Compactación	Humedad optima (%)	11,68	12,70	12,50	12,67	14,67
	Densidad seca máxima (gr/cm3)	2,09	2,10	2,25	2,27	1,99
Cambio volumétrico	Expansión (%)	3,78	2,41	0,56	0,29	1,29
Capacidad de soporte	CBR al 100%	4,39	35,27	58,14	63,43	54,82
	CBR al 95%	3,96	23,54	44,99	49,66	38,68
Resistencia a compresión	Carga ultima qu (kg/cm2)	9,499	12,24	15,14	17,23	22,53

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3.46 Resumen de propiedades del suelo 2 estabilizado.

Propiedad	Ensayo	Resultados suelo San Pedro				
		Suelo Natural	2.5% Asfalto E.	3,5% Asfalto E.	4.5% Asfalto E.	5.5% Asfalto E.
Compactación	Humedad optima (%)	11,87	10,67	12,50	12,25	11,00
	Densidad seca máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	1,81	2,14	2,16	2,23	2,22
Cambio volumétrico	Expansión (%)	3,67	3,34	2,22	1,78	-0,50
Capacidad de soporte	CBR al 100%	3,08	6,69	24,29	33,63	23,25
	CBR al 95%	2,76	5,79	16,57	19,69	20,48
Resistencia a compresión	Carga ultima qu (kg/cm <sup>2</sup> )	8,304	9,26	10,59	11,34	10,48

Fuente. Elaboración propia.

### 3.8.2 EVALUACIÓN TÉCNICA DE RESULTADOS

Evaluación de la densidad seca máxima y la humedad optima

Al evaluar el ensayo de compactación se determina que la mezcla con estabilizante al 4,5% en ambas muestras de suelo, es la que logra alcanzar Mayor densidad seca y a un porcentaje Mayor a este la misma disminuye.

Ambas muestras de suelo presentan una elevación del contenido de humedad optimo con respecto al inicial mencionado en las **tablas 3.15 y 3.16** del capítulo III para lograr alcanzar sus densidades secas máximas.

Evaluación de la expansión y la capacidad de soporte alcanzada en el ensayo CBR.

Se determina que al porcentaje de 4,5% de estabilizante las 2 muestras de suelo logran disminuir significativamente sus valores de expansión respecto a los iniciales del suelo natural mencionados en las **tablas 3.23 y 3.24** del capítulo III, factor que influye directamente en el cambio volumétrico que sufrirá nuestra sub rasante al estar está sometida a saturación de agua y con presión del tráfico vehicular.

Se puede observar que, a más cantidad de asfalto espumado adicionado en la estabilización, más baja el porcentaje de expansión teniendo incluso valores negativos lo que también puede llegar a ser malo si es elevado porque puede provocar asentamientos que luego necesiten ser rellenados para nivelar el terreno.

Así mismo las 2 muestras de suelo logran alcanzar niveles más altos de porcentaje de CBR con el 4,5% de estabilizante, respecto a los valores del suelo natural mencionados en las **tablas 3.23 y 3.24** del capítulo III, tanto al 100% y al 95% llegando a ofrecer sub rasantes de elevada calidad.

### **3.9 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS REFERENCIALES**

El estudio de costos contempla básicamente la elaboración de precios referenciales basados en una investigación previa, los cuales corresponden a esta nueva alternativa de estabilización con métodos de construcción optimizados y adecuados a la maquinaria necesaria para la aplicación de esta nueva alternativa.

se emplean equipos tanto comunes como algunos específicos que aún no se dispone en nuestro medio para la construcción de una sub rasante, como ser: rodillo vibratorio liso, camión aguatero, grupo electrógeno 250 HP 150 KW, recicladora Wirtgen WR 2500 S, planta mezcladora móvil.

Para realizar el cálculo de los costos que implicaría la estabilización se hizo un análisis detallado de los precios unitarios, tomando en cuenta los costos horarios y rendimiento de operación de la maquinaria que se empleará en esta nueva técnica de estabilización asimismo en los insumos, materiales, mano de obra y demás gastos que demanda la obra o actividad.

A continuación, se hace una descripción de los componentes del precio unitario de ésta actividad.

### 3.9.1 COSTOS DIRECTOS

#### **Materiales de construcción.**

Se considera en la estabilización el rendimiento de las 2 de sub rasantes extraídos en las 2 zonas mencionadas al principio de este capítulo, y el cemento asfáltico obtenido de la alcaldía de Tarija.

Ahora en la estabilización el precio del asfalto se obtiene de la cotización en la planta mezcladora de la alcaldía ya que de ahí se usó para la estabilización en laboratorio, pero esto al por Mayor con el fin de abaratar los costos.

#### **Mano de obra.**

Comprende el haber básico del trabajador, el pago de beneficios sociales, el pago de impuestos y el costo horario de la mano de obra.

Los haberes o salarios mensuales se consideraron de acuerdo a los establecidos por la CADECO, pero su variación está sujeta a la ley de la libre oferta y demanda. Asimismo, en el detalle de los precios unitarios no se considera al operador del equipo más un ayudante o peón dentro de los costos horarios de operación de la maquinaria, por lo que estos son considerados recién en los gastos de la mano de obra dentro del análisis.

#### **Maquinaria y equipo.**

Contempla, la productividad, costos de propiedad, vida útil, amortización e intereses, costos de operación, reparación y repuestos, en fin, esto se resume en lo que son los costos horarios de operación los que, afectados por el rendimiento de la maquinaria, nos dará el costo unitario de la maquinaria.

### 3.9.2 COSTOS INDIRECTOS

Por una parte, están los gastos generales, que pueden estimarse en función de los costos unitarios y como el 15% de costo directo.

Ahora como en toda obra se debe obtener utilidades las cuales también se pueden estimar a partir de los costos directos y no pueden ser Mayores al 10% de éstos, y en muchas veces es menor que el 10%.

### 3.9.3 PRECIO UNITARIO DE LA ESTABILIZACIÓN

En base a todos los conceptos establecidos en las secciones anteriores se elaboró una planilla de precios unitarios referencial en base a algunas investigaciones de textos y proyectos citados en la bibliografía ya que en nuestro medio no se cuenta con los equipos necesarios ni costo de operación para esta nueva alternativa de estabilización con asfalto espumado.

Los detalles de la planilla se muestran en el anexo 3 del proyecto y se realizó para el porcentaje óptimo de asfalto espumado mencionado en la **tabla 2.7** del capítulo II.

Tabla 3.47 Resultado de cálculo de precio unitario de estabilización por m<sup>3</sup>

Ítem. o Actividad	Costo total Su\$/m <sup>3</sup>	Costo total Bs/m <sup>3</sup>
Estabilización suelo – 4.5 % Asfalto E.	47,44	332.555

Fuente. Elaboración propia.

### 3.9.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

En lo que respecta al costo que implica la alternativa de estabilización con asfalto espumado se tiene que:

Por su práctico tamaño, versatilidad de funciones, tanto como para pavimentar nuevas superficies como para el reciclado de pavimentos viejos y estabilización de suelos, la recicladora WIRTGEN WR 2500 S es una excelente alternativa de compra para el uso en estabilizaciones de sub rasantes. Con un costo de 4026400 (cuatro millones veintiséis mil cuatrocientos) bolivianos, frente a los 7000000 (siete millones) de bolivianos de la planta de preparación de mezclas asfálticas tradicionales ubicada en “La Pintada”, más el costo de instalación de 4000000 (cuatro millones) de bolivianos, el equipo de asfalto espumado es una alternativa atractiva considerando la eficiencia en los trabajos de pavimentación, estabilización y reciclado in situ frente a los de una planta tradicional. A continuación se presentan las características técnicas del equipo WR 2500 S:

Tabla 3.48 Especificaciones de la recicladora Wirtgen 2500s.

<b>Anchura de trabajo</b>	2438 mm
<b>Profundidad de trabajo</b>	0 – 500 mm
<b>Potencia de motor</b>	500 Kw / 670.51 Hp
<b>Peso de servicio</b>	32000 Kg
<b>Accionamiento del tambor de fresado</b>	Mecánico
<b>Numero de ruedas</b>	4
<b>Accionamiento de traslación</b>	Hidráulico en todas las ruedas

Fuente. Elaboración propia.

### 3.10 ACTIVIDADES DE MAYOR IMPACTO AMBIENTAL DURANTE LA ESTABILIZACIÓN

El análisis de impacto ambiental que puede causar la realización o que se pueden presentar dentro del proceso de estabilización con asfalto espumado, solo se lo realiza detallando que actividades principales pueden causar algún efecto sobre el medio ambiente:

Tabla 3.49 Actividades que generan impacto ambiental al estabilizar.

<b>Impacto ambiental causado por la estabilización con asfalto espumado</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Impacto ambiental</b>
Conformación y nivelado	Contaminación a la flora del entorno con la pérdida de cobertura vegetal y generación de polvos
Esparcimiento del Asfalto E.	Generación de polvo, contaminación del aire con la generación de ruido y calor.
Humectación de suelo	Explotación de recursos naturales con el uso de agua de fuentes de ríos.

Fuente. Elaboración propia

Tabla 3.50 Actividades que generan impacto ambiental al estabilizar.

<b>Impacto ambiental causado por la elaboración de asfalto espumado</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Impacto ambiental</b>
Cocción	Generación de ruidos y uso de combustibles.
espumado	Contaminación del aire en la elaboración de la mezcla.

Fuente. Elaboración propia

### 3.10.1 ANÁLISIS AMBIENTAL

Al hacer un análisis del impacto ambiental que puede causar en el procedimiento de estabilización, se puede determinar que la contaminación causada por los efectos de la misma es mínima, ya que estas dentro de sus actividades no hacen una explotación considerable de recursos naturales, el punto más considerable de contaminación es la de generación de calores por parte del cemento asfáltico espumado, misma que desaparece pasado algunos minutos.

Los impactos más favorables de la utilización de esta técnica de estabilización son los siguientes:

Se reduce la explotación de nuevos bancos de materiales y de material de préstamo.

Se reducen los costos de transporte.

Se minimiza el volumen de material nuevo que tiene que importarse desde las canteras.

Se usa totalmente el material existente.

El flujo de transporte es mucho menor. Se reduce el número de vehículos que transportan los materiales, originando un menor daño a la red vial.

### 3.11 ANÁLISIS SOCIAL

El análisis de impacto social que puede causar la realización o que se pueden presentar dentro del proceso de estabilización con asfalto espumado, se detalla de la siguiente manera:

#### 3.11.1 EFECTOS DIRECTOS

El proceso de estabilización puede generar miles de empleos directos e indirectos, desde personal obrero, hasta técnico y administrativo. Pudiendo dar preferencia a la mano de obra de trabajadores locales de las comunidades aledañas.

Se brindaría capacitación a los empleados de la comunidad en oficios, desarrollando capacidades técnicas para que pudieran participar y tener una fuente de ingresos para ellos y sus familias.

Con la estabilización con asfalto espumado se lograría carreteras más óptimas y duraderas, evitando así un mayor mantenimiento de las mismas que a su vez ocasionan cierres del tramo evitando el libre tránsito y perjudicando a la sociedad en general.

#### 3.11.2 EFECTOS INDIRECTOS

**Efectos sobre la calidad de vida:** Las infraestructuras de un país o de una región tienen una incidencia muy directa sobre la calidad de vida de la sociedad en general. Por una parte, las infraestructuras básicas (abastecimiento de agua, redes de saneamiento, etc.) garantizan un nivel adecuado de satisfacción de algunas necesidades. Mientras que, las infraestructuras de transporte garantizan que los desplazamientos pueden ser llevados a cabo con un adecuado grado de satisfacción por parte de la sociedad. En este sentido, algunas variables que se pueden emplear para valorar el grado de satisfacción de los usuarios de las infraestructuras de transporte son: las velocidades de recorrido, los tiempos de viaje, las prestaciones, la congestión, el medio ambiente, entre otras.

Es por eso que el estado en que se encuentra la carretera influye directamente sobre estas variables y a su vez causa un impacto negativo o positivo sobre la calidad de vida.

**Influencia en la distribución de la renta:** De modo indirecto, las infraestructuras de transporte influyen en la distribución de la renta, pues el contar con un adecuado nivel de infraestructuras de transporte facilita que sea mucho mayor el número de personas de diversas regiones que se benefician del crecimiento de la actividad económica, lo cual, redundando de modo directo en la reducción de las desigualdades.

**Influencia en los servicios de salud y educación:** La dotación de infraestructuras viales duraderas y en buen estado influye decisivamente en la extensión y alcance de estos servicios.

**Influencia en la vulnerabilidad frente a los desastres:** Las infraestructuras de transporte juegan un papel significativo en este ámbito, pues una adecuada red de transporte y en buen estado dentro de un país o de una región permite resolver situaciones de necesidad o emergencia con mucha más eficacia que una en mal estado o constante mantenimiento.

**Influencia en el alivio de la pobreza:** Las políticas que se diseñan para aliviar la pobreza en los países en vías de desarrollo, siguen en la mayoría de los casos dos enfoques. Por un lado, el enfoque directo, mediante el cual se aportan estrategias que tratan de paliar las necesidades básicas de la población más desfavorecida, especialmente en los que se refiere a la alimentación, salud y educación. Por otra parte, el enfoque indirecto confía en que los beneficios que se derivan del crecimiento económico terminan llegando a la población desfavorecida en forma de oportunidades de trabajo, mejora del nivel de renta, etc.

Así pues, las infraestructuras de transporte juegan un papel importante en los dos enfoques mencionados, tanto en la provisión directa de servicios a la sociedad como en los mecanismos que traducen el crecimiento económico en mejoras de calidad de vida de este segmento de población. En el caso de zonas rurales (con frecuencia más atrasadas), las infraestructuras de transporte constituyen el único modo de mantener contacto con poblaciones más desarrolladas, en las que existen dichos servicios. Partiendo de lo anterior, es necesario realizar una buena estabilización de la sub rasante para así lograr infraestructuras viales más resistentes y duraderas que no perjudiquen el libre tránsito de la sociedad en general.

**CAPÍTULO IV**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

A la conclusión del presente trabajo, de análisis de propiedades de materiales estabilizados con asfalto espumado para acondicionar ésta como una obra vial y fundamentando los resultados arrojados de un análisis técnico complementado por el económico, es que se puede enunciar las conclusiones más importantes que genera este trabajo.

- Para el desarrollo del estudio dentro de las 2 zonas de las que se extrajo material, se vio la necesidad de utilizar una sub rasante con material más limoso y otra con material más arcilloso, logrando así el análisis individual de sus propiedades características de cada una.
- Se determino un porcentaje óptimo de asfalto espumado con la utilización de la **tabla 2.8** del capítulo 2 siendo este valor 4,5% y se propusieron otros más con lo que se logró construir graficas representativas del comportamiento de las propiedades a diferentes porcentajes.
- Con el dato de la humedad optimo se procedió a realizar los ensayos de CBR, fundamentales para nuestro estudio ya que de este valor dependerá el aporte estructural a las demás capas de una carretera y de igual manera de este dependerá si la estabilización con asfalto espumado mejoro sus propiedades mecánicas mínimas.
- Ambos materiales lograron cumplir con las especificaciones mínimas mencionadas en la **figura 2.7** del capítulo II, demostrando así que esta nueva técnica de estabilización con asfalto espumado ofrece resultados verdaderamente buenos en el mejoramiento de las propiedades de una sub rasante.

- se determinó que, con el ensayo de compresión simple, la resistencia que lograron alcanzar nuestras sub rasantes hasta antes de llegar al fallo, sin estabilizar y luego estabilizadas con asfalto espumado aumentaron notablemente con respecto a la primera, siendo Mayor en el suelo de 2 de Mayo.
- Ambos materiales lograron alcanzar una menor deformación por acción de la compresión con relación a su estado natural, con lo que podemos concluir que la adición de asfalto espumado como estabilizante mejora notablemente sus propiedades.

se procedió a determinar un costo aproximado de lo que sería la estabilización con asfalto espumado en nuestro medio para el porcentaje optimo del mismo, Determinando las siguientes conclusiones:

- adquirir una recicladora de última generación resulta ser mucho más económico que poner una planta mezcladora y ambos cumplen la misma función siendo la primera incluso de varios usos más.
- El costo estimado para estabilizar un m<sup>3</sup> de sub rasante es 47,44 \$u\$, la razón de esta unidad es porque a diferencia de las estabilizaciones convencionales que solo trabajan en la superficie, la recicladora trabaja con espesores que se pueden modificar desde los 0 hasta los 500mm, este valor de espesor está definido según la capacidad estructural que se quiera obtener para la sub rasante.
- El costo mencionado en el anterior punto es un valor calculado en base a investigaciones en textos y precios en internet ya que en nuestro medio aún no se cuenta con esta tecnología que es la estabilización con asfalto espumado.

También como respaldo y complementación del estudio se realizó un estudio del impacto ambiental que se causa tanto en el procedimiento de construcción de una estabilización como en la misma elaboración de los materiales utilizados como estabilizantes, llegando a la siguiente conclusión:

- Si bien en la estabilización química con asfalto espumado produce impactos ambientales entre estos el de Mayor relevancia la contaminación del aire por los gases y calor que produce es menos dañina que las convencionales, ya que esta no necesita de la extracción de materiales de los bancos de préstamo porque trabaja en el sitio, lo que significa menos daño ecológico a los recursos naturales como también menor uso de combustible para trasportes que igual dañan el aire por los humos que emite el quemado de combustible, siendo esta nueva alternativa la más amigable con el medio ambiente.

#### **4.2 RECOMENDACIONES**

Las recomendaciones brindadas son con el fin de realizar una contribución para la solución del problema que representa la construcción y mantenimiento de obras viales de manera optimizada en estas zonas periurbanas, proporcionando los fundamentos solicitados para el caso.

De las conclusiones expuestas, nacen algunas recomendaciones que reflejan su importancia, y se resumen en las siguientes:

- A lo que apunta éste trabajo, luego de realizadas las estabilizaciones, es dejar en claro que las técnicas de estabilización y de mantenimiento que se dan en suelos arcillosos no son las óptimas, esto debido a que es necesario hacer un análisis de la obra vial como todo un sistema, ya que cuando se crea o se apertura una vía, se necesita evaluar su costo a largo plazo tomando en cuenta el crecimiento poblacional, la proyección de tráfico y el costo de mantenimiento que implica, de ahí que se lanza este instrumento de sugerencia y de referencia para toda la comunidad involucrada en la materia.
- La estabilización de suelos con agentes químicos debe ser una técnica considerada en cualquier proyecto vial, porque contribuye a la vida útil del mismo y ofrece condiciones de tránsito inmejorables.

- a) Recomendación Técnica.** - Al momento de elaborar los moldes de CBR se recomienda calcular bien los días para que no exceda del límite de 4 días ya que a Mayor saturación el asfalto espumado comienza reblandecer y a salirse por la parte inferior de los moldes pudiendo así arrojar valores erróneos durante la prueba de resistencia en la prensa.
- b) Recomendación Económica.** - Se recomienda realizar la estabilización con asfalto espumado ya que está comprobado que es una técnica más económica que las tradicionales por el tema de que trabaja en el sitio omitiendo ciertos equipos de maquinaria pesada, transporte de áridos y uso de combustible.
- c) Recomendación Ambiental.** – Por el mismo motivo mencionado en la recomendación económica, la estabilización con asfalto espumado está recomendada por la gran disminución de impactos ambientales que produce para su realización.
- d) Recomendación Social.** – se recomienda la estabilización con asfalto espumado ya que este afecta positivamente a la sociedad, porque causa menos impactos ambientales que los métodos tradicionales, también porque se requiere de menos mantenimientos a la carretera por las propiedades que ofrece.

**RECOMENDACIÓN FINAL:** se recomienda realizar la estabilización con 4,5% de asfalto espumado siendo este de menor costo, y cumple con los requisitos mínimos indispensables para la conformación de sub rasantes en vías urbanas.