

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

La calidad del suelo que conforma un emplazamiento de construcción es un factor muy importante para soportar una determinada estructura. En el caso específico de una vía, es importante tener en cuenta la calidad de los suelos existentes, con la finalidad de poder conformar una capa base resistente y duradera frente a la acción de las cargas que le transmita el tráfico y de las condiciones ambientales adversas que se puedan presentar.

Esto es importante, ya que el comportamiento de la estructura de un pavimento está ligado directamente al comportamiento de las capas.

Los cambios volumétricos que se generen en un suelo arcilloso, pueden ocasionar graves daños en las estructuras, por ello, cuando se construya un pavimento sobre este tipo de suelo deberá evitarse los cambios de humedad como también mejorar la capacidad portante de la capa base, para lo cual habrá que pensar en la aplicación de un proceso de análisis de mezcla de suelo – RAP – cemento.

El análisis de mezcla de suelos con cemento se ha aplicado en distintas partes del mundo y desde hace buen tiempo atrás, pero, se incorporará como un aditivo de cohesión entre el suelo y el RAP (Pavimento asfáltico reciclado).

Actualmente en Bolivia se tiene un conocimiento que en zonas de los llanos y valles existe suelos arenosos, limosos donde no existe material para el mejoramiento de la capa base, se está procediendo a estabilizar la capa base con algún aditivo como la cal o cemento, observando diferentes factores que influyen; como el relieve del terreno o climas lluviosos, en los departamentos de Pando y Beni y Santa Cruz, también en la zona del Chaco tarijeño donde predomina el suelo limo arenoso, se hizo estabilizaciones con cal en las brechas que une Tigüipa – Planta San Roque como también la Vertiente puesto el Algodonal donde se obtuvo buenos resultados.

En la ciudad de Tarija, el análisis de mezcla de suelos – RAP – cemento no se tiene el conocimiento de la técnica, generalmente se opta por otras opciones de mejoramiento de los suelos de baja calidad que conforman las capas, tales como el reemplazo del suelo o el uso de productos geosintéticos.

Finalmente, sería importante evaluar las ventajas técnicas del análisis de la mezcla de suelos con cemento y RAP (Pavimento asfáltico reciclado) para poder aplicarlo en nuestro medio, y así se logre mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de baja calidad.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad, se evidencia que en algunas carreteras fundamentales como también calles céntricas del departamento sufren asentamientos, que son causados por exceso de la capacidad portante como también mala calidad de los suelos o a veces por la aparición de la humedad en las capas del pavimento. Este proyecto establecerá una investigación muy importante donde se realizará una mezcla con el mismo suelo, pero agregando un nuevo material reciclado en la capa base del pavimento con el motivo de mejorar la calidad del suelo para que no presentes las fallas en los pavimentos.

La utilidad de esta investigación radica en la profundización del estudio acerca de la mejoría que se puede obtener ,de la mezcla estabilizada con el material reciclado para tener un conocimiento que aporte a las empresas constructoras como: administradora boliviana de carreteras (ABC) , servicios departamentales de caminos Tarija ( SEDECA) con la finalidad de proveerles la investigación y que la tomen en cuenta para la construcción de capas base para diferentes tramos ; donde se prevé mejorar la capacidad portante como también alterar las propiedades permeables del suelo.

Su aporte se fundamenta en la importancia de conocer y evaluar las ventajas técnicas de la estabilización de suelos con cemento y RAP (Pavimento asfáltico reciclado), que viene a ser una alternativa de mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de baja calidad, tales como los suelos arcillosos que puedan conformar una capa base y que generan problemas en la estructura de un pavimento.

Se reutiliza los agregados de los pavimentos flexibles (RAP) que se retira como desechos, por un recapamiento o tal vez algún bacheo que se hace en la zona, con el objetivo de que el material retirado no quede en las bermas o espacios verdes, así evitando algún impacto ambiental en la zona.

Un asentamiento inesperado puede causar daños en la carpeta asfáltica, como a las articulaciones de las movilidades, es por eso que la investigación busca el método más adecuado de estabilizarlo, teniendo en cuenta el factor económico donde conlleva a

reutilizar un material 100% reciclado. Al aumentar el valor de la capacidad portante de la capa base se evitará la remoción del suelo existente y que este sea reemplazado con otro material granular lo cual significa un costo elevado, al mejorar la capa base con el uso de cemento -RAP, esto ayudará a reducir el espesor de la carpeta asfáltica.

### **1.3 DISEÑO TEORICO**

#### **1.3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

##### **1.3.1.1 Situación problema**

La calidad del suelo que orienta a la construcción de vías es una causa muy fundamental para que soportar una determinada estructura del pavimento. En el caso específico de una vía, es importante tener en cuenta la característica de los suelos existentes, con el propósito de poder conformar una capa base resistente y duradera frente a la acción de las cargas que le transmita el tráfico y de las circunstancias ambientales adversas que se puedan manifestar en la zona. Esto es importante, ya que el comportamiento de la estructura de un pavimento está ligado directamente al comportamiento de la capa base.

La baja calidad de los suelos que conforman la capa base de una vía, obliga a tener que mejorarlos para evitar problemas futuros. Donde existen dos posibilidades principales de mejorar la calidad de un suelo, una de ellas es el retiro y reemplazo por una capa de suelo seleccionado y de mejor calidad y la otra opción es la estabilización del mismo suelo in situ mediante el uso de aditivos químicos o agentes estabilizadores.

Los suelos más comunes y que generalmente de baja calidad son las arcillas, que pueden generar serias dificultades en las capas de un pavimento. Un tipo especial de estas arcillas son las expansivas, que presentan cambios volumétricos como también la baja capacidad portante.

Los cambios volumétricos que se presentan en un suelo arcilloso del tipo expansivo, pueden ocasionar daños en las estructuras del pavimento que se apoyan sobre el mismo, por ello, cuando se construya un pavimento sobre este tipo de suelo debe evitar la humedad, para lo cual habrá que pensar en una impermeabilización o en un proceso de estabilización con algún agente químico u otro material.

En la actualidad se puede observar en los países Latinoamericanos se encuentra experimentando como mejorar los suelos blandos y de baja calidad para tramos viales,

alterando sus propiedades como la consistencia la porosidad, densidad, dónde una simple reacción química entre el suelo y el material a estabilizar se obtiene resultados satisfactorios como la alta plasticidad y CBR. Con el objetivo de que la capa base no existan fallas en la estructura de la carpeta asfáltica así mismo alargando su vida útil.

En la ciudad de Tarija se tiene un conocimiento básico de los suelos de naturaleza sedimentaria y depósitos de origen aluvial compuestos de limos, arcillas, gravas ripios que presentan baja capacidad de soporte. A menudo este tipo de suelos conforman una capa base, generan problemas en las estructuras de los pavimentos que se construyen, surgiendo así la necesidad de realizar algún tipo de mejoramiento de la calidad de estos suelos, pudiendo ser mediante una estabilización.

Un ejemplo de estabilización habitual es el empleo de cemento Portland y cal como aditivos estabilizadores, la estabilización de suelos con cemento y cal se ha aplicado en distintos países desde hace un buen tiempo atrás.

En la ciudad de Tarija, la estabilización de suelos con cemento y cal se encuentra poco difundida, así que como también el nuevo uso del material RAP, donde se pretende utilizar dicho material para cambiar las propiedades de los suelos.

### **1.3.1.2 Problema**

**¿Cuál será el comportamiento en cuanto a la resistencia de un suelo – cemento adicionándole material reciclable como el RAP?**

## **1.3.2 OBJETIVOS**

### **1.3.2.1 Objetivo general**

Analizar mezclas estabilizadas de suelo - RAP- cemento para la aplicación en suelos con el fin de producir propiedades adecuadas en la capa base

### **1.3.2.2 Objetivos específicos**

- Analizar los componentes y propiedades de material de capa base estabilizada
- Realizar ensayos de caracterización del suelo y RAP para establecer sus propiedades mecánicas.
- Caracterizar al cemento como aglomerante
- Determinar la dosificación óptima de la mezcla suelo -RAP-cemento
- Evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla estabilizada de capa base
- Analizar las propiedades mecánicas y su cumplimiento de las especificaciones de la capa base
- Determinar mediante ensayos, la resistencia de las mezclas suelo RAP cemento para cada una de las dosificaciones
- Determinar la durabilidad de la mezcla suelo RAP cemento tanto en condiciones secas como húmedas y, comparar analíticamente el suelo estabilizado con el suelo natural

## **1.3.3 HIPÓTESIS**

Si en la ciudad de Tarija los suelos no cumplen las propiedades y características para construcción de la capa base, se plantea una técnica nueva, con la adición de material reciclado RAP y cemento como aglomerante así evitando asentamientos y fallas en la carpeta de rodadura. Entonces se procederá a realizar dosificaciones para encontrar el porcentaje óptimo de la mezcla de la construcción, obteniendo propiedades superiores al suelo natural.

### 1.3.4 DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTE Y DEPENDIENTE

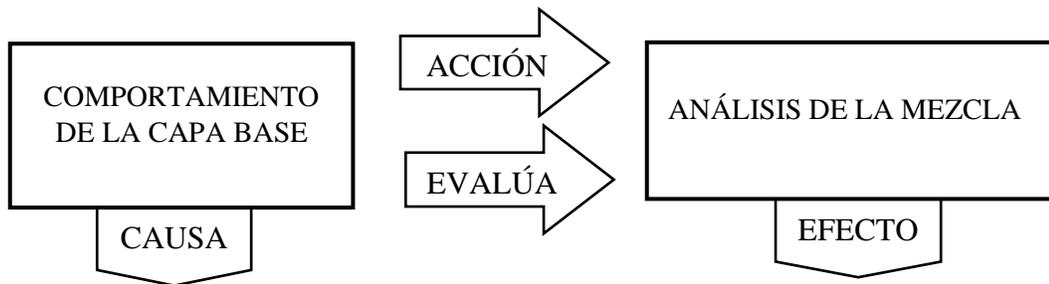
#### 1.3.4.1 Variable independiente

Variable independiente: COMPORTAMIENTO DE LA CAPA BASE

#### 1.3.4.2 Variable dependiente

Variable dependiente: ANÁLISIS DE MEZCLAS

- Tipos de suelos
- Porcentaje de RAP
- Porcentaje de cemento



#### 1.3.4.3 Operacionalización de variable

Tabla 1.1 Variable dependiente

Variable	Conceptualización	Medición	Unidad
Análisis de mezclas	El análisis de mezclas de suelos nos permite mejorar y conocer las propiedades mecánicas del mismo dando mayor seguridad en obras viales	Tipo de suelo	SUCS AASHTO
		Porcentaje de RAP	%
		Porcentaje de cemento	%
		Porcentaje de agua	%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 1.2 Variable independiente

Variable	Conceptualización	Medición	Unidad
Comportamiento de la capa base	Mezcla de agregado grueso con fragmentos duros y resistentes de piedra, grava o escoria y agregado fino compuesto por arena natural, canto chancado, con índice plástico no mayor a 6, CBR $\geq$ 80 %	Análisis granulométrico	%
		Límites de consistencia	%
		Ensayo de Proctor modificado	%
		Ensayo de CBR	%

Fuente: Elaboración Propia

## 1.4 DISEÑO METODOLÓGICO

### 1.4.1 Componentes

#### 1.4.1.1 Unidad

La investigación se enfocará en un estudio de la **Capa base para pavimentos asfálticos**.

#### 1.4.1.2 Población

En la presente investigación se analizará la subrasante de un lugar determinado, que conjuntamente con el **material reciclado local**, podrá ser usado como capa base para pavimentos asfálticos.

#### 1.4.1.3 Muestra

Dado que varios materiales reciclados se pueden mezclar con el suelo para mejorar sus propiedades, se probará en hacer con **materiales locales** de Tarija, como **RAP y cemento**, con el objeto de mejorar sus propiedades del suelo, se deberá realizar ensayos de caracterización de los materiales a usar. También se realizarán moldes con la mezcla dosificada con diferentes porcentajes de material y se evaluarán los parámetros adquiridos.

#### 1.4.1.4 Muestreo

El estudio comienza con la extracción de muestras de la subrasante de carreteras de red provincial (tramo San Jacinto - Tolomosa) con el fin de mejorar el suelo para usarlo como capa base, se hará la caracterización de suelo necesitando aproximado unos 60 kilogramos de muestra de suelo, En cuanto al RAP, se planea extraer de la comunidad de Canaletas,

donde se observa que en el tramo Tarija - Entre Ríos, se llevó a cabo algunas renovaciones en áreas inestables de la carretera, se recolectarán aproximadamente 70 kilogramos y se caracterizará por distribución granulométrica. Mientras el cemento se comprará una bolsa de CEMENTO EL PUENTE IP-30, se caracterizará con los ensayos respectivos. Se plantea realizar 30 moldes de 3.5 kilogramos cada uno, siendo un molde por cada porcentaje de mezcla dosificada y uno con suelo natural, Haciendo un total aproximado de 150 kilogramos de material del suelo. Por lo tanto, tendremos 6 bolsas de 25 kilogramos cada uno, así mismo esperando una mejora en el suelo estabilizado.

Imagen 1.1 Tramo Tarija -Entre Ríos



Fuente: Elaboración propia

## 1.4.2 Métodos y técnicas empleadas

### 1.4.2.1 Selección de métodos y técnicas

El **método inductivo** es una forma de razonamiento para llegar a conclusiones que empieza desde lo más específico y va hasta las generalizaciones y teorías más amplias. Se comienza con unas observaciones y medidas específicas para llegar a unas conclusiones generales.

El método inductivo consiste en tres etapas:

- Observación,
- Captar/observar un patrón
- Desarrollar una teoría.

En este método de razonamiento es importante que los hechos examinados sean lógicos para que las ideas expuestas tengan coherencia; aunque se debe destacar que las teorías

inducidas pueden estar incompletas o erradas, lo que sucede porque se centran únicamente en algunos sucesos y no abarcan toda la realidad.

Esta investigación utilizará la metodología inductiva al estudiar una mezcla de suelo RAP cemento cuando se dosifique en porcentajes de 10 20 30% para observar y obtener mediante ensayos la dosificación óptima del RAP y cemento, luego se realizará pruebas de resistencia, deformación para conocer las propiedades adquiridas por la combinación de los tres materiales. Después de los ensayos se hará un análisis analítico donde se examinará los resultados y se llegara una conclusión sobre la investigación si fue factible realizarlo.

#### **1.4.2.2 Técnicas de muestreo**

La técnica de muestreo utilizada en este estudio será experimental, se realizarán ensayos para caracterizar el suelo, como también el RAP y cemento. Dónde se aprenderá más sobre los materiales utilizados en la investigación.

#### **1.4.2.3 Descripción de equipos e instrumentos**

A continuación, se describirán algunos materiales para realizar los ensayos

- **Juegos de Tamices:** se utilizará un juego de tamices para realizar los ensayos de distribución de partículas de suelo para su clasificación del mismo mediante las tablas SUCS Y AASHTO, mientras que el RAP elegirá materiales más gruesos utilizando el tamiz de apertura más grande.

Imagen 1.2 Tamices



Fuente: Proetisa.com

- **Horno:** Esto será muy importante en la investigación, porque para la compactación se debe tener todos los datos del contenido de humedad del suelo.

Imagen 1.3 Horno



Fuente: Proetisa.com

- **Balanza electrónica:** Es instrumentos de pesaje que utilizan la acción de la gravedad para la determinación de la masa, es importante porque cada ensayo tiene una cantidad específica de material de suelo para realizar, sin la balanza no tendríamos la precisión del ensayo.

Imagen 1.4 Balanza eléctrica



Fuente: Proetisa.com

- **Taras:** Son recipientes metálicos donde se coloca la muestra para los ensayos de contenido de humedad y compactación, luego son llevados al horno a resistir altas temperaturas.

Imagen 1.5 Taras



Fuente: Pinzuar.com

- **Cuchara de Casagrande:** Es un instrumento de medición utilizado en laboratorios de suelos para determinar el límite líquido de una muestra de terreno.

Imagen 1.6 Cuchara de Casagrande



Fuente: Proetisa.com

- **Equipo de compactación:** El equipo realizará ensayos para determinar la relación entre el contenido de humedad y el peso seco máximo del suelo, lo que será de gran ayuda para determinar las características del suelo compactado.

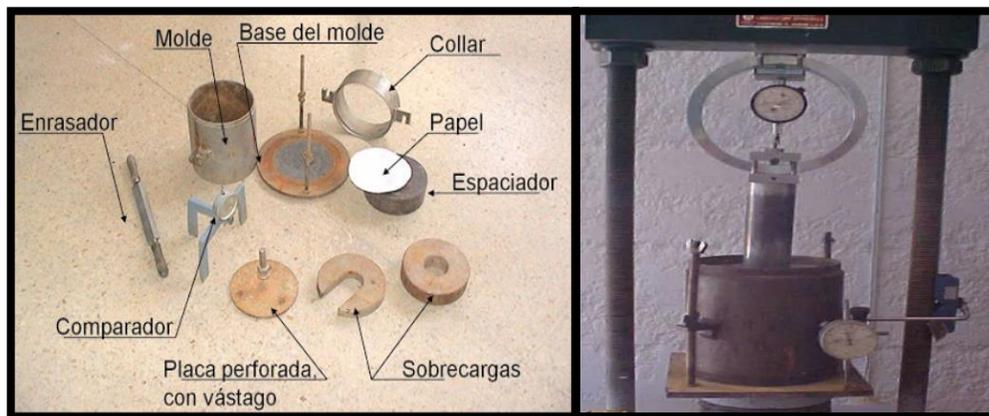
Imagen 1.7 Equipo de compactación



Fuente: Topoequipos.com

- **CBR:** Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia del suelo compactado, en tanto a nosotros en la investigación nos dará la diferencia que se tendrá entre un suelo natural y el suelo estabilizado.

Imagen 1.8 Equipo de CBR



Fuente: Topoequipos.com

- **Ensayo de desgaste de los Ángeles:** Este ensayo se realizará en dos partes: primero se seleccionará la muestra del suelo natural y se hará una prueba de desgaste, después se realizará otra prueba de desgaste con la muestra de suelo estabilizado, para luego analizar las dos muestras y ver si tuvo algún cambio entre los dos suelos.

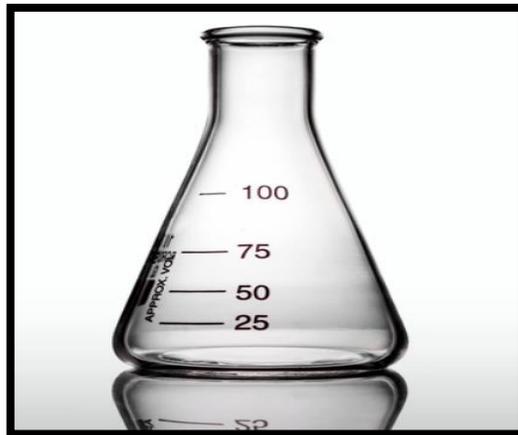
Imagen 1.9 Equipo de los Ángeles



Fuente: Aconstructoras.com

- **Matraz:** Consiste en un recipiente de vidrio generalmente con base circular o algo esférica y un cuello estrecho que se encuentra graduado, que se usa en laboratorios para medir líquidos, para el ensayo de peso específico del cemento se utilizara

Imagen 1.10 Matraz



Fuente: Labcomercial.com

- **Clasificación por el método AASHTO:** Este método clasifica a los suelos, de acuerdo a su composición granulométrica, su límite líquido y su índice de plasticidad, en siete grupos de A-1 a A-7.

Tabla 1.3 Clasificación por AASHTO

Clasificación	Granular (35 % o menos del total pasa N ° 200)						
	A-1		A-3	A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamices							
(Porcentaje que pasa)							
N °10	50 máx.						
N °40	30 máx.	50 máx.	51 min.				
N °200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción que pasa N °40							
Límite líquido				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.
Tipos usuales de materiales	Fragmentos pétreos , grava y arena		Arena fina	Limos o gravas arcillosas y arena			
Valor general	Excelente o Bueno						

Clasificación general	Limo-Arcillosos (más del 35 % del total pasa N °200)			
Grupo de clasificación	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5(a) A-7-6(b)
Análisis de tamices				
N °10				
N °40				
N °200	36 min.	36 min	36 min	36 min
Fracción que pasa N <sup>o</sup> 40				
Límite líquido	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min
Tipos usuales de materiales	Suelos limosos		Suelo arcillosos	
Valoración general	Regular a pobre			

Fuente: AASHTO

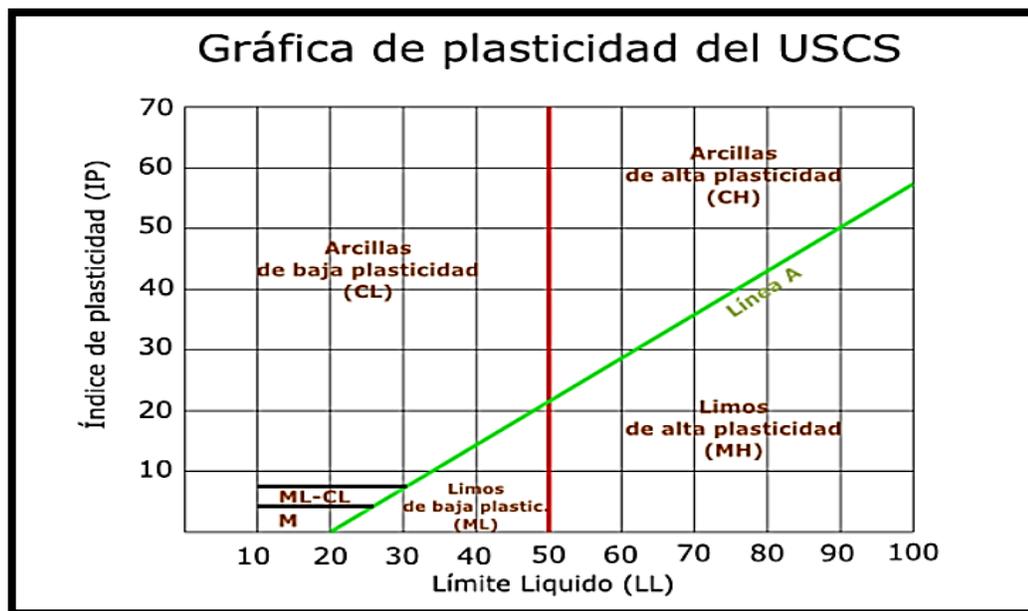
- **Sistema unificado de clasificación de suelos:** es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras.

Tabla 1.4 Sistema unificado

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien gradada	W
Arena	S	Pobremente grada	P
Limo	M	Limosa	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánica	O	Limite liquido alto (>50)	L
Turca	Pt	Limite liquido bajo (<50)	H

Fuente: Sistema Unificado

Gráfico 1.1 Carta de plasticidad del USCS



Fuente: Sistema Unificado

Se nombrará los ensayos que se realizará en la investigación

### Caracterización del suelo

- **Granulometría:** A través de esta prueba, las partículas de la muestra de suelo se distribuirán para clasificar el suelo y conocer el tipo de suelo a tratar.
- **Límites de Atterberg:** Este ensayo se define como los límites de los contenidos de humedad que caracteriza los cuatro estados de consistencia del suelo de grano fino: estado semisólido estado plástico y estado semilíquido, con estos parámetros

nos ayudará a clasificar mejor en la tabla AASHTO.

- **Compactación:** Es aquel ensayo que tiene como objetivo determinar el peso unitario máximo y la humedad óptima de una muestra de suelo
- **CBR:** El ensayo de CBR determina la capacidad de soporte mediante la compactación del suelo con humedades óptimas y niveles de energía variables es un parámetro muy importante en la capa base.

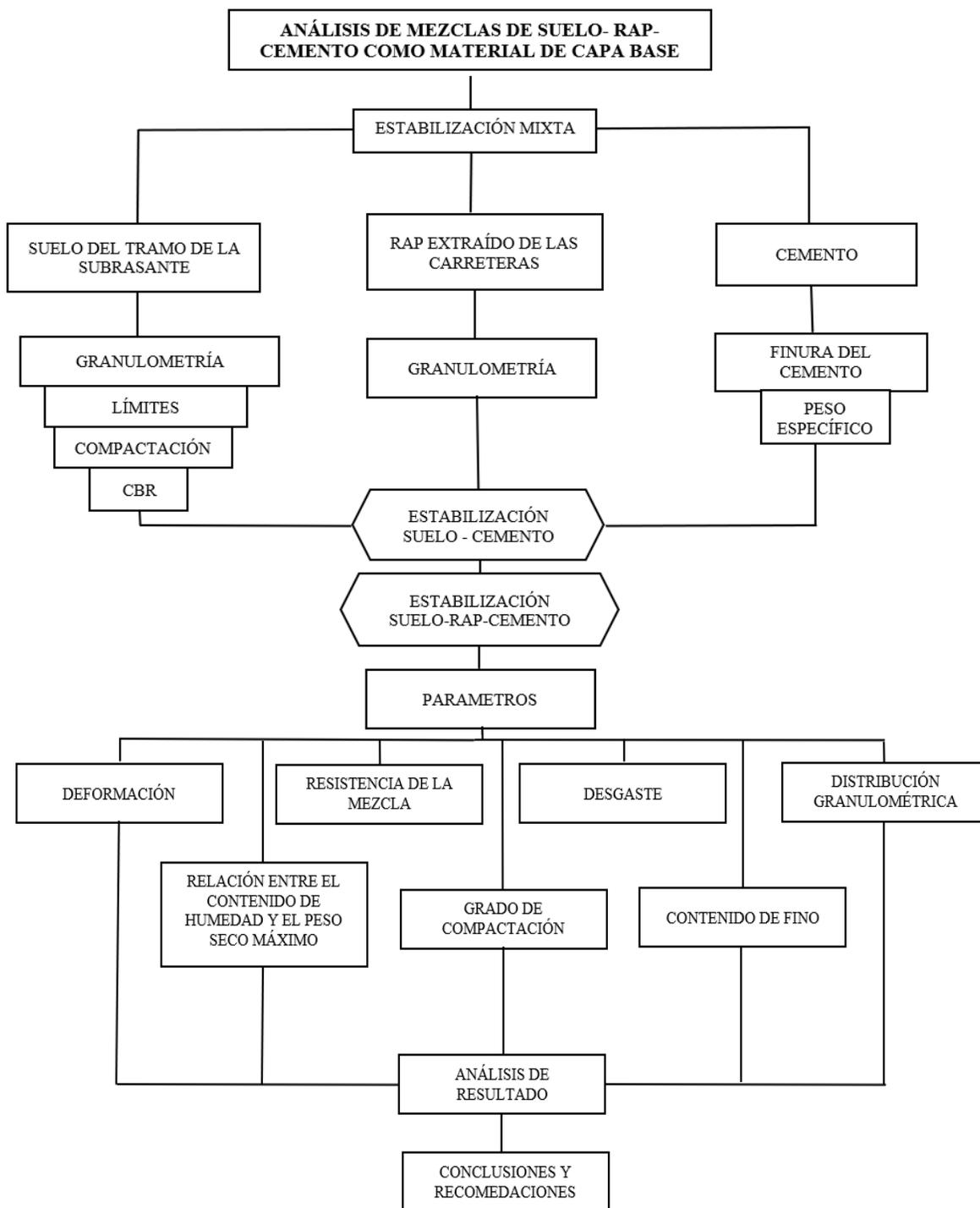
#### **Caracterización de cemento PUENTE IP-30**

- **Finura del cemento:** El ensayo de finura se define como una propiedad más importante del cemento ya que determina la medida de velocidad de hidratación, como también el calor de hidratación y adquisición de resistencia del cemento.
- **Peso específico:** Este ensayo tiene un objeto de encontrar el peso de la sustancia entre el volumen que esta ocupa, de esta forma los parámetros del cemento se conocerán durante el uso.

#### **Caracterización de RAP**

- **Granulometría:** En RAP, el material se triturará y el material más grueso se clasificará para su uso en la mezcla.

Gráfico 1.2 Flujograma de investigación



Fuente: Elaboración propia

#### 1.4.2.4 Procedimiento de aplicación

En este estudio, se pretende estudiar el análisis de mezclas de suelo – RAP – cemento. Sin embargo, el análisis también se llevará a cabo con diferentes porcentajes de RAP y cemento, el objetivo es preparar al menos 3 mezclas diferente para diversos ensayos. A continuación, se enumerará una tabla que contiene el porcentaje de cemento por el tipo de suelo a utilizar.

Rangos más adecuados de cemento para estabilización con respecto a la clasificación del suelo:

Tabla 1.5 Dosificación de suelo - cemento

Clasificación del suelo por el sistema A.A.S.H.T.O			Peso de cemento para estabilización (%)
Suelo granular	A1	A-1-a A-1-b	5-7 7-9
	A2	A-2-4 A-2-5 A-2-6 A-2-7	7-10
	A3		8-12
Suelo fino	A4		8-12
	A5		8-12
	A6		10-14
	A7	A-7-5 A-7-6	10-14

Fuente: Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, Vol. 37, No 1 (2019)

La investigación comienza con la localización y extracción del material de una subrasante de un tramo carretero donde se extraerá al menos 30 muestras representativas. Los materiales que se utilizarán para el análisis de la mezcla son RAP y cemento.

Después de extraer el material en sacos de bolsas se llevará a laboratorios donde se realizará un cuarteo para separar el material y retirar los materiales orgánicos del suelo, luego proceder con ensayos a caracterizarlo, para esto se planean los siguientes ensayos:

-  **Granulometría de suelos**
-  **Límites de Atterberg**
-  **Compactación**

### **CBR**

En tanto al cemento será comprado de alguna agencia de la ciudad de Tarija después será sometido a ensayos de caracterización como se menciona

### **Finura del cemento**

### **Peso específico**

El RAP será recolectado de las carreteras donde se desecha, se traerá en bolsas de 25 kilogramos y se triturará para su utilización del material grueso seleccionado por el ensayo de:

### **Granulometría**

Posteriormente de obtener las características de cada material a utilizar, se procederá a mezclar los tres materiales con diferentes porcentajes de RAP como cemento, se utilizará el **ensayo de proctor modificado** para la estabilización mecánica.

Para fines de investigación, se espera que se analicen tres muestras con diferentes porcentajes de RAP, en tanto al cemento se hará una dosificación para encontrar el contenido óptimo y tomar un dato base dependiendo de sus características analizadas, se tomara datos de la tabla de dosificaciones suelo cemento, dependiendo del tipo del suelo, para luego determinar el rendimiento obtenido a través de la combinación de los materiales, se procederá a evaluar los parámetros de la mezcla

### **Deformación**

### **Resistencia de la mezcla**

### **Relación entre el contenido de humedad y el peso seco máximo**

### **Grado de compactación**

Se evaluará la mezcla con los ensayos:

### **CBR**

### **Compactación**

Por último, se tomará una probeta estabilizada con suelo-RAP-cemento, se triturará la mezcla para realizar los ensayos

### **Desgaste**

### **Contenido de fino**

### Distribución granulométrica

Finalmente, se analizarán los resultados de cada molde con sus dosificaciones respectivas y se hará una comparación tanto del suelo natural como del suelo compactado, para establecer las conclusiones de la investigación.

### **1.4.3 Análisis estadísticos**

#### **Estadística Descriptiva**

Podemos definir a la estadística como la parte de las matemáticas que proporciona las herramientas necesarias para analizar, entender e interpretar un conjunto de datos.

Las variables estadísticas se pueden clasificar por diferentes criterios. Según su medición existen dos tipos de variables:

**Cualitativa (o categórica):** son las variables que pueden tomar como valores cualidades o categorías.

**Cuantitativas (o numérica):** variables que toman valores numéricos.

### **MEDIDAS DE POSICION**

#### **La media aritmética**

La media aritmética es probablemente la medida de posición más relevante porque es muy sencilla de interpretar se calcula como la suma de todos los valores de la muestra dividida entre el tamaño muestral:

#### **La media aritmética ponderada**

En ocasiones resulta interesante ponderar a la media aritmética por diferentes motivos. ponderar la media consiste en dar distintos pesos a los distintos valores que tome la variable.

#### **La media geométrica (G)**

La media geométrica de una muestra se define como la raíz  $N$ -ésima del producto de los  $N$  valores de la distribución, es decir, podemos decir que la media geométrica nos indica la cantidad que, al elevarla a  $N$ , nos da el producto de los datos de la muestra.

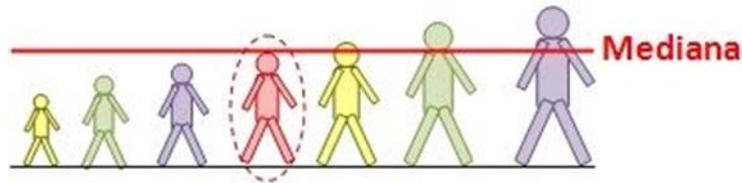
#### **La media armónica (H)**

Suele utilizarse para promediar velocidades, tiempos, rendimientos, etc.

#### **La mediana (Me)**

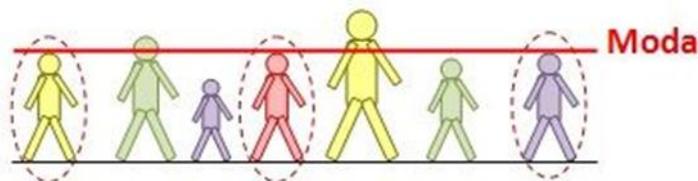
La mediana es el valor que se encuentra en la posición central de la distribución, es decir,

que deja a su izquierda y a su derecha el 50% de los datos respectivamente. Para calcularla debemos ordenar los datos de menor a mayor y buscar el valor que se encuentre en la posición central



### La moda (Mo)

La moda es el valor de la variable que más veces se repite. Para calcularla basta con buscar en la distribución de frecuencias el valor de la variable que presenta la máxima frecuencia.



### Los cuantiles

Los cuantiles son medidas que dividen la distribución en partes iguales la distribución, o, dicho de otro modo, en intervalos que contienen el mismo número de datos.

Los más utilizados son:

- Los **cuantiles**: Son tres valores que dividen la distribución en cuatro partes iguales, es decir, en cuatro intervalos dentro de cada cual están incluidos el 25% de los valores de la distribución.
- Los **deciles**: Son los nueve valores que dividen la distribución en diez partes que incluyen al 10% de los valores cada una.
- Los **percentiles**: Son los noventa y nueve puntos que dividen la distribución en cien partes iguales.

### Desviaciones medias

Las desviaciones medias obtienen el valor absoluto de las distancias entre la medida de posición considerada y los datos.

- **Desviación respecto a la media aritmética** La desviación media respecto a la media aritmética se define como la media de las distancias en a la media aritmética

en valor absoluto.

- **Desviación respecto a la mediana** La desviación media respecto a la mediana se obtiene como la media entre el valor absoluto de las distancias a la mediana.

### **La varianza**

La varianza es la media de las desviaciones con respecto a la media al cuadrado, es decir: Podemos decir que la varianza, junto con su raíz cuadrada son las medidas de dispersión con respecto a la media aritmética más importantes y por tanto más utilizadas.

### **Correlación y regresión.**

- La correlación pretende analizar el grado de dependencia estadística que presentan dos variables.
- La regresión pretende encontrar la estructura que relaciona dos variables, para tratar de estimar los valores de una de ellas a partir de los valores de la otra.
- En este sentido correlación y regresión están muy vinculadas y se estudiarán conjuntamente.

## **1.5 ALCANCE**

El alcance de la investigación llega con la idea de mejorar las características de la capa base de pavimento asfáltico, donde se pretende reutilizar material desechado de las carpetas asfálticas deterioradas (RAP), con un aglomerante que es el cemento para la cohesión de la mezcla. finalmente se realizará un análisis comparativo de la mezcla estabilizada con la mezcla de suelo natural, donde se realizará una conclusión si la investigación tuvo éxito en mejorar las propiedades de la capa base

En el primer capítulo se realiza un estudio bibliográfico para conocer acerca del tema donde se estudiará desde los pavimentos, suelos, cemento, RAP, se buscará plantear un problema que se tiene en la zona donde se quiere realizar el estudio, el más común es que no tenga las características adecuadas, está en contaminación del ambiente son desechos que se encuentra tirados al lado de las carreteras que no son reutilizados.

En el capítulo dos se hará un alcance a nivel teórico donde se conocerá cada concepto de cada material como también sus características o alguna información útil que se necesitaría en la investigación también se hablará de los tipos de estabilizaciones que existen.

El tercer capítulo se procederá a ubicar un tramo carretero de tierra donde se extraerá las muestras de suelo, se realizan pruebas de compactación y CBR. Con estos parámetros del suelo, se conocerá las propiedades del suelo. Con respecto al RAP, se realizará la recolección de material de la comunidad de Canaletas, luego se llevará a laboratorio donde seleccionará el material. Mientras que el cemento procederá a caracterizar dos pruebas de peso específico y finura de cemento

Después de obtener las características de cada material, se realizarán las pruebas, donde se dosificará el material del suelo de cemento dependiendo del tipo de suelo obtenido, para el RAP se colocarán diferentes porcentajes, se combinarán los 3 materiales que solo el RAP cambiará de diferentes porcentajes en la mezcla para encontrar el porcentaje óptimo de RAP.

Luego los moldes serán evaluados en diferentes parámetros de resistencia y deformación, por otra parte, se procederá a triturar la mezcla estabilizada y se realizarán nuevas pruebas con la mezcla, como la distribución granulométrica, el desgaste de los ángeles y el contenido fino, para observar la mezcla estabilizada.

Finalmente, se realizará un análisis comparativo de la capa base sin los materiales desechados (RAP), con la capa base analizada con los porcentajes agregados de material desechado para saber si la investigación fue exitosa en mejorar sus propiedades.

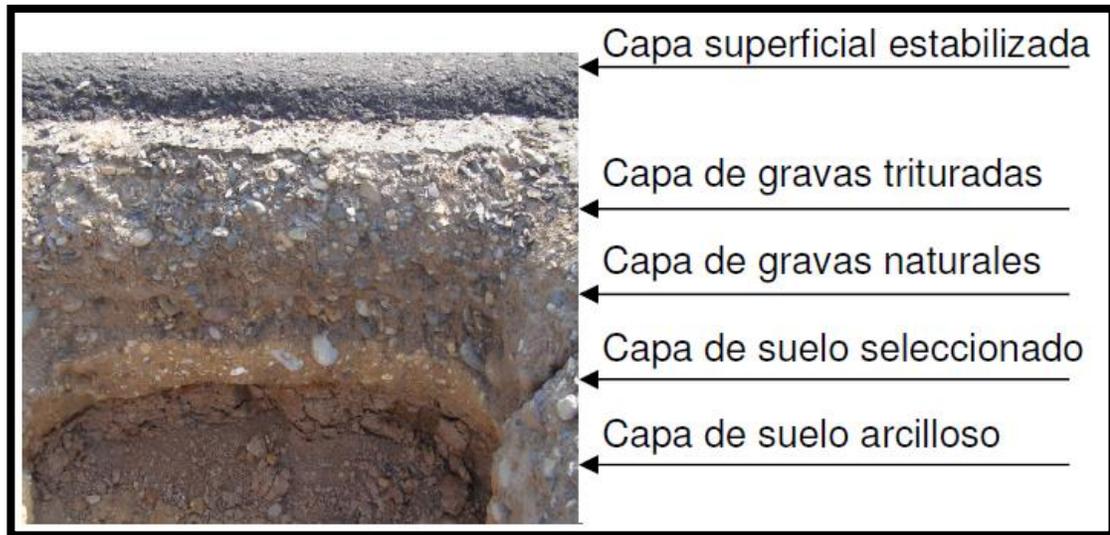
## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTACIÓN

#### 2.1 PAVIMENTOS

Un pavimento es una estructura constituida por capas de materiales cuya función es permitir la operación rápida, cómoda y segura de los vehículos en una carretera.

Gráfico 2.1 Capa de materiales encontrados al excavar un pavimento



Fuente: (Corro, 1992)

##### 2.1.1 Historia de los pavimentos

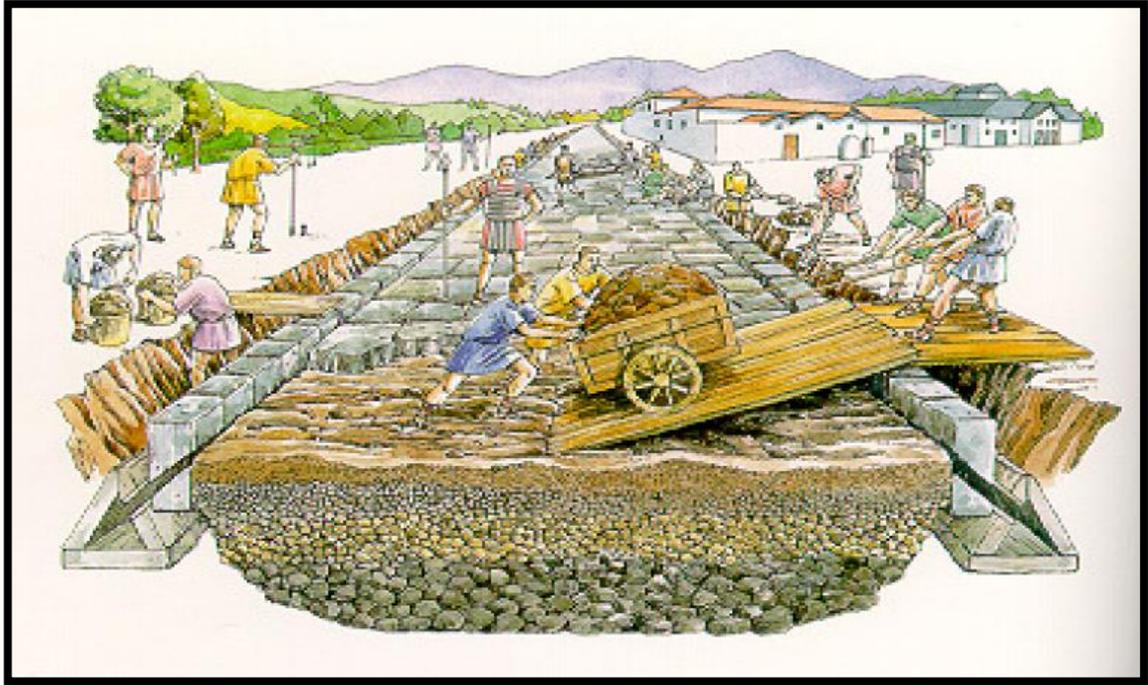
La historia de los pavimentos es tan antigua como el hombre mismo, antiguas culturas usaron losas de piedra para aumentar la estabilidad de sus caminos.

Las vías de comunicación en el imperio romano se construían excavando en la tierra hasta encontrar una capa dura de cimentación sobre la que se preparaba un lecho formado por una capa inferior de gravas de gran tamaño, capas de piedra machacada y losas o lajas de piedra.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX se comenzaron a pavimentar calles empleando riegos de alquitrán. Posteriormente, en Estados Unidos se emplearon mezclas fabricadas a partir de rocas asfálticas y de asfaltos naturales. Fue el norteamericano Richardson quien estableció las bases a partir de las cuales se consolidó la utilización de

los betunes asfálticos para la fabricación de mezclas asfálticas, que actualmente resultan básicas para la pavimentación.

Gráfico 2.2 Construcción de calzadas en el Imperio Romano



Fuente: (Corro, 1992)

## 2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

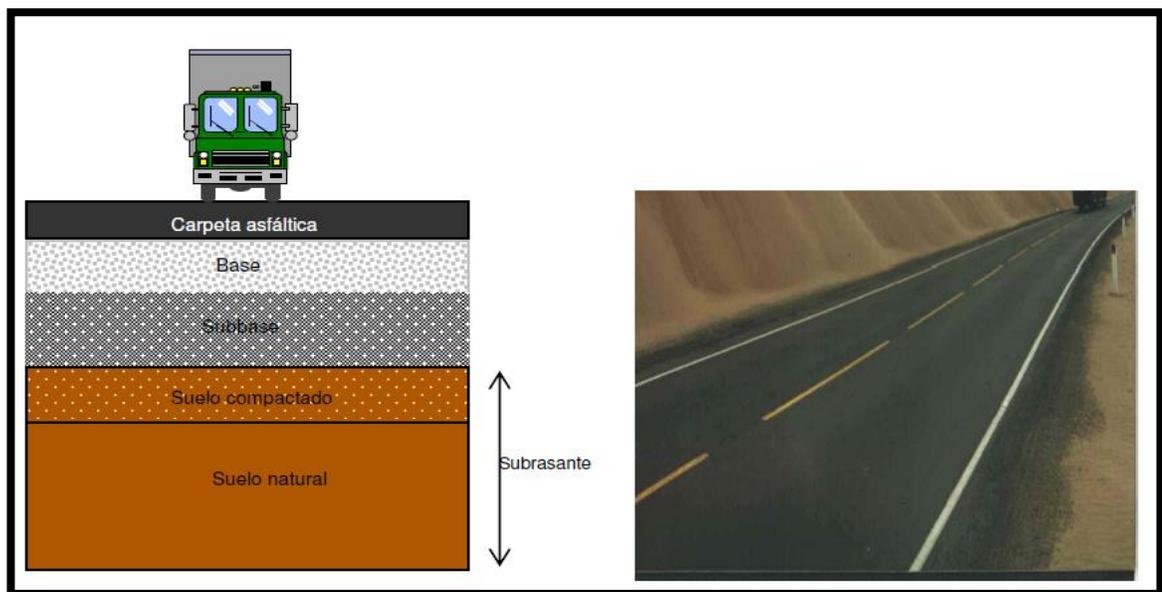
Las estructuras de pavimento están formadas por capas de diversos tipos de materiales y pueden variar ostensiblemente en función de las fuentes de materiales disponibles en cada región, sin embargo, se suelen distinguir los siguientes tipos de pavimento:

- Pavimento flexible
- Pavimento de capa asfáltica gruesa
- Pavimento rígido
- Pavimento semi-rígido o compuesto
- Pavimento articulado
- Pavimento de estructura inversa

### 2.2.1 Pavimento flexible

Este tipo de pavimentos está conformado por una delgada capa superficial construida sobre una o dos capas de material granular, denominadas base y subbase, las cuales se asientan sobre un suelo o capa denominada subrasante. La capa superficial está constituida por agregados pétreos tratados con ligantes bituminosos. Se le denomina pavimento flexible porque debido a las características viscoelásticas del bitumen, en comparación con otros tipos de pavimento, las cargas producen mayores deformaciones.

Gráfico 2.3 Estructura típica de un pavimento flexible



Fuente: (Corro, 1992)

La fundación del pavimento o subrasante.

Después de realizar las explanaciones para la construcción de una carretera, los materiales naturales que quedan expuestos en los cortes o en la parte superior de los terraplenes, no tienen capacidad mecánica suficiente para soportar las cargas de los vehículos, para aumentar su resistencia se compacta un espesor de suelo del orden de 20 cm y el conjunto suelo natural-capa de suelo compactado conforman el cimiento o subrasante del pavimento.

## La Base y La Subbase

La capa de base es la porción de la estructura de pavimento flexible inmediatamente debajo de la capa superficial. La función fundamental de esta capa es proporcionar un elemento resistente que atenúe los esfuerzos producidos por las cargas de tránsito para transmitirlos a la subrasante. La base comúnmente consta de agregados como piedra triturada, escoria triturada o grava triturada o sin triturar y arena, o la combinación de estos materiales. Como la parte inferior de esta capa va a estar sometida a menores esfuerzos, es posible reducir las características de resistencia mecánica del material en esta porción y transformarla en dos capas, la superior o capa de base propiamente dicha y la capa inferior denominada subbase. Las especificaciones para materiales de capa de base son superiores a las de materiales de subbase en los requerimientos de resistencia, estabilidad, dureza, tipos de agregados y gradación.

La capa de subbase se usa en general para reducir el costo total de construcción del pavimento. La subbase puede omitirse, si el espesor total de pavimento es relativamente delgado o si los suelos de la subrasante son de alta calidad.

Además de su función principal, las capas de subbase deben cumplir con otras funciones secundarias como:

- ✓ Evitar que los suelos de grano fino del lecho del camino se filtren dentro de las capas de base. Si la subbase está destinada a servir para este propósito, se deben especificar materiales de gradación densa o bien gradados.
- ✓ Reducir los efectos de la congelación. Para este propósito, se deben especificar materiales no susceptibles a la acción perjudicial del congelamiento.
- ✓ Ayuda a evitar la acumulación de agua libre dentro o debajo de la estructura del pavimento. Se debe especificar material que drene el agua de una forma relativamente rápida y se deben proporcionar los medios de coleccionar y eliminar el agua acumulada en la subbase.
- ✓ Impide que el agua de la subrasante ascienda por capilaridad y evita que el pavimento se degrade.
- ✓ Debe transmitir en forma adecuada los esfuerzos a la subrasante.

- ✓ En los cortes de roca, proveer una plataforma de trabajo para equipo de construcción o para construir las capas superiores del pavimento.

### Capa superficial

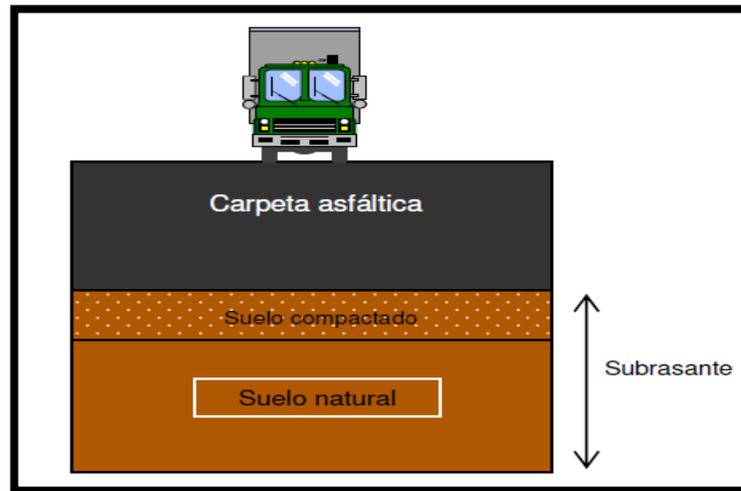
Además de su función como una parte estructural del pavimento, la capa superficial se debe proyectar para resistir las fuerzas abrasivas de tráfico, limitar la cantidad de agua superficial que penetra en el pavimento, proveer una superficie resistente a deslizamiento, y proporcionar una superficie uniforme y estable, de color y textura conveniente para proveer un excelente servicio a los usuarios de la vía. La capa superficial también debe ser durable, capaz de resistir fracturas y desmoronamientos sin llegar a ser inestable en las condiciones del tráfico y del clima.

Comúnmente construida sobre una capa de base, la capa superficial de una estructura de pavimento flexible consta de una mezcla de agregados minerales y de materiales bituminosos.

#### **2.2.2 Pavimento de capa asfáltica gruesa**

Los pavimentos de capa asfáltica gruesa están conformados por dos o más capas de mezcla asfáltica en caliente, colocadas directamente en el suelo, por lo que también se conoce como estructura full-depth. Este tipo de pavimento ha evolucionado y se considera que se deben construir tres capas asfálticas, cada una de ellas concebida para un desempeño particular en la estructura. La capa superficial debe garantizar adherencia con las llantas de los vehículos y baja deformación a altas temperaturas, la capa intermedia debe tener alta resistencia a la deformación y la capa inferior debe garantizar alta resistencia a la fatiga.

Gráfico 2.4 Estructura de pavimento de capa asfáltica gruesa

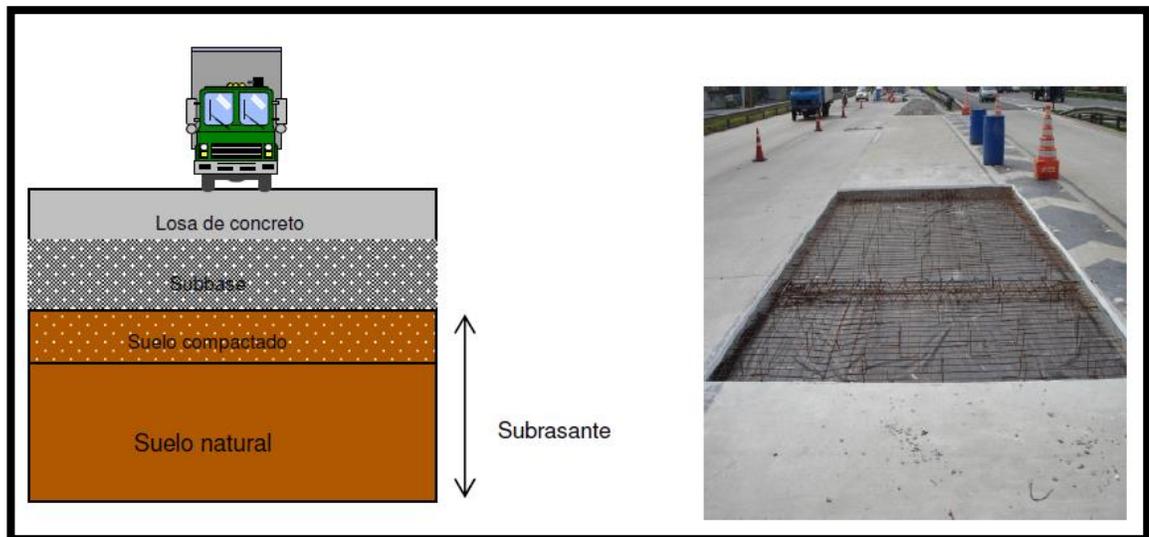


Fuente: (Corro, 1992)

### 2.2.3 Pavimentos rígidos

Este tipo de pavimento está constituido por losas de concreto hidráulico, las cuales están apoyadas sobre la subrasante o sobre una capa formada con materiales seleccionados denominada subbase del pavimento rígido. Este tipo de estructura debido a su gran rigidez transmite los esfuerzos a una zona muy amplia de las capas inferiores.

Gráfico 2.5 Estructura de pavimento rígido

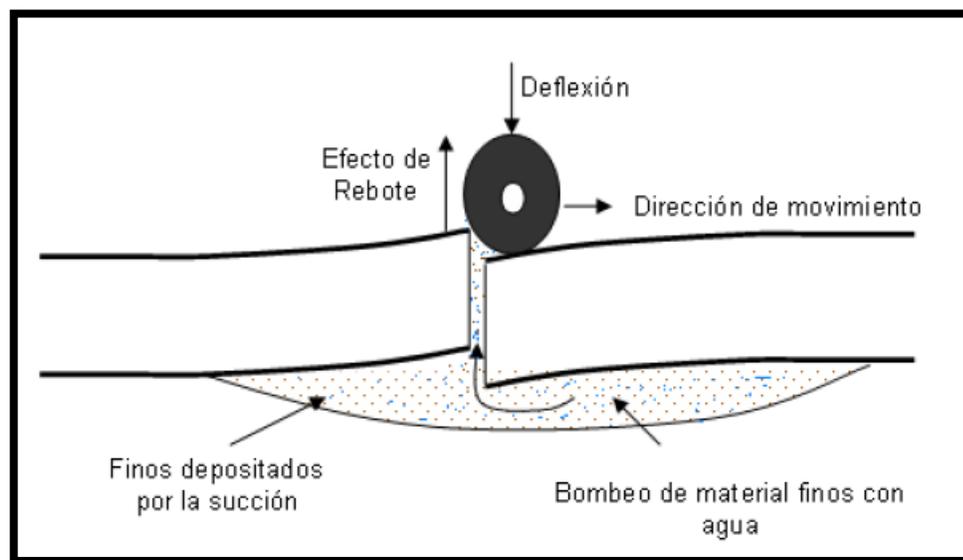


Fuente: (Corro, 1992)

## La subbase

La subbase en un pavimento rígido es la capa encargada de impedir el bombeo entre las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende como bombeo a la evacuación de material fino de la estructura de pavimento debido a la infiltración de agua a través de las juntas de las losas. Esta agua infiltrada causa un efecto de licuación en el material fino de la subrasante haciendo más fácil su evacuación a la superficie al estar sometidos a las presiones ejercidas por el tránsito sobre las losas.

Gráfico 2.6 Fenómeno de bombeo



Fuente: (Corro, 1992)

Así mismo esta capa funciona como elemento de transición y subministra un apoyo estable y permanente del pavimento. Adicionalmente, mejora notablemente el drenaje de la estructura y ayuda a evitar la acumulación de agua debajo de las losas. También aumenta la capacidad de soporte de suelo de subrasante.

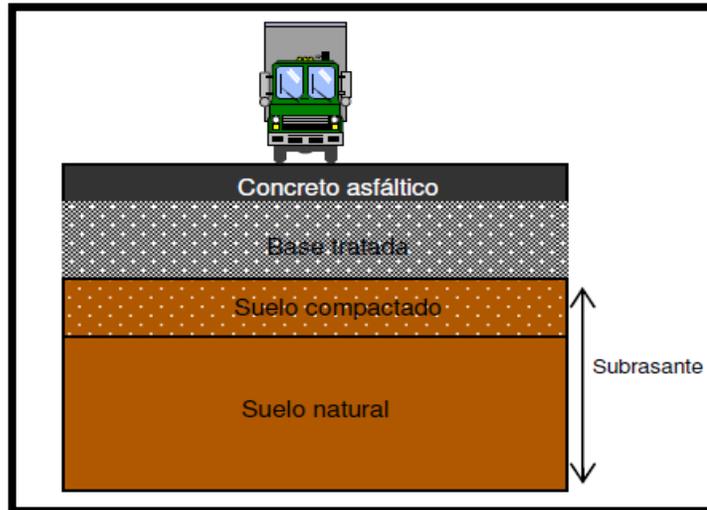
## Losa de concreto

Las funciones de la losa de concreto en un pavimento rígido son las mismas que cumple la carpeta asfáltica en un pavimento flexible y a su vez las losas de concreto deben cumplir la función estructural de soportar y transmitir un nivel de esfuerzos adecuado a las capacidades mecánicas de las capas inferiores.

### 2.2.4 Pavimento compuesto o semi-rígido

La estructura de este tipo de pavimento es muy similar a la de un pavimento flexible, la diferencia radica en que una de sus capas es muy rígida porque se ha estabilizado con cal, cemento o algún producto químico. El propósito de estos aditivos es mejorar o modificar las características mecánicas de los materiales ya que no son las ideales, teniendo en cuenta que los materiales apropiados para dicha obra están muy distantes y su adquisición aumentaría notablemente los costos de la construcción. La función de la capa estabilizada es proporcionar una base muy fuerte y la mezcla asfáltica proporciona una superficie uniforme no reflectiva y que garantiza adherencia con las llantas de los vehículos.

Gráfico 2.7 Estructura de capas de un pavimento semi-rígido

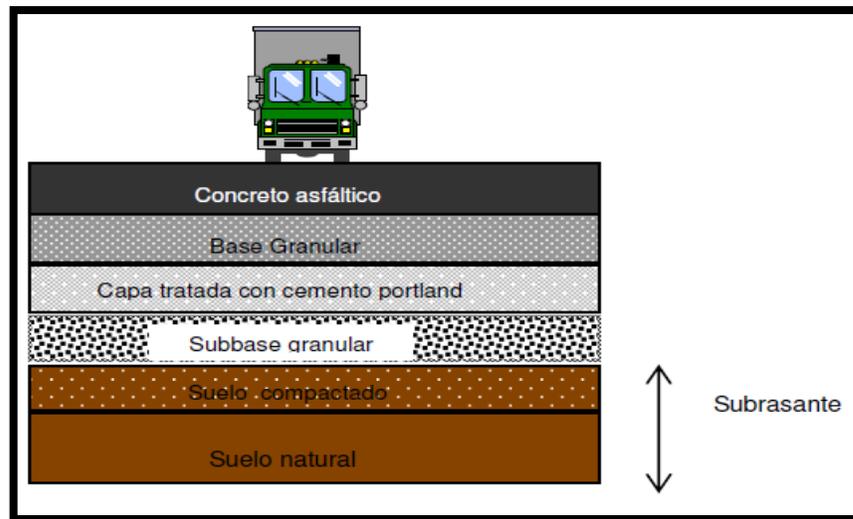


Fuente: (Corro, 1992)

### 2.2.5 Pavimento de estructura inversa

El pavimento de estructura inversa se caracteriza por tener mayor espesor y rigidez en las capas de apoyo que en las capas de la parte superior de la estructura. Entre las capas que conforman este pavimento se encuentra una capa base tratada con cemento portland, la cual actúa como una sólida plataforma de trabajo para la construcción de la capa base granular y además reduce las tensiones en la base granular y en la capa de asfalto. La capa de grava no tratada o base granular, impide el remonte de fisuras transversales de retracción que se producen en la capa tratada con cemento.

Gráfico 2.8 Pavimento de estructura inversa

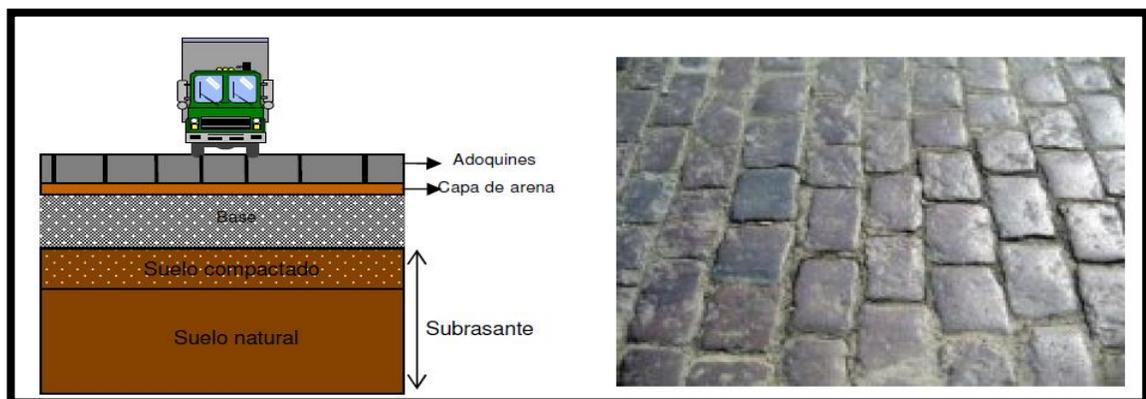


Fuente: (Corro, 1992)

### 2.2.6 Pavimento articulado

Los pavimentos articulados están formados por una capa de rodadura la cual esta elaborada con bloques de concreto o piedra (adoquines). Estos se pueden colocar sobre una capa delgada de arena la cual, a su vez se apoya sobre una capa de base granular o directamente sobre la subrasante dependiendo de la calidad de esta y dependiendo de la magnitud y frecuencia de las cargas que circulan por la vía.

Gráfico 2.9 Estructura de pavimento articulado



Fuente: (Corro, 1992)

### La Base

Es la capa colocada entre la subrasante y la capa de rodadura. La función primordial de esta capa es aumentar la capacidad de la estructura de pavimento. Esta capa puede estar compuesta por dos o más materiales seleccionados. Se podrán utilizar bases de material granular, suelos estabilizados o concreto pobre.

### Capa de arena

Esta capa es colocada directamente sobre la base. La capa de arena es de poco espesor y el material usado es arena gruesa y limpia que sirve como asiento para colocar uniformemente los adoquines.

### Adoquines

Los adoquines deben tener propiedades y características similares para poder resistir adecuadamente las cargas de tránsito y fundamentalmente el desgaste producido por éste.

### Sello de arena

Este sello está constituido por arena muy fina que es colocada entre las juntas entre los adoquines y su principal función es servir de sello a las juntas y contribuir al funcionamiento de la estructura en conjunto con los demás elementos de la capa de rodadura. La arena que se utilizará para sellar las juntas entre adoquines debe estar libre de materia orgánica y elementos contaminantes.

## **2.3 LA FUNDACIÓN DEL PAVIMENTO O SUBRASANTE**

La subrasante es aquella parte de la estructura que tiene como función servir de soporte de las otras capas del pavimento. De la calidad de esta capa depende en gran medida el espesor que debe tener un pavimento.

Para dimensionar un pavimento es necesario determinar: la capacidad mecánica de los suelos que servirán de fundación a las capas de la estructura, la sensibilidad del suelo a la humedad en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variación de volumen (hinchamiento y retracción).

Como parámetro de caracterización se emplea la rigidez del suelo o resistencia a la deformación bajo las cargas de tránsito. La subrasante se puede construir con suelos en su estado natural o suelos con algún proceso de mejoramiento como la estabilización mecánica o química, entre otras.

Ciertos materiales resultan inapropiados como material de subrasante como por ejemplo: los Suelos clasificados como A-8 (según AASHTO), debido a que son altamente compresibles, están conformados principalmente de materia orgánica y tienen una baja resistencia al corte.

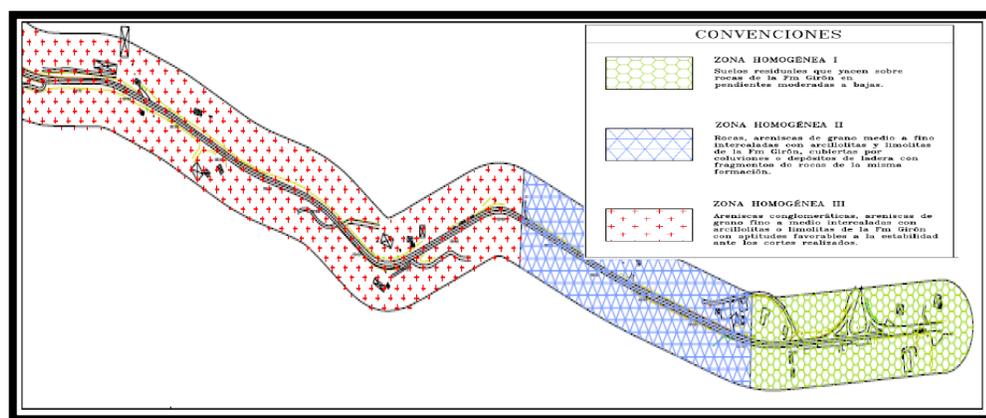
## 2.4 CARACTERÍSTICAS DE UN SUELO PARA SUBRASANTE

El estudio de la subrasante para diseño de pavimentos, comprende diferentes etapas:

Fase de selección de unidades homogéneas de diseño: Debido a la extensión de las zonas que atraviesa una carretera, el pavimento se apoya sobre diversos tipos de formaciones geológicas y en consecuencia en un tramo de carretera se pueden presentar diversos tipos de suelos en la subrasante.

Para definir una capacidad de soporte es necesario separar por zonas o unidades donde los materiales encontrados presenten características similares. La delimitación de las unidades homogéneas de diseño se realiza con base en las características: geotécnicas, climática, topográficas y de drenaje.

Gráfico 2.10 Zonas geológicas atravesadas por una carretera



Fuente: (Corro, 1992)

a. Delimitación de formaciones geológicas: Una primera sectorización se puede realizar con base en el estudio de las formaciones geológicas que sean identificadas en el trazado del proyecto vial. Con base en un mapa en el que se localicen las formaciones de suelos y el trazado de la vía, se establecen las abscisas de inicio y finalización de una unidad de diseño.

b. Determinación del perfil geotécnico de los suelos: De manera más precisa la ejecución de perforaciones en el terreno, permite identificar las cantidades y extensiones de suelos existentes en la zona del proyecto, la manera como estos están dispuestos en capas y conocer profundidades de ubicación del nivel freático. El número de perforaciones necesarias para conocer el perfil del suelo, se basa en la experiencia dependiendo de la uniformidad del suelo. Un menor número de muestras o un mayor espaciamiento de las perforaciones conlleva mayores riesgos en el diseño, un número muy grande de muestras genera un elevado costo de la fase de diseño. El espaciamiento de las perforaciones debería ser el menor posible y que permita mantener los costos del diseño en límites razonables.

En vías con altos volúmenes de tránsito se debería reducir el riesgo de que la estructura de pavimento quede cimentada en materiales que no fueron ensayados durante la etapa de diseño. En los sitios donde los materiales tuviesen una menor capacidad de soporte que la de diseño, el pavimento se degradaría tempranamente y las reparaciones respectivas ocasionarían cierres, molestias y mayores costos de operación a un gran número de usuarios de la vía.

La presencia de camiones con mayores cargas por eje, altera los esfuerzos en capas de suelos que se encuentran a mayor profundidad. Para la ubicación, profundidad y definición del número de perforaciones, podría adoptarse como guía:

En proyectos de construcción de vías importantes, un sondeo cada 250 metros, obteniendo muestras de suelos hasta 1.5 metros de profundidad por debajo del nivel de subrasante de la vía.

En proyectos viales de bajo volumen de tránsito, un sondeo cada 500 metros, obteniendo muestras de suelos hasta 1.0 metro de profundidad por debajo del nivel de subrasante de la vía.

Los datos que se deben tomar de cada una de las perforaciones realizadas son: El espesor de las capas encontradas y su posición exacta en sentido vertical, así como la identificación visual de los materiales, indicando su color y consistencia. Además, se debe registrar, la posición del nivel freático en caso de observar su presencia.

Se debe tomar una muestra de las diferentes capas de suelo encontradas en cada perforación realizada, dichas muestras pueden ser alteradas o inalteradas.

c. Ensayos de laboratorio a las muestras obtenidas para determinar sus propiedades generales en relación con la estabilidad y capacidad de soporte de la subrasante: Es necesario establecer las propiedades físicas de cada uno de los suelos muestreados y también conocer su comportamiento bajo diversas condiciones, por esta razón se realizan diversas pruebas como:

- ✓ Determinación del contenido de humedad, límite plástico y límite líquido El contenido de humedad de un suelo, puede indicar posibles comportamientos del mismo al ser utilizados como subrasante, pues si el contenido de agua está cerca del límite líquido es probable que el suelo sea de baja capacidad portante y si el contenido de agua, por el contrario, es cercano al límite plástico este tipo de suelo podría presentar una mayor resistencia mecánica
- ✓ Análisis de granulometría: Los resultados de esta prueba permiten clasificar el suelo, el cual puede pertenecer a alguno de los siguientes grupos, o ser una combinación de los mismos,
  - Grava: Estos áridos son partículas granulares de material pétreo de tamaño que se origina por fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial. Como subrasante de un pavimento es muy estable, ofrece una alta capacidad portante y permitiría construir una estructura de menor espesor.
  - Arena: Son partículas de tamaño medio con menor capacidad de soporte que las gravas, pero superior a la de los suelos finos como arcillas y limos
  - Limo: Los limos son fracciones microscópicas del suelo de tamaño intermedio entre la arcilla y la arena. Su capacidad de soporte varía de baja a media.
  - Arcilla: Las arcillas son principalmente partículas submicroscópicas en forma de escamas, las cuales presentan muy poco espacio entre sí. La arcilla tiene la

habilidad de retener el agua. Se caracteriza por un pobre drenaje y baja capacidad portante.

- ✓ Determinación de densidad de campo y grado de compactación del suelo: Alta densidad de los suelos se relaciona con alta resistencia.

d. Determinación del suelo típico de subrasante para una unidad de diseño: después de determinar las propiedades de las diferentes capas de suelo como son granulometría, el límite líquido y límite plástico se procede a dibujar un perfil del suelo, el cual permite identificar las características propias del terreno donde se va a ejecutar la obra y delimitar las zonas que se van a considerar homogéneas.

2.1.2 Fase de selección de la resistencia o capacidad de soporte para diseño: Los suelos de subrasante normalmente no alcanzan la falla por esfuerzo cortante, pero los pavimentos fallan por deformaciones y fisuras. Las deformaciones se acumulan y se hacen notorias después del paso de muchas repeticiones de carga y las fisuras aparecen, en los materiales tratados con ligantes, debido a la fatiga por la aplicación reiterada de cargas.

En la caracterización mecánica de un suelo de subrasante es más importante establecer las relaciones esfuerzo-deformación ante un gran número de sollicitaciones de carga que la capacidad última de los materiales bajo una carga de mayor magnitud.

Modulo resiliente:

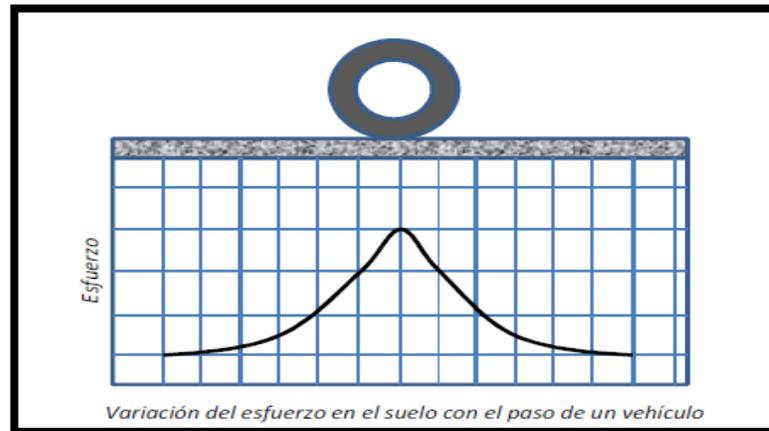
El parámetro más empleado para definir la capacidad de soporte de una subrasante es el módulo resiliente, parámetro similar al módulo elástico de un material, pero en el cual las deformaciones que se emplean solamente incluyen la componente recuperable de las mismas.

$$\text{Modulo Resiliente}(Mr) = \frac{\text{Esfuerzo axial}}{\text{Deformación axial recuperable}}$$

- El módulo resiliente proporciona la relación básica entre esfuerzo y deformación de los materiales y es un parámetro usado en el análisis estructural de sistemas estratificados. Este ensayo se realiza teniendo en cuenta diversas condiciones ambientales y de estado de esfuerzos, las cuales simulan las cargas de tránsito a las que se someterá la estructura.

Una rueda que se mueve imparte un pulso dinámico a todas las capas de pavimento y a la subrasante. Como respuesta a este pulso dinámico, cada capa de pavimento sufre una deflexión. El pulso solicitante varía desde un valor muy bajo hasta un máximo en un breve periodo, en función de la velocidad del vehículo.

Gráfico 2.11 Esfuerzos en la subrasante con el paso de una llanta de vehículo



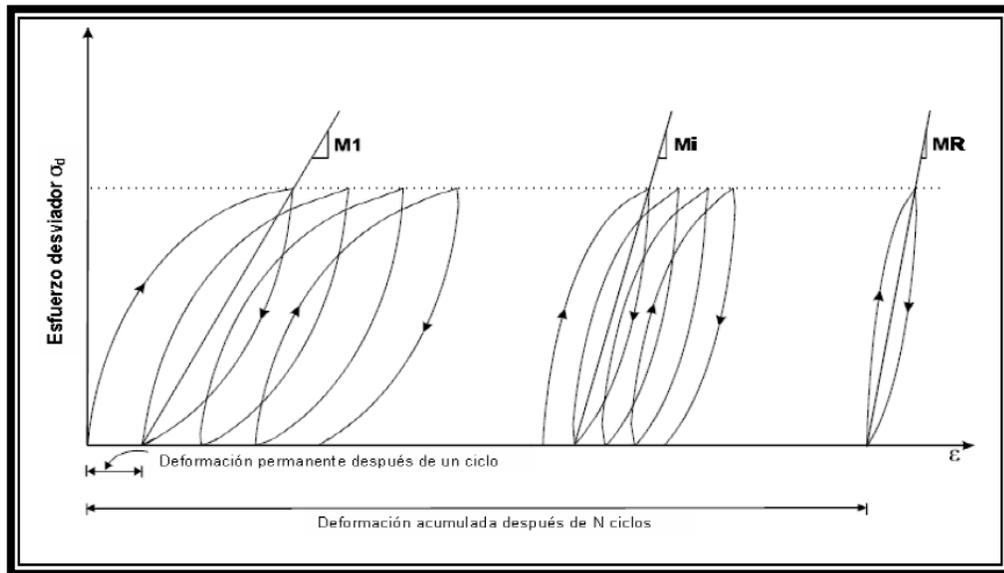
Fuente: (Corro, 1992)

Para tratar de simular en laboratorio este tipo de solicitación se practican ensayos triaxiales sobre una muestra de suelo, aplicando diversas presiones de confinamiento y pulsos de carga axiales que ejemplifican la carga de la llanta.

Este no es un ensayo a rotura y muestra el comportamiento del material bajo cargas repetidas. A medida que el material está sujeto a la acción de la carga se deforma y recupera cuando se retira la carga, sin embargo, el material nunca se recupera a su forma original y alguna deformación permanece. La deformación recuperable es la deformación resiliente y la deformación que permanece se denomina plástica, la cual bajo carga móvil y repetida, tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles. La magnitud relativa de las deformaciones plástica y resiliente influyen el comportamiento del material.

En el gráfico 2.12 se ilustra el mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando; debe hacerse notar el hecho de que en los ciclos intermedios la deformación permanente disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales.

Gráfico 2.12 Mecanismo de deformación permanente en los pavimentos



Fuente: (Corro, 1992)

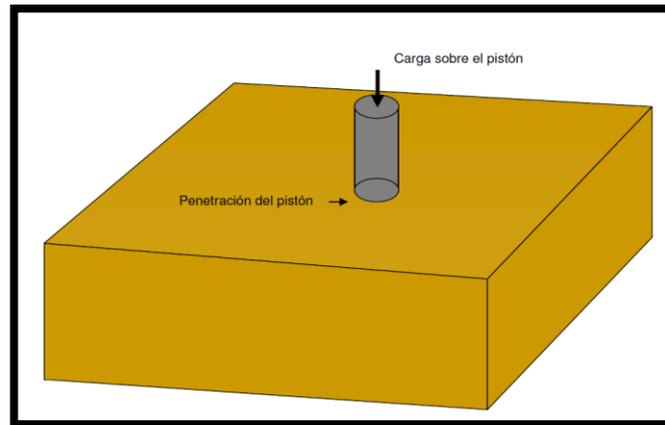
La muestra de suelo llega así a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente (en donde el módulo secante es igual al módulo resiliente).

Por tratarse de una propiedad de difícil determinación en laboratorio y aún mas difícil en su análisis, se suele aceptar la caracterización del suelo con ensayos menos apropiados pero de más fácil ejecución como el CBR y el ensayo de placa.

- Ensayo de CBR (California Bearing Ratio): (AASHTO-T193-63): La relación de soporte de California (CBR) es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, este parámetro es aplicado principalmente en el diseño de pavimentos flexibles y en el control de calidad de materiales empleados en la construcción de carreteras.

Se realiza aplicando una carga sobre la superficie del suelo con un pistón circular de 1,95 plg. de diámetro (área de sección transversal, 3 plg<sup>2</sup>) y se hace penetrar en el terreno a una velocidad de 0.05 pulgadas por minuto.

Gráfico 2.13 Esquema de ensayo de CBR



Fuente: (Corro, 1992)

El número CBR se obtiene como la relación entre la presión necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón dentro de la muestra de suelo y la presión requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar, esto se expresa:

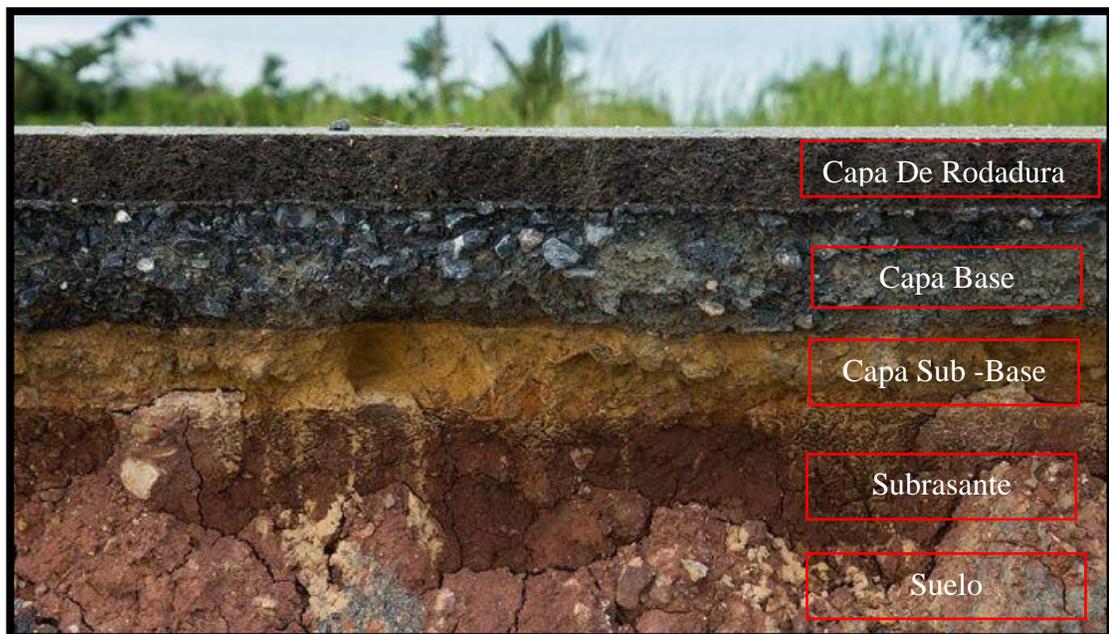
$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patron}} \times 100$$

- Ensayo de carga directa sobre placa: (AASHTO D1195 y D1196): Con esta prueba se evalúa la capacidad portante de la subrasante, de las bases y en ocasiones de los pavimentos completos. Aunque esta prueba generalmente se usaba en pavimentos rígidos actualmente también se usa en los flexibles. El ensayo se hace cargando una placa circular en contacto estrecho con el suelo, midiendo las deformaciones finales correspondiente a los distintitos incrementos de carga utilizados. Con esta prueba se puede obtener el módulo de reacción de una subrasante que son las presiones necesarias que se transmitirán a la placa para producir en el suelo una deformación prefijada.

## 2.5 COMPONENTES DE UN PAVIMENTO

En la Imagen 2.1 se muestra esquemáticamente, los componentes principales de un pavimento asfáltico. Se puede considerar que la estructura de un pavimento está formada por una superestructura encima de una fundación, esta última debe ser el resultado de un estudio geotécnico adecuado. En los pavimentos camineros, la superestructura está constituida por la capa de revestimiento y la capa base; la fundación está formada por las capas de sub-base y suelo compactado.

Imagen 2.1 Sección típica pavimentos



Fuente: Instituto Tecnológico de Aeronáutica Ingeniería en Pavimentos

- |                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| 1. Capa de rodadura | 4. Suelo compactado |
| 2. Capa base        | 5. Subrasante       |
| 3. Capa sub-base    |                     |

- **Capa de rodadura:** Es la capa superior del pavimento, la conforman mezclas bituminosas. Aguanta de forma directa al tráfico. Requiere de ciertas cualidades para su máxima funcionalidad tales como: Regularidad superficial lo que implica inexistencia de desnivelaciones u ondulaciones longitudinales y transversales. Textura superficial que permite garantizar la resistencia al deslizamiento. Impermeabilidad, necesaria para evitar la entrada del agua a las capas inferiores y daños significativos.

- **Capa base:** Es la parte estructural más importante, por ende, deben utilizarse los mejores materiales. Su función principal es distribuir y transmitir a la sub-base las cargas que generan el tránsito y mediante ella a la subrasante.
- **Sub-base:** Es la capa que se encarga fundamentalmente de soportar, transmitir y distribuir uniformemente las cargas aplicadas a la superficie de rodadura. Se coloca entre la subrasante y la capa de base.
- **Subrasante:** Esta capa tiene como finalidad soportar las cargas de la base o subbase haciendo que se distribuyan debidamente a las capas de pavimento subsecuentes. Es muy importante porque le otorga soporte.

La capa de rodadura o revestimiento asfáltico tiene las siguientes funciones:

- Impermeabilizar el pavimento, para que las capas subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte.
- Proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda.
- Reducir las tensiones verticales que la carga por eje actúa sobre la capa base, para poder controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.

La capa base tiene las siguientes funciones:

- Reducir las tensiones verticales que las cargas por eje actúan sobre las capas sub-base y suelo natural.
- Reducir las deformaciones de tracción que las cargas por eje actúan a la capa de revestimiento asfáltico.
- Permitir el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento, a través de drenajes laterales longitudinales.

La capa sub-base está constituida por un material de capacidad de soporte superior a la del suelo compactado y se utiliza para permitir la reducción del espesor de la capa base.

La capa de suelo reforzado, puede estar presente en una estructura de pavimento, para poder reducir el espesor de la capa sub-base.

El suelo compactado, es el mismo suelo del terraplén, que está escarificado y compactado una cierta profundidad dependiendo de su naturaleza o de las especificaciones del proyecto.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> (INSTITUTO TECNOLOGICO BRASIL 2000)

## 2.6 CAPA BASE

Concepto: es la capa que se encuentra bajo la capa de rodadura de un pavimento asfáltico. Debido a su proximidad con la superficie, debe poseer alta resistencia a la deformación, para soportar las altas presiones que recibe.

### 2.6.1 Características

#### Agregado grueso:

- El agregado grueso retenido en el tamiz N° 10 consistirá de fragmentos o partículas duras y resistentes de piedra, grava o escoria. No deben emplearse materiales que se fragmenten cuando son sometidos a ciclos alternos de heladas y deshielos o humedad y secado.
- El agregado grueso deberá tener un desgaste del 50% como máximo según la prueba de los Ángeles.

#### Agregado fino:

- El agregado fino que pase el tamiz N° 10 (2mm). Debe ser formado por arena natural u obtenerse por trituración y por partículas minerales finas que pasen el tamiz N° 200.
- La fracción que pase el tamiz N° 200 no será mayor que los dos tercios de la fracción que pase el tamiz N° 40. La fracción que pase el tamiz N° 40 tendrá un límite líquido no mayor del 25% y un índice plástico no mayor de 6.

Con índice plástico no mayor a 6,  $CBR \geq 80 \%$ , libre de material orgánico, material dentro de las curvas de la norma AASHO M-147-65.

Imagen 2.2 Construcción de capa base



Fuente: Constructora Derpet

## 2.6.2 Aplicaciones

Conformación de terraplenes, mejoramiento y estabilización de caminos, conformación del paquete estructural para vías, pistas aeroportuarias.<sup>2</sup>

Tabla 2.1 Especificaciones de las capas de pavimentos

<b>Prueba</b>	<b>Para sub - base</b>	<b>Para base</b>
CBR mínimo	20	80
Limite líquido, máximo	25	25
Índice plástico máximo	6	No plástico
Equivalente de arenas, mínimo	25	35
Material que pasa el tamiz N °200, máximo	10	5

Fuente: DACRUZ – BOLIVIA

## 2.6.3 Construcción de capa base con material granular

### 2.6.3.1 Descripción

Esta especificación regula la calidad y gradación de las mezclas; la ejecución y control de la capa base de material granular natural y/o triturado, que constituye una capa de la estructura del pavimento, con espesor constante en toda la sección transversal. Esta capa se colocará debidamente compactada y regularizada, respetando el alineamiento, perfil y secciones transversales indicados en el proyecto. La base estabilizada granulométricamente está constituida por una capa granular colocada sobre la sub base, subrasante o sobre el refuerzo estructural compactada y regularizada. Esta capa será ejecutada con materiales previamente seleccionados

### 2.6.3.2 Materiales

La base estabilizada será ejecutada con materiales que cumplan los siguientes requisitos:

- a) Poseer una composición granulométrica encuadrada en una de las columnas de la siguiente tabla, recomendadas por la AASHTO M-147 de 1990.

---

<sup>2</sup> (DRACRUZ BOLIVIA)

Tabla 2.2 Gradación para material de capa base (AASHTO M-147-65)

Tamiz	Tipo de gradación unidad			
	A	B	C	D
2"	100	100		
1"	-	75 - 95	100	100
3/8"	30 - 65	40 - 75	50 - 85	50 - 80
N°4	25 - 55	30 - 60	35 - 65	35 - 65
N°10	15 - 40	20 - 45	25 - 50	25 - 30
N°40	8 - 20	15 - 30	15 - 30	10 - 30
N°200	2 - 8	5 - 15	5 - 15	0 - 15

Fuente: Manual de Carreteras volumen VII (ABC)

- b) La fracción que pasa el tamiz N° 40 deberá tener un límite líquido inferior o igual a 25 % y un índice de plasticidad inferior o igual a 6 %. Pasando de este límite, hasta 8 como máximo, el equivalente de arena deberá ser mayor que 30 %.
- c) La fracción fina de la capa base será arena triturada o natural. La fracción que pasa el Tamiz N° 200 de la serie U.S. Standard no debe ser mayor que dos tercios de la fracción que pasa el tamiz N° 40 de la misma serie
- d) El Índice Soporte de California (CBR) no deberá ser inferior a 90 % para pavimentos flexibles y la expansión máxima será de 0,5 %, cuando sean determinados con la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180D.
- e) El agregado retenido en el tamiz N°10 estará constituido de partículas duras y durables, exentas de fragmentos blandos, alargados o laminados y exentos de materia vegetal, terrones de arcilla y otras substancias perjudiciales. Los agregados gruesos deberán tener un desgaste no superior a 40 % a 500 revoluciones según lo determine el ensayo AASHTO T-96.
- f) El 50 % de las partículas retenidas en el tamiz N° 4, de la serie U.S. Standard, para los agregados utilizados para capa base en pavimentos flexibles deben tener al menos una cara fracturada por trituración.

Los materiales serán explotados de las fuentes mencionadas en el diseño.

La supervisión podrá indicar o aprobar otras fuentes, de acuerdo a su criterio.

### **2.6.3.3 Equipo**

Para la ejecución de la capa base el contratista podrá utilizar el siguiente equipo:

- a) Planta chancadora, dosificadora o seleccionadora según el caso.
- b) Equipo de extracción, carga y transporte.
- c) Distribuidor de capa base.
- d) Volquetas.
- e) Motoniveladora con escarificador.
- f) Camión regador.
- g) Rodillos compactadores lisos o de neumáticos, estáticos y vibratorios.
- h) Arados de discos y rastras.
- i) Tractores agrícolas con tracción en las 4 ruedas.

Los equipos de compactación y mezcla serán definidos de acuerdo con el tipo de material empleado.

### **2.6.3.4 Ejecución**

En general, la ejecución de la capa base estabilizada granulométricamente, comprende las operaciones de producción, distribución sobre plataforma o banco, mezcla y pulverización, humedecimiento o desecación, compactación y acabado, de los materiales transportados del yacimiento o planta, colocados sobre una superficie debidamente preparada, conformada monolíticamente y aprobada por la supervisión en el ancho establecido, en cantidades que permitan llegar al espesor diseñado luego de la compactación. El transporte del material se realizará en volquetas, el material será protegido con lona o algún material adecuado que apruebe la supervisión.

Antes de iniciar las operaciones constructivas, los trabajos topográficos para control del alineamiento y cotas de la capa base deberán estar concluidos. A distancias convenientes de los bordes de la superficie del camino, se colocarán estacas o señales aprobadas relacionadas con el eje para facilitar así el control de cotas.

Las mezclas de suelos y/o gravas con agregados triturados o los productos totales de trituración para encuadrarlas en la faja granulométrica especificada en el diseño, serán

dosificadas en una planta que tendrá como mínimo tres depósitos. Los materiales granulares naturales también serán seleccionados y dosificados en planta, cuando sea necesario para atender los requerimientos de las especificaciones.

El material de la capa base estabilizada granulométricamente al salir de la planta será homogéneo en humedad y granulometría. Cuando se inicia la construcción se determinará la pérdida de humedad entre la salida de la planta y la iniciación de las operaciones de compactación. De ahí en adelante, el contenido de humedad de la mezcla, al salir de la planta, será igual a la humedad óptima, para la compactación, aumentada en un porcentaje correspondiente a la pérdida por evaporación.

El material será inmediatamente esparcido sobre la superficie preparada mediante la utilización de un distribuidor adecuado de material granular para proceder a la compactación evitándose la concentración del tráfico sobre fajas limitadas de la capa inferior.

Si se presenta la necesidad de ejecutar la capa base con espesor final mayor a 20 cm, ésta será subdividida en capas parciales que no excedan de 20 cm. El espesor mínimo de cualquier capa de base será de 10 cm después de la compactación.

Las densidades de la capa acabada tendrán como mínimo 100% de la densidad máxima determinada según el ensayo AASHTO T-180 D, el contenido de humedad deberá variar como máximo entre  $\pm 2\%$  de la humedad óptima obtenida en el ensayo anterior.

El material será distribuido uniformemente sobre la capa inferior aprobada de modo que se evite la segregación y en cantidad tal que permita obtener el espesor programado después de la compactación.

Después de la obtención del contenido de humedad, se iniciarán las operaciones de compactación. Los rodillos recorrerán la capa que está siendo compactada, en trayectorias equidistantes del eje, a modo de sobreponer, en cada recorrido, mitad del rastro dejado en el recorrido anterior. En los alineamientos rectos se realizará de los bordes hacia el eje, en los tramos con curva del borde más bajo al borde más alto, repetidamente, hasta obtener el grado de compactación especificado en los planos. En las primeras pasadas se utilizará rodillo vibratorio.

Las pasadas sucesivas de un mismo rodillo compactador serán ejecutadas de modo de evitar que el retorno no sea en la misma sección. No será permitida la maniobra de los rodillos compactadores sobre la capa base que está siendo compactada.

En las partes adyacentes al inicio y al final de la capa base en construcción, la compactación será ejecutada transversalmente al eje. En las partes inaccesibles a los rodillos compactadores, así como las partes en que su uso no fuera deseable (cabeceras de obras de arte especiales), la compactación se ejecutará con compactadores vibratorios manuales o con saltarín mecánico.

Las operaciones de compactación deberán proseguir, hasta que, en todo el espesor y en toda la superficie de la capa base en construcción, el grado de compactación iguale al grado de compactación especificado. Entonces, se iniciará el acabado de la superficie.

La conformación de la superficie final de la capa base será ejecutada simultáneamente con la compactación de la última capa. El acabado de la superficie será ejecutado con rodillos lisos y de neumáticos, admitiendo cortes cuando necesario, pero no rellenos. Si hubiera necesidad de relleno, la última capa deberá ser escarificada homogeneizada y compactada nuevamente.

Las operaciones de acabado comprenden el retiro del material suelto, proveniente de los cortes para alcanzar las cotas previstas.

Si la superficie requiere correcciones geométricas y si se nota visiblemente segregada, la última capa será escarificada, homogeneizada y compactada nuevamente de acuerdo a estas especificaciones.

Los materiales de las canteras deberán ser triturados totalmente, cuando no se trate de materiales granulares naturales determinados por las Especificaciones Técnicas Especiales u ordenados por la supervisión.

El acopio de material de capa base sobre la plataforma sólo será permitido con autorización escrita de la supervisión.

No se autorizará la colocación del material de la capa base, cuando la humedad sea superior o inferior a la admisible para la compactación.

Los lugares en que las condiciones de compactación no cumplan con esta especificación serán totalmente retiradas y nuevamente configuradas, de acuerdo a estas especificaciones.

Durante todo el tiempo de la construcción de la capa base hasta la recepción, los materiales serán protegidos contra la acción destructiva de las aguas pluviales, del tránsito y de otros agentes que puedan dañarla.

La capa base no será sometida a la acción directa de cargas y de la abrasión que produce el tránsito.

La supervisión autorizará, el tráfico en situaciones excepcionales y en áreas limitadas, cuando los daños que puedan ser provocados en la superficie acabada no perjudiquen la calidad de la capa base o al pavimento que será construido sobre la capa base.

El desbroce, desbosque, destronque y limpieza de los yacimientos deberá ser ejecutado cuidadosamente de tal manera que se evite la contaminación del material aprobado. Para evitar daños al medio ambiente durante las operaciones de ejecución de la capa base estabilizada granulométricamente, el contratista adoptará cuidados especiales considerando los siguientes aspectos:

En el banco de explotación de los materiales pétreos, el contratista observará cuidados especiales para la explotación de materiales:

- a) Los materiales solamente serán aceptados si el contratista fue autorizado por escrito para la explotación y/o uso de explosivos en el yacimiento o cantera, además la autorización fue inscrita en el libro de órdenes.
- b) El yacimiento y las instalaciones de la chancadora no serán localizados en área de preservación ambiental.
- c) La explotación de los yacimientos será planificada como para minimizar los daños inevitables durante la explotación y posibilitar la recuperación ambiental, después de la retirada de todos los materiales y equipos.
- d) Para el desmonte; está totalmente prohibida la quema de la vegetación o de residuos de esta.
- e) Los caminos de desvío tendrán un mantenimiento apropiado y los accesos a estos caminos serán conformados hasta una distancia determinada y aprobada por la supervisión.
- f) Junto a las instalaciones de la chancadora, serán construidos pozos de arena para la retención por sedimentación, del polvo de piedra, arena eventualmente

producida en exceso o por lavado de grava, evitando su escurrimiento hacia cursos superficiales de agua.

- g) Si la grava es provista por terceros, se exigirá documentación para verificar la regularidad de las instalaciones, así como, la operación. Las exigencias las realizará el contratista y dará a conocer al supervisor.
- h) Medidas de preservación ambiental referidas a la disciplina del tráfico y al estacionamiento del equipo serán observadas por el contratista en estricta sujeción al estudio de impacto ambiental.
- i) Se prohibirá el tráfico desordenado fuera del cuerpo del terraplén, para evitar daños a la vegetación o interferencias en el drenaje natural.
- j) Las áreas destinadas a los campamentos, servicios de mantenimiento y otros servicios, serán localizados de manera que residuos de lubricantes y combustibles no sean derramadas.

#### **2.6.3.5 Control de la supervisión**

Para los materiales se exigirá el cumplimiento de normas y la realización de los siguientes ensayos.

- a) Ensayos de granulometría, de límite líquido y límite plástico según los métodos AASHTO T- 27, AASHTO T-89 y AASHTO T-90 respectivamente, para cada 300 m como máximo.
- b) Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según el método AASHTO T-180-D, cada 300 m como máximo, con las muestras recogidas en puntos que, en principio, obedezcan el orden: borde derecho, eje, borde izquierdo, eje, borde derecho, etc. a 60 cm del borde.
- c) Un ensayo del índice de Soporte de California (CBR), conforme el método AASHTO T-193, con la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180-D, en una longitud máxima de 300 m lineales.
- d) Un ensayo de desgaste Los Ángeles de cada yacimiento y si existe variación natural del material.
- e) Un ensayo de índice de forma de cada yacimiento o cuando se presente variación natural del material.

El número de los ensayos mencionados en los ítems "a", "b" y "c" podrán ser reducidos, a criterio exclusivo de la supervisión hasta un 30%, si se verifica homogeneidad del material en el lugar de aplicación y la ejecución sea uniforme y bien controlada.

La supervisión podrá definir, en base a observación visual de la plataforma terminada, el punto de ejecución de los ensayos de densidad.

Para la aceptación, serán considerados los valores individuales de los resultados de los ensayos.

#### Control de la ejecución

- a) Determinación del contenido de humedad del material cada 100 m. antes del proceso de compactación. Las tolerancias admitidas para la humedad de compactación en la superficie serán de ( $\pm$ ) 2% respecto a la humedad óptima.
- b) Determinación de la densidad "in situ" del material compactado con un espaciamiento de cada 100 m, en principio, en puntos ubicados a los tres bolillos: borde izquierdo, eje, borde derecho, eje, borde izquierdo, etc., de acuerdo a los procedimientos estándar T-191 y T- 224, este último para el ajuste de la densidad máxima por variación en el contenido de partículas gruesas.
- c) Determinación del grado de compactación (GC), con utilización de los valores de densidad seca máxima determinados en laboratorio y de la densidad seca "in situ" obtenidos en la superficie. El GC de la capa ejecutada tendrá un valor mínimo de 100 %.

La supervisión podrá definir, en base a observación visual de la plataforma terminada, el punto de ejecución de los ensayos de densidad. Para la aceptación, serán considerados los valores individuales de los resultados de los ensayos.

#### **2.6.3.6 Control geométrico**

Después de la ejecución de la capa base se procederá a la nivelación del eje y los bordes admitiéndose las siguientes tolerancias:

- a) Variación máxima en el ancho de más 10 cm, no admitiéndose variación en menos (-).
- b) Variación máxima en el bombeo de más 5%, no admitiéndose variación en menos (-).

- c) Variación máxima de cotas para el eje y para los bordes de (+/-) 1 cm con relación a las cotas de diseño.
- d) Variación máxima en (-) 1 cm. en el espesor de la capa con relación al espesor indicado en el diseño, medido como mínimo en un punto cada 100 m, donde indique la supervisión.

No se admitirá una variación sistemática en menos (-) con relación a las cotas de diseño.

### **2.6.3.7 Medición**

La cantidad de capa base de material granular ejecutada, aceptada y aprobada será medida en metros cúbicos (m<sup>3</sup>), ejecutado conforme a las secciones transversales del proyecto.

Para el cálculo de los volúmenes, tomando en cuenta las tolerancias especificadas, se considerarán los espesores individuales medidos en borde, eje, borde. Si el espesor individual (E.I.) es inferior al espesor del diseño (E.D.), se considerará para el cálculo de la sección el valor de (E.I.); en caso contrario se tomará (E.D.).

El transporte del material de la capa base, salvo que la especificación especial indique lo contrario, será medido por metro cúbico por kilómetro (m<sup>3</sup>xkm), como resultado del producto del volumen colocado y compactado de acuerdo a las secciones transversales de diseño definidas para la colocación de este material por la distancia del menor recorrido indicado en el proyecto o a criterio de la supervisión.

### **2.6.3.8 Pago**

Los trabajos de construcción de la capa base, medidos en conformidad, serán pagados a los precios unitarios contractuales correspondientes a los ítems de pago definidos y presentados en los formularios de propuesta.

Dichos precios constituyen la compensación total por el servicio efectuado e incluyen las operaciones de desbroce, desbosque, destronque y limpieza del yacimiento, extracción de los materiales, producción, trituración, dosificación o selección en caso de que sea necesario, excavación, carga, transporte, distribución, mezcla, pulverización, humedecimiento o desecación, compactación y acabado.

Así mismo incluirá la construcción y mantenimiento de los caminos de servicio y toda la mano de obra, equipo, herramientas e imprevistos necesarios para ejecutar los trabajos descritos en esta especificación.

## 2.7 SUELOS PARA ESTABILIZAR

Sabiendo que no todos los suelos se pueden estabilizar, se debe hacer una caracterización en la cual se basa en la identificación de un suelo como, arena, limo, arcilla, suelo orgánico y en la determinación de los porcentajes de finos y su plasticidad, y por ello se deben tener en cuenta sus características de deformabilidad, expansividad, sensibilidad, las cuales ocasionan problemas en la estructura de pavimento.

Loaiza expone que los ensayos para realizar la caracterización de los suelos, se pueden dividir en tres grupos:

- ✓ Ensayos básicos de identificación
- ✓ Ensayos complementarios de identificación
- ✓ Ensayos de caracterización del comportamiento

“Los ensayos básicos de identificación dependen únicamente de la naturaleza del suelo y, por tanto, de sus propiedades intrínsecas, siendo estas la granulometría y los límites de consistencia (límites de Atterberg).”

“Los ensayos complementarios, por su parte, se refieren a características relativas al estado natural del suelo tales como: humedad, densidad natural, contenido de materia orgánica y de ciertas sales.”

“Los ensayos de caracterización del comportamiento, tiene por objeto indicar las propiedades que el suelo puede alcanzar tras su tratamiento en carreteras”<sup>3</sup>

## 2.8 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Las nuevas técnicas de construcción en carreteras y la necesidad de contar con materiales durables y que respondan mejor a mayores solicitaciones de tráfico, han llevado a buscar nuevas alternativas en el uso de materiales convencionales empleados en las carreteras.

Uno de los avances más significativos lo encontramos en el empleo de la técnica de estabilización de suelos, que busca resolver en general tres carencias principales de los materiales naturales:

**Estabilidad volumétrica.** - Debido a las diversas fracciones mineralógicas presentes, y sobre todo por ciertas arcillas, el material natural presenta cierta inestabilidad ante los cambios de estado de humectación. Esto ocasiona fisuración y deformaciones, en la propia

---

<sup>3</sup> (MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACION DE SUELOS )

ejecución de la obra, con la consecuente pérdida de resistencia y durabilidad.

**Agua.** - La meteorización por el ataque del agua capilar o procedente de la lluvia, compromete en muchos casos la construcción con material natural. El agua al entrar de nuevo en la estructura aglomerante de las arcillas, deshace las fuerzas de tensión superficial del agua interlaminar.

**Resistencia.** - Cómo en cualquier material de construcción, en cada caso se hace indispensable cumplir con cierto grado de resistencia a compresión; resistencia a tracción, u otros. Para ello es indispensable un refuerzo y estabilización de la matriz aglomerante intergranular, conjuntamente con la obtención de una densidad máxima.

La estabilización persigue transformar los suelos de la traza que no reúnen las condiciones necesarias para su utilización como capas inferiores del paquete estructural, o carpetas de rodadura para vías con tráficos livianos, en materiales aptos para su uso. Para conseguirlo hay que recurrir a aditivos que modifiquen las propiedades de los suelos con dos fines principales:

- ✓ Aumentar su capacidad portante
- ✓ Reducir su susceptibilidad al agua.

Las propiedades más importantes que se deben mejorar con la estabilización son:

- Resistencia. El incremento de resistencia aumenta la estabilidad y la capacidad de carga.
- Estabilidad del volumen. Proporciona el control de los procesos de hinchamiento-colapso causados por los cambios de humedad.
- Durabilidad. Una mayor durabilidad aumenta la resistencia a la erosión, responde de manera más eficaz a los cambios climáticos y al uso del tráfico.
- Permeabilidad. La reducción de la permeabilidad y por lo tanto de la circulación de agua, mejora la estabilidad.

## **2.9 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN.**

### **2.9.1 Estabilización física.**

Se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Hay varios métodos como lo son:

**Mezclas de suelos.** Este tipo de estabilización es de amplio uso, pero por sí sola no logra

producir los efectos deseados, necesitándose por lo menos la compactación como complemento. Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que le permite soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como capa de asiento del paquete estructural de una carretera ya que, al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino. Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

- **Geotextiles**

- **Consolidación previa**

### **2.9.2 Estabilización química.**

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. Dentro de este grupo de estabilización, las sustancias químicas más comunes son: cal y cemento.

- **Cal:** Disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.
- **Cemento Portland:** Aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.

Otros productos también utilizados son:

- **Productos asfálticos:** Es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- **Cloruro de sodio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- **Cloruro de calcio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- **Escorias de fundición:** Se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- **Polímeros:** Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor

resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

- **Caucho de neumáticos:** Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

### **2.9.3 Estabilización mecánica.**

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia.

**Compactación:** Esta mejora generalmente se hace en la sub-base, base y en las carpetas asfálticas.

### **2.9.4 Estabilización mixta**

La estabilización mixta (cal + cemento) es una opción muy interesante en la que primero, mediante un pequeño porcentaje de cal se logra mejorar la ligera plasticidad que puede presentar un material dejándolo en óptimas condiciones para, a continuación, tratarlo mejor con cemento. Aplicando este tipo de estabilización los porcentajes requeridos de conglomerante son menores, lo cual implica numerosas ventajas técnicas y económicas. También se puede recurrir a un tratamiento mixto en el caso de ejecutar capas tratadas con cemento en condiciones climatológicas adversas. En el caso de suelos con humedades excesivas, puede secarse previamente la capa mediante la aplicación de un pequeño porcentaje de cal viva que, además de reducir rápidamente la humedad, eleva la temperatura del material, lo cual favorece las posteriores reacciones de hidratación del cemento.

Esto puede ser muy útil en la ejecución de obras durante los meses de invierno. Hay que tener en cuenta que los suelos y materiales disponibles, en cada proyecto u obra, serán diversos.

Por lo tanto, debe realizarse un estudio que analice todos los tipos de suelos y materiales susceptibles de ser estabilizados. Debido a ello, será frecuente que se tengan suelos aptos para cal, suelos aptos para cemento, y suelos aptos para estabilizaciones mixtas.

Incluso, dentro de un mismo conglomerante, la dosificación requerida por cada tipo de material será distinta.

Esto, con las máquinas estabilizadoras de suelos disponibles en el mercado, no supone ningún problema, sino, al contrario, pues permite optimizar el empleo de los distintos tipos

de materiales que tengamos disponibles, pudiéndolos emplear donde resulte más interesante. También se puede plantear el caso de que un mismo tipo de suelo interese estabilizarlo con cal o cemento, o con distintos porcentajes de alguno de ellos, en función del tipo de capas en que se vaya a emplear, como parte también de la optimización del movimiento de materiales a lograr en cualquier obra lineal.<sup>4</sup>

#### **2.9.4.1 Elección del conglomerante**

La elección del conglomerante más adecuado dependerá del análisis pormenorizado de los siguientes aspectos:

##### **Tipo de suelo o materiales a estabilizar**

Tras un estudio geotécnico de todos los tipos de suelos que se vayan a emplear, se debe decidir qué conglomerante es el más adecuado. No sirve cualquier conglomerante para cualquier tipo de suelo.

En general, puede afirmarse que los suelos plásticos, arcillosos, reaccionan bien con la cal. Y los suelos granulares, no plásticos, reaccionan bien con el cemento.

Los dos parámetros que mejor pueden clasificar un suelo de cara al conglomerante más adecuado son la plasticidad y la granulometría.

- Los suelos con un índice de plasticidad menor o igual a 12 son suelos que reaccionarán mejor con el cemento.
- Los suelos cuyo I.P. sea mayor de 20 son suelos cohesivos, que reaccionarán mejor con la cal.
- Los suelos cuyo I.P. esté entre esos valores, entre 12 y 20, serán suelos más aptos para una estabilización mixta.
- En el caso de suelos muy plásticos, con valores del I.P. superiores a 40, se debe realizar la estabilización con cal, y en dos etapas, para mejorar su eficacia.

Analizando la granulometría, lo que interesa es ver la fracción fina del suelo. En el caso de suelos muy finos, con más del 50% de pase por el tamiz de 63  $\mu\text{m}$ , son claramente suelos aptos para reaccionar mejor con la cal.

Si el porcentaje de finos es menor del 35%, son suelos aptos para el cemento. Y como en el caso anterior, los suelos cuya fracción fina se encuentre entre el 35 y el 50%, serán

---

<sup>4</sup> (Manual de diseño de conservación vial ABC)

suelos para realizar una estabilización mixta cal + cemento.

Puede haber casos especiales en los que, a pesar de ser suelos muy finos, no sean plásticos. En estos casos, deberán realizarse ensayos con la cal y con el cemento para determinar cuál de ellos actúa mejor sobre el suelo.

Este mismo planteamiento es el que debe realizarse ante el estudio del tratamiento de cualquier otro tipo de material o residuo. También puede plantearse el empleo de la cal o el cemento conjuntamente con algún otro material o subproducto de tal forma que se potencien sus propiedades cementantes u otras características. En estos casos, la tipología de suelos que se puede estabilizar mejor con cal o con cemento es más amplia, de tal forma que cada uno de ellos abarcaría un mayor rango de los expuestos anteriormente.

### **Objetivos buscados**

Una vez definido el conglomerante o combinación de ellos más adecuada, deberán realizarse los ensayos de dosificación necesarios para alcanzar los parámetros resistentes exigidos o los objetivos buscados.

- Ante la necesidad de secado o, incluso, descongelación de cualquier tipo de suelos en condiciones climatológicas adversas, se debe emplear cal viva, y su dosificación debe realizarse sobre la marcha, día a día, a pie de obra, en función de las condiciones de trabajo.
- En el caso de estabilización de materiales marginales para su reutilización en la construcción de terraplenes, la dosificación será la necesaria para corregir sus problemas geotécnicos y resistentes hasta unos valores aceptables: plasticidad, hinchamiento, capacidad de soporte, etc.
- En estos casos, la cal suele ser el conglomerante más adecuado, pues la clasificación marginal de los suelos y su consiguiente necesidad de estabilización vienen dados por su carácter arcilloso.
- En el caso de la mejora y estabilización de suelos en capas de coronación de terraplenes, la dosificación será aquella que cumpla todas las especificaciones del tipo de suelo estabilizado que se quiera obtener.
- Y, por último, para la construcción de capas tratadas, suelo-cemento (SC) y gravacemento (GC), como bases de pavimentos semi-rígidos, se debe emplear la dosificación de cemento necesaria para alcanzar los valores de resistencia del diseño.

### **Conglomerantes disponibles en el entorno**

Puede darse el caso de que, en función de la ubicación espacial y temporal de la obra, no se tenga la disponibilidad de cualquier tipo de conglomerante. En este caso deberán realizarse los estudios geotécnicos necesarios con los conglomerantes disponibles para comprobar si se puede llegar a lograr los resultados necesarios.

### **Estudios de dosificación**

Una vez elegido el conglomerante o los conglomerantes posibles, el siguiente paso es diseñar el tratamiento determinando los porcentajes de conglomerante necesarios para lograr los objetivos buscados.

Una vez realizados estos estudios, deben respetarse, es decir, no deben realizarse variaciones sobre la marcha en función de otros factores.

Es perjudicial emplear porcentajes tanto por debajo como por encima de la fórmula de trabajo. La sobredosificación de cal o de cemento tiene riesgos e inconvenientes que carecen de sentido si se han realizado los estudios recomendados.

## **2.10 ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND**

Cuando se proyecta pavimentar un camino secundario o una calle de poco tránsito, se deben estudiar los diferentes tipos de pavimento utilizables para ver cuál es el aconsejable. Si se considera la posibilidad de emplear cemento Portland para estabilizar el suelo, debe estudiarse primeramente el material que se encuentra a lo largo del mismo. Como cada tipo de suelo requiere una cantidad adecuada de cemento para su estabilización, las variaciones en la naturaleza del terreno complican un poco esta operación y frecuentemente no queda otro recurso que mezclar entre sí las diferentes clases de suelos en ciertos lugares para reducir a un mínimo los cambios en el material antes de proceder a su estabilización. Si se llega a la conclusión de que el suelo es lo suficientemente uniforme para que pueda ser estabilizado, entonces se debe estimar aproximadamente la cantidad de cemento requerida para ver si el costo de construcción es razonable.

Los suelos arenosos requieren del 7 al 10 por ciento en volumen de cemento, y los suelos arcillosos requieren del 12 al 16 por ciento en volumen, y aún más en algunos casos. Como puede observarse, los suelos arcillosos requieren mucho más cemento que los arenosos; además, como hay que pulverizar los terrones de la arcilla para que se mezclen con el

cemento, la estabilización de los suelos arcillosos resulta siempre más cara que la de los suelos arenosos. Una cantidad apreciable de grava mezclada con el suelo del camino reduce mucho la cantidad de cemento requerida, y muchas veces resulta más económico sustituir todo el suelo superficial por un material arenoso o gravoso acarreado desde préstamos cercanos, que tratar de estabilizar suelos muy arcillosos.

Una vez terminado el presupuesto aproximado del trabajo de estabilización con cemento, se preparan otros presupuestos con otros tipos de pavimento y se comparan los costos iniciales, los costos de mantenimiento y la duración de los mismos para poder determinar el sistema más ventajoso. Si el estudio preliminar aconseja el empleo de la estabilización con cemento, el siguiente paso será el de realizar otro estudio más detallado del suelo. El primer paso en este estudio será el localizar los puntos débiles de la subrasante, es decir, lugares que puedan necesitar algún tratamiento previo a la construcción del pavimento, tales como el instalar drenes subterráneos en zonas de drenaje pobre, o el sustituir parcial o totalmente los materiales indeseables por otros de buena calidad, etc. El siguiente paso será el de efectuar suficiente número de sondeos en toda la longitud del camino para determinar la clase y situación de los suelos a estabilizar. Los datos que se obtengan se indican en un perfil del camino para facilitar la selección de los suelos que se van a mezclar para aumentar la uniformidad del terreno, y los materiales de préstamo que se deben agregar. Es muy importante localizar los lugares próximos al camino donde existan materiales granulares que puedan servir como material de préstamo.

El éxito de una estabilización con cemento Portland depende de tres factores:

- a) Contenido apropiado de cemento.
- b) Contenido apropiado de humedad.
- c) Compactación adecuada.

Para determinar el valor de estos factores, deben efectuarse pruebas de laboratorio siguiendo las recomendaciones pertinentes.

Las características mínimas que debe satisfacer un suelo para que su estabilización sea razonablemente económica son:

- a) Límite líquido menor de 50%.
- b) Índice plástico menor de 25%.
- c) El material que pase la malla # 200 debe ser menor del 50%.

- d) El porcentaje de vacíos, compactada la muestra en el cilindro proctor, debe ser menor del 35%.

Para determinar la proporción de cemento y la humedad óptima de mezclado, el suelo se seca y se pulveriza sin romper las partículas hasta que pase por la malla # 4 para los suelos finos y se mezcla íntimamente con diferentes cantidades de cemento (8 a 16%). Para cada proporción de cemento deben hacerse cuatro probetas, dos para la prueba de humedad y secado y dos para la prueba de compresión a diferentes edades.

Todas las probetas se dejan fraguar dentro de una cámara fría durante siete días, después de lo cual las probetas destinadas a la prueba de humedad y secado se sumergen en agua a la temperatura ambiente durante cinco horas, al cabo de cuyo tiempo se secan en un horno a 71° C durante 42 horas. Este ciclo de humedad y secado se repite doce (12) veces como máximo. Después de cada ciclo una probeta se pesa y se determina su absorción. La otra se limpia enérgicamente dos veces con un cepillo metálico separando así todo el material suelto y luego se pesa. De ahí se obtiene el porcentaje de material disgregado después de cada ciclo.

Las otras dos probetas se someten a la prueba de compresión a diferentes edades después de haber tenido dichas probetas de 1 a 4 días de curado en cámara fría.

La dosificación adecuada de cemento es la mínima que cumple las siguientes condiciones: La pérdida de material disgregado durante los doce ciclos en la prueba de humedad y secado no debe ser mayor de:

- a) 14% para los suelos tipos A-1, A-2 y A-3.
- b) 10% para los suelos tipos A-4 y A-5.
- c) 7% para los suelos tipos A-6 y A-7.

Imagen 2.3 Preparación suelo - cemento



Fuente: Crespo 2004

- I. Los suelos A-1 a A-7 son los clasificados así por la Administración de Caminos Públicos de Estados Unidos de América.
- II. El cambio volumétrico en cualquier momento durante la prueba de humedad y secado no debe ser superior al 2% del volumen inicial.
- III. El contenido máximo de humedad de cualquier tiempo no debe ser mayor que el necesario para llenar los vacíos de la probeta en el momento de ser fabricada.
- IV. La resistencia a compresión debe aumentar con la edad y con un mayor contenido de cemento, dentro de los límites que marcan los requisitos exigidos en los puntos I, II y III anteriores.

Si se conocen el contenido adecuado de cemento, el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima para un tipo determinado de suelo, y se hacen las suficientes comprobaciones durante la construcción para tener la seguridad de que se están obteniendo estos valores, entonces se puede asegurar que la estabilización proporcionará un buen servicio.

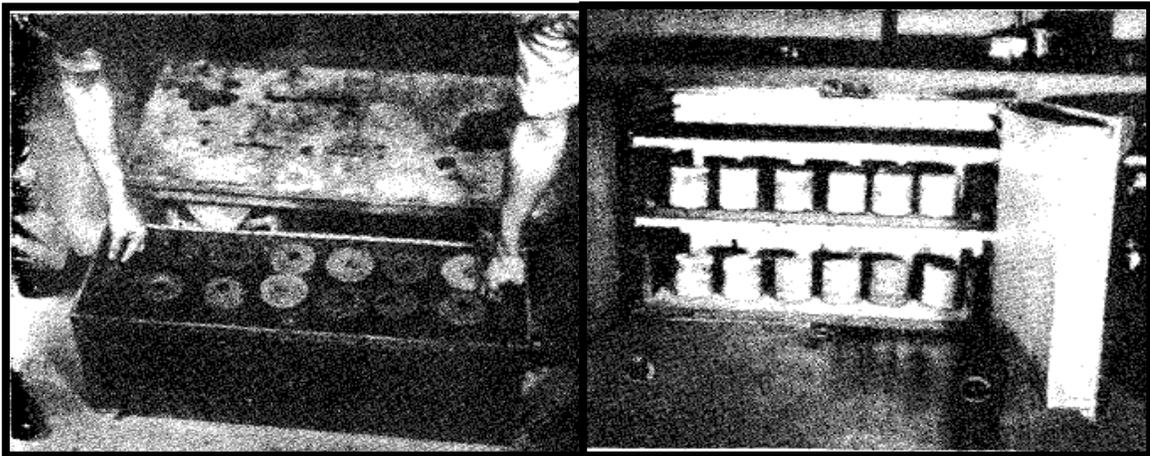
Para llevar a cabo la estabilización con cemento, el camino debe ser conformado y perfilado en forma adecuada mediante una moto conformadora manejada por un buen operario, La dosificación de los materiales es una operación que debe ser ejecutada con cuidado ya que una variación de un 3% en el contenido de cemento se considera inaceptable. La parte más dificultosa es la de disponer de la cantidad exacta de suelo para la mezcla. Los operadores de equipos no pueden controlar la escarificación del material con la precisión que requiere el trabajo, y se hace necesario por lo tanto colocar estacas

laterales cada 20 m para verificar la exactitud de este trabajo. La cantidad de cemento Portland es más fácil de controlar, si se emplea cemento en sacos, pueden éstos distribuirse en hileras a lo largo del camino, a intervalos fijos de acuerdo con la cantidad de cemento requerida, Por otro lado, hay máquinas especiales que pueden distribuir cemento a granel en la proporción que se desee.

En cuanto al agua, se necesita la cantidad suficiente para hidratar el cemento, además, la necesaria para lograr la adecuada compactación del suelo, como cierta parte del agua agregada al suelo se evapora y se pierde durante las operaciones de mezclado, es necesario incorporar al suelo alrededor de un 3% más de agua para que durante la compactación se encuentre con el contenido óptimo. El único procedimiento de garantía para controlar eficientemente la cantidad de agua, es el tomar un número suficiente de muestras del suelo y determinar los contenidos de humedad correspondientes en el momento de su compactación.

Estabilizaciones:

Imagen 2.4 Probetas sumergidas



Fuente: Crespo 2004

Para poder llevar a cabo la mezcla del cemento con el suelo, éste debe ser antes pulverizado completamente ya que los grumos de arcilla sin cemento serán puntos débiles en el camino terminado.

Los materiales arcillosos son los más difíciles de pulverizar puesto que cuando están muy secos son bastante duros, y si presentan un exceso de humedad se hacen más pegajosos. De aquí que estos materiales deben humedecerse o dejarse secar para que posean el grado

de humedad que facilite su pulverización.

Con anterioridad se ha indicado que el cemento debe mezclarse íntimamente con el suelo para que su función estabilizante la lleve a cabo correctamente. Para llevar a cabo este mezclado pueden emplearse los arados agrícolas de discos conjuntamente con moto conformadoras, pero, es más conveniente emplear estabilizadoras especiales.

Estas estabilizadoras pueden mezclar los materiales más rápida y uniformemente, y bajo condiciones más adversas. Las máquinas que pulverizan y mezclan los materiales son muy ventajosas en tiempo de lluvias ya que un aguacero repentino puede arruinar todo el trabajo de pulverización si el material no se encuentra ya debidamente mezclado.

Sin embargo, deben considerarse todos los factores que influyen en el costo de construcción del camino antes de seleccionar el equipo a emplear con el fin de que el trabajo se realice en forma correcta lo más económicamente posible.

Por lo general el trabajo de mezclado se inicia primero mezclando en seco el cemento con el suelo y añadiéndole luego, poco a poco, el agua necesaria para completar la mezcla, Sin embargo, si se emplean máquinas estabilizadoras que realizan todo el trabajo en una sola operación, se puede incorporar toda el agua de una sola vez durante el proceso de mezclado.

Una vez que se haya terminado la mezcla, el material debe extenderse, perfilarse y compactarse antes de que el cemento haya fraguado completamente, El perfilado del material debe hacerse cuidadosamente mediante el empleo de estacas laterales para mantener un espesor uniforme. Antes de compactar la mezcla deben tomarse muestras para comprobar la humedad. Si es necesario se debe agregar agua al suelo para que este alcance la humedad óptima durante la compactación. La compactación se inicia generalmente, con el rodillo pata de cabra, sin embargo, los suelos arenosos pueden compactarse mejor con un equipo vibrador. Después de que la mezcla se ha compactado completamente, con excepción de unos dos centímetros de material suelto que quedan en la parte superior, la superficie se vuelve a perfilar y se agrega agua a este material suelto para compensar la que se haya evaporado. Esta capa de material se compacta con aplanadora de llantas neumáticas inicialmente y se termina con aplanadora de rodillo liso para dejar una superficie bien acabada y esta para ser curada Como el cemento Portland debe contener la suficiente agua para que pueda endurecerse

convenientemente, es necesario mantener el contenido de humedad de la mezcla durante la fase principal del endurecimiento, por lo tanto, estas estabilizaciones deben curarse durante siete días, como mínimo, para que puedan desarrollar una resistencia satisfactoria. Para efectuar el curado puede extenderse sobre la superficie cualquier material que retenga la humedad, como paja, aserrín, tierra, materiales asfálticos, productos químicos especiales, etc. Cuando se emplean productos asfálticos éstos pueden servir, además, como riego de impregnación.

Como los suelos estabilizados con cemento presentan poca resistencia al desgaste, es necesario protegerlos con cualquier tipo de carpeta asfáltica ya conocida.<sup>5</sup>

## **2.11 CEMENTO**

### **2.11.1 Conglomerantes hidráulicos:**

Son productos artificiales, de naturaleza inorgánica y mineral, obtenidos a partir de materias primas naturales y, en su caso, de subproductos industriales, que se utilizan en construcción, edificación y obras públicas, así como en industrias afines de materiales de construcción.

Se emplean para producir conglomerados (hormigones, morteros y pastas) con áridos pétreos, naturales o artificiales u otro tipo de áridos (casco de ladrillo), a fin de obtener elementos constructivos estructurales, estructuras y obras resistentes, estables y durables.

### **2.11.2 Cementos**

Son conglomerantes hidráulicos, o sea materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finalmente molidos y convenientemente amasados con agua forma una pasta que fragua y endurece tanto el aire como bajo el agua, a causa de las reacciones de hidrolisis e hidratación de sus constituyentes como dando lugar a productos hidratados, mecánicamente resistentes y estables, tanto el aire como bajo el agua.

Los cementos materiales granulares muy finos y homogéneos, cuyo aceptable grado de uniformidad de propiedades y de comportamientos, sólo se puede conseguir mediante procesos continuos de fabricación así como de realizaciones periódicas y frecuentes de control de calidad todo ello llevado a cabo mediante operaciones de autocontrol de los

---

<sup>5</sup> (Crespo, 2004)

fabricantes ejecutadas por personal cualificado y adiestrado y con maquinaria y equipos e instrumentos idóneos.

### **2.11.2.1 Cementos Portland**

Son los fabricados a base de clinker Portland y, en su caso, otros de los componentes principales y/o adicionales definidos en esta norma, en proporciones distintas, según se establece en las correspondientes definiciones particulares de cada tipo incluidas Cementos con características especiales

Son cementos que poseen alguna o algunas de las características referentes a su resistencia a los sulfatos, al agua de mar, o relativas a su bajo calor de hidratación o a su color blanco.

### **2.11.3 Constituyentes del cemento**

#### **2.11.3.1 Clinker Portland**

Es el producto constituido en su mayor parte por silicatos de calcio, obtenido por la cocción hasta la fusión parcial (clinkerización) de una mezcla convenientemente proporcionada y homogeneizada que contiene principalmente cal y sílice, con pequeñas proporciones de alúmina y óxido férrico.

#### **2.11.3.2 Materiales puzolánicos.**

Son materias naturales o productos artificiales capaces de combinarse con la cal grasa, hidráulica o de hidrólisis de los cementos (portlandita), a la temperatura ambiente y en presencia de agua, para formar compuestos hidráulicos semejantes a los originados en la hidratación de los constituyentes del clinker Portland.

##### **2.11.3.2.1 Puzolanas naturales**

Son rocas tobáceas, volcánicas vítreas, de naturaleza traquítica alcalina o pumítica.

También son puzolanas naturales las harinas fósiles de naturaleza silícica, como la diatomita.

##### **2.11.3.2.2 Puzolanas artificiales**

Son productos obtenidos por medio de tratamientos térmicos de arcillas, pizarras y otros similares. Dentro de este grupo también se encuentran subproductos de algunas industrias tales como polvo de ladrillo, cenizas volantes, etc.

### **2.11.3.3 Filleres calizos**

Son materiales de naturaleza inorgánica y origen mineral carbonatado, compuestos principalmente por carbonato cálcico en forma de calcita, que molidos conjuntamente con clinker de cemento Portland, en proporciones determinadas, afectan favorablemente a las propiedades y al comportamiento de los conglomerados de cemento, frescos y endurecidos, por acciones de tipo físico (en cuanto a dispersión, hidratación, trabajabilidad, retención de agua, capilaridad, permeabilidad, retracción, fisuración, etc.) y acciones de carácter químico.

### **2.11.3.4 Reguladores de fraguado**

Son materiales naturales o productos artificiales que, añadidos a los clinker Portland y a los otros constituyentes eventuales de los cementos, en proporciones adecuadas y molidos conjuntamente con ellos, proporcionar cementos de los contenidos en la tabla que fraguan de acuerdo con lo especificado en esta norma al aplicarles el método de ensayo de la norma NB 063-9s.

El regulador de fraguado más usual es el sulfato cálcico en algunas de sus variedades (como el yeso) o en mezclas de ellas.

El sulfato cálcico en cualquiera de sus formas puede ser también un subproducto de determinados procesos industriales y ser utilizado como regulador de fraguado (las impurezas que pudieran acompañar a este subproducto no deberán afectar desfavorablemente en los procesos de fraguado y endurecimiento, ni a las propiedades y comportamiento de los conglomerados frescos o endurecidos).

### **2.11.3.5 Aditivos**

Son productos que, en pequeñas dosis -inferiores en todo caso al 1% en masa- se pueden utilizar eventualmente para facilitar el proceso de fabricación del cemento (coadyuvantes de la molienda del clinker o para aportar al cemento o a sus derivados -morteros y hormigones algún comportamiento específico (inclusores de aire).

En ningún caso perjudicarán las propiedades y el comportamiento de los conglomerados frescos o endurecidos. Tampoco provocarán, acelerarán o facilitarán la corrosión de las armaduras.

## **2.11.4 Clasificación**

### **2.11.4 Cementos Portland**

Con esta denominación existen tres tipos:

#### **2.11.4.1.1 Cementos Portland, tipo I**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 95 % en masa y de cualquiera de los componentes adicionales definidos en esta norma, o mezclas de ellos, en proporción no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado, ni los eventuales aditivos.

#### **2.11.4.1.2 Cementos Portland con puzolana, tipo IP**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 70 % ni mayor del 94 % en masa, de puzolana natural en proporción no menor del 6% ni mayor del 30% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta norma, en proporción comprendida entre el 0 % y el 5 % en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

#### **2.11.4.1.3 Cementos Portland con filler calizo, tipo IF**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 80% ni mayor del 94% en masa, filler calizo en proporción no menor del 6% ni mayor del 15 % en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta misma norma, en proporción comprendida entre el 0 % y el 5 % en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado, ni los eventuales aditivos.

#### **2.11.4.2 Cementos puzolánicos, tipo P**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 60% en masa, de puzolanas naturales, cenizas volantes u otros materiales puzolánicos en proporción total no mayor del 40 % en masa y de otros de los constituyentes definidos en esta norma, en proporción total no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2012)

### 2.11.5 Clasificación y composición de los cementos por tipos

Tabla 2.3 Clasificación y composición de los cementos

Tipos de cemento			Proporción en masa % 1			
			Componentes principales			Comp. adicionales (2) (3)
Denominación	Designación	Tip.	Clinker	Puz. natural	Filler calizo (3)	
Cemento Portland	Cemento Portland	I	95 a 100	-	-	0 a 5
	Cemento Portland con puzolana	IP	70 a 94	6 a 30	-	0 a 5
	Cemento Portland con filler calizo	IF	80 a 94	-	6 a 15	0 a 5
Cemento puzolánico		P	≥ 60	≤ 40	-	0 a 5

Fuentes: Norma Boliviana NB 011

- 1) En estos valores se excluyen: el regulador de fraguado y los aditivos
- 2) Los componentes adicionales pueden ser uno o dos entre puzolana y filler calizo, a menos que sean componentes principales del cemento.
- 3) La caliza a utilizarse como filler calizo o como componente adicional deberá cumplir el requisito de un contenido mínimo de 85% de carbonato cálcico.

Tabla 2.4 Categorías resistentes de los cementos

Categorías resistentes		Resistencias a la compresión (MPa) (NB 470) (1)		
		Mínimas a 3 días	Mínimas a 7 días	Mínimas a 28 días
Alta	40	17	25	40
Media	30	-	17	30
Corriente	25	-	15	25

Fuentes: Norma Boliviana NB 011

- 1) El método alternativo de NB 644, provee resultados notoriamente más altos; por lo tanto, estas especificaciones de resistencia no son adecuadas para su control de calidad.

Tabla 2.5 Especificaciones físicas para los cementos

Categorías resistentes (1)	Fraguados (NB 063)		Superficie específica Blaine (NB 472) (cm <sup>2</sup> /g)
	Inicial (minutos)	Final (horas)	
Alta, Media	> 45	> 10	> 2600
Corrientes	> 60	> 12	> 2600

Fuentes: Norma Boliviana NB 011

Tabla 2.6 Especificaciones físicas para los cementos

Tipos (1)	Expansión	
	Autoclave % máximo (NB 471)	La chateller mm máximo (NB 643)
I, IP, IF, P	0,80	10
	1,00	10

Fuentes: Norma Boliviana NB 011

Tabla 2.7 Especificaciones químicas de cementos

Características químicas (NB 061)	Tipos de cementos			
	I	IP	IF	P
Perdida por calcinación (% máx.)	5	7	7	8
Residuo insoluble (% máx.)	3	---	5	---
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) (% máx.)	3.5	4	4	4
Oxido de magnesio (MgO) (% máx.)	6	6	6	6
Puzolanicidad 8 o 15 días	---	---	---	positiva

Fuentes: Norma Boliviana NB 011

## 2.12 PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO

El reciclaje o la reutilización del material del pavimento es un concepto muy simple pero poderoso. El reciclaje de materiales de pavimento existentes para producir nuevos materiales de pavimento resulta en ahorros considerables de material, dinero y energía. Al mismo tiempo, el reciclaje del material existente también ayuda a resolver los problemas de eliminación. Debido a la reutilización del material existente, la geometría y el espesor del pavimento también se pueden mantener durante la construcción. En algunos casos, la interrupción del tráfico es menor que la de otras técnicas de rehabilitación. Los beneficios específicos del reciclaje se pueden resumir de la siguiente manera:

- Reducción de costos de construcción.
- Conservación de agregados y aglutinantes.
- Preservación de la geometría del pavimento existente.
- Preservación del medio ambiente.
- Conservación de energía.
- Menos demora del usuario.

La rehabilitación del pavimento también es necesaria debido a las siguientes razones:

- Inadecuada calidad de manejo.
- Exceso de angustia en el pavimento.
- Reducción de la fricción superficial.
- Excesivo requerimiento de mantenimiento.

El reciclaje es solo una de las varias alternativas de rehabilitación disponibles para pavimentos de asfalto. Algunos de los otros métodos comunes son la capa de asfalto de mezcla caliente (HMA) espesa o delgada. La elección de la alternativa de rehabilitación depende de la angustia observada en el pavimento, la evaluación de laboratorio y de campo del material existente y los parámetros de diseño. Además, el mantenimiento de la geometría y el espesor original de los pavimentos, especialmente en pasos inferiores, influyen en la elección del método de rehabilitación. Sin embargo, el reciclaje tiene algunas ventajas únicas que no están disponibles con otros tipos de técnicas de rehabilitación. Por ejemplo, el reciclaje puede generar ahorros, ayudar en la conservación de los recursos naturales y mantener la geometría del pavimento y el grosor. Ahora se

encuentran disponibles diferentes métodos de reciclaje para abordar problemas específicos de pavimento y necesidades estructurales.

### 2.12.1 Características RAP

Tabla 2.8 Propiedades físicas y mecánicas

<b>Tipo de propiedad</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Rango de valores típicos</b>
Físicas	Peso unitario	1940-2300 kg/m <sup>3</sup> (120-140 lb/ft <sup>3</sup> )
	Contenido de humedad	Normal: por encima de 5%
	Contenido de asfalto	Maximo:7-8% Normal:4,5-6% Rango máximo :3-7%
	Penetración de asfalto	Normal 10-80 a 25°C (77°C)
	Viscosidad absoluta del cemento asfáltico recuperado	Normal:4000-2500 poises a 60°C (140°C)
Mecánicas	Peso unitario compactado	1600-2000 kg/m <sup>3</sup> (100-125lb/ft <sup>3</sup> )
	CBR	100% R.A.P.20-25 %

Fuente: Asphalt Recycling Guide , s.f.

### 2.12.2 Métodos y procesos de reciclaje

La Asociación de Reciclaje y Recuperación de Asfalto define cuatro tipos diferentes de métodos de reciclaje:

- ❖ Reciclaje en caliente
- ❖ Reciclaje en el lugar caliente
- ❖ Reciclaje en el lugar frío
- ❖ Recuperación a profundidad total.

El reciclaje de mezcla de asfalto en caliente es el proceso en el que los materiales de pavimento de asfalto recuperado (RAP) se combinan con nuevos materiales, a veces junto con un agente de reciclaje, para producir mezclas de asfalto de mezcla en caliente (HMA). Las plantas de mezcla en caliente de tipo lote y tambor se utilizan para producir

mezclas recicladas. El material RAP puede obtenerse mediante fresado o desgarrado y operación de trituración.<sup>7</sup>

### **2.12.3 Reciclaje de pavimento de asfalto con pavimento de asfalto recuperado**

La administración ambiental se designa como un área de enfoque principal del plan estratégico del Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT). Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA), la administración ambiental es la responsabilidad de la calidad ambiental compartida por todos aquellos cuyas acciones afectan el medio ambiente. La Administración Federal de Carreteras (FHWA) apoya y promueve el uso de materiales reciclados de carreteras en la construcción de pavimentos en un esfuerzo por preservar el medio ambiente natural, reducir los desechos y proporcionar un material rentable para la construcción de carreteras. De hecho, el objetivo principal es fomentar el uso de materiales reciclados en la construcción de autopistas en la mayor medida económica y práctica posible con un rendimiento igual o mejorado. Como parte de la Política la FHWA, la FHWA promueve activamente el reciclaje y la tecnología del pavimento de asfalto.

Hay tres requisitos clave que deben cumplirse para que el reciclaje de pavimento de asfalto sea exitoso.

Los pavimentos de asfalto reciclado deben:

- ✓ Ser rentable
- ✓ Ser ambientalmente responsable y
- ✓ Desempeñarse bien.

### **2.12.4 Pautas RAP para bases granulares**

Los agregados se utilizan en capas de base y subbase granulares debajo de la capa o capas de la superficie de conducción en estructuras de pavimento de concreto asfáltico y cemento Portland. Las capas de base agregadas sirven para una variedad de propósitos, incluida la reducción de la tensión aplicada a la capa de subrasante y el drenaje de la estructura del pavimento. La capa de base granular está directamente debajo de la

---

<sup>7</sup> (Asphalt Recycling Guide, s.f.)

superficie del pavimento y actúa como el soporte de carga y el componente de refuerzo de la estructura del pavimento. La subbase granular forma la capa más baja (inferior) de la estructura del pavimento y actúa como la base principal para el perfil del camino posterior, proporciona drenaje para la estructura del pavimento y protege la estructura de las heladas.

Las bases granulares se construyen típicamente extendiendo los materiales en capas delgadas de 150 mm (6 pulgadas) a 200 mm (8 pulgadas) y compactando cada capa haciendo rodar sobre ella con un equipo de compactación pesado.

### **Materiales**

Los agregados utilizados en aplicaciones granulares de base y subbase generalmente consisten en arena y grava, piedra triturada o roca de cantera, escoria u otro material duro y duradero de origen mineral. Los requisitos de gradación varían según el tipo (base o subbase).

Los materiales base granulares típicamente contienen un contenido de piedra triturada en exceso del 50 por ciento de las partículas de agregado grueso. Las partículas cúbicas son deseables, con una cantidad limitada de partículas planas o delgadas y alargadas. La base granular es típicamente densa, con una cantidad limitada de finos para promover el drenaje. La subbase granular también es densamente graduada, pero tiende a ser algo más gruesa que la base granular. El requisito de contenido triturado para la subbase granular no es requerido por muchas agencias, aunque la provisión de agregados triturados al 100 por ciento para el uso de la base y la subbase está aumentando en las estructuras de pavimento premium para promover la resistencia al surco.

#### **2.12.5 Propiedades materiales y métodos de prueba**

La base granular y la subbase generalmente conforman el mayor grosor de la estructura del pavimento, y proporcionan resistencia a la carga y drenaje para la estructura del pavimento. Por lo tanto, el tamaño adecuado, la gradación, la forma y la durabilidad son atributos importantes para el rendimiento general de la estructura del pavimento. Los agregados de base granular y subbase pueden consistir en partículas duraderas de piedra

triturada, grava o escoria capaces de resistir los efectos de manipulación, dispersión y compactación sin generar finos nocivos.

Algunas de las propiedades más importantes de los agregados para la base granular y la subbase incluyen:

**Gradación:** Se utiliza una amplia gama de tamaños y gradaciones de agregados según el tipo de pavimento y las condiciones a las que se someterán la base granular y la subbase. La clasificación agregada influye notablemente en la estabilidad de la base, el drenaje (permeabilidad) y la susceptibilidad a las heladas. Los agregados para su uso como base granular tienden a tener una densidad densa con un tamaño máximo de 50 mm (2 pulgadas) o menos, mientras que la subbase granular puede tener un tamaño máximo nominal comúnmente de hasta 100 mm (4 pulgadas). El porcentaje de finos (menos 0.075 mm (tamiz No. 200)) en la base granular es limitado, para fines de drenaje y susceptibilidad a las heladas, a un máximo de 8 por ciento, con hasta 12 por ciento permitido en la subbase granular.

**Forma de partícula:** Se prefiere el uso de agregado angular, casi equidimensional con textura de superficie rugosa sobre partículas de agregado redondeada y lisa. Las partículas finas o planas y alargadas tienen una resistencia reducida cuando se aplica carga al lado plano del agregado o en su dimensión más corta y también son propensas a la segregación y descomposición durante la compactación, creando finos adicionales.

**Estabilidad de la base:** La base granular debe tener una alta estabilidad, particularmente en una estructura de pavimento de asfalto flexible. Se prefiere el agregado angular grande, denso y consistente en partículas duras y duraderas para la estabilidad. Para una máxima estabilidad de la base, la base granular debe tener finos suficientes para llenar los huecos y la gradación completa debe estar cerca de su densidad máxima. Sin embargo, mientras que la densidad base se maximiza con un contenido de finos entre 6 y 20 por ciento, la capacidad de carga disminuye cuando el contenido de finos excede aproximadamente el 9 por ciento. La estabilidad también aumenta con el porcentaje de partículas trituradas y al aumentar el tamaño del agregado grueso.

**Permeabilidad:** Dado que la subbase granular proporciona drenaje para la estructura del pavimento, su clasificación y conductividad hidráulica son importantes. El contenido de finos generalmente se limita a un máximo del 10 por ciento para la construcción normal del pavimento, y del 6 por ciento cuando se requiere una subbase de drenaje libre.

**Plasticidad:** La presencia de finos plásticos puede reducir significativamente la resistencia a la carga de la base granular y la subbase.

**Resistencia a la abrasión:** Las partículas deben tener la resistencia suficiente para resistir la degradación o descomposición durante la construcción, bajo compactación o bajo tráfico.

**Módulo resistente:** Puede ayudar a proporcionar coeficientes de diseño para pavimentos de varias capas al definir la relación entre la tensión y la deformación de las capas de base granular y subbase.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> (Asphalt Recycling Guide, s.f.)

### CAPÍTULO III

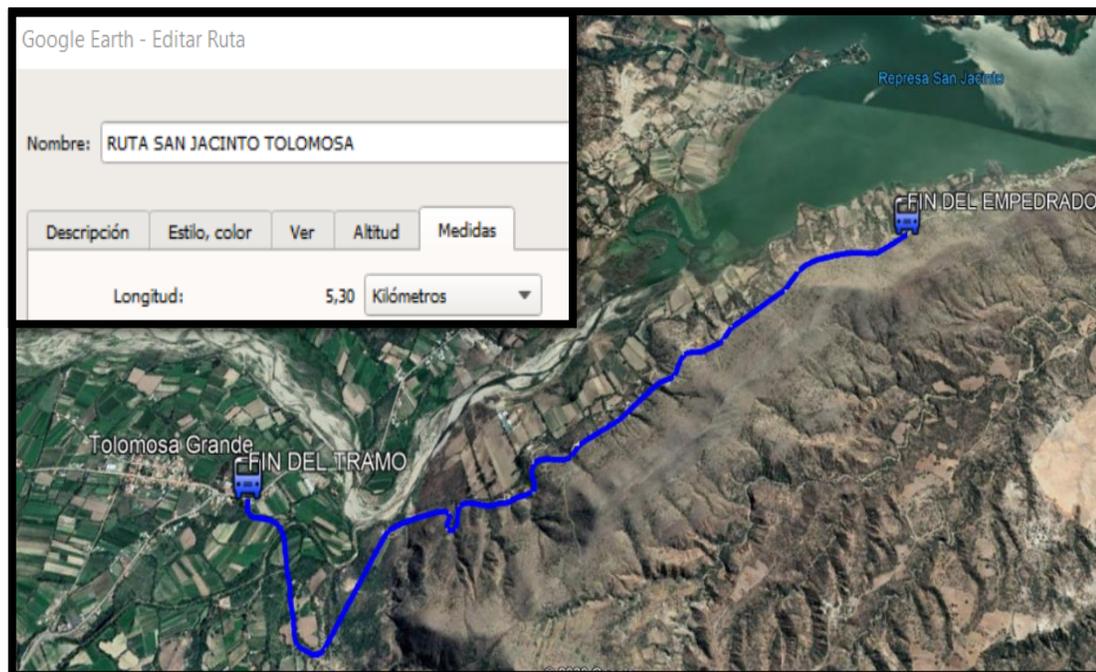
## APLICACIÓN PRÁCTICA DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON RAP PARA LA CAPA BASE

### 3.1 UBICACIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO

Departamento: TARIJA  
Provincia: CERCADO  
Localidad: SAN JACINTO – TOLOMOSA GRANDE

Entre octubre a diciembre del año 2020 se realizó una investigación de estabilización de suelos con RAP para la capa base, en el tramo que conecta las comunidades de SAN JACINTO – TOLOMOSA GRANDE que tiene una distancia aproximadamente 5.30 kilómetros.

Imagen 3.1 Mapa de ubicación del tramo San Jacinto - Tolomosa Grande



Fuente: Programa Google Earth

### 3.2 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE LOS MATERIALES

Suelo: Se hizo un recorrido de las calles sin pavimentar y de caminos que una comunidades para realizar el estudio donde se eligió el más adecuado donde presenta varios déficits en la capa subrasante, se tomó como prioridad que sea una vía transitable.

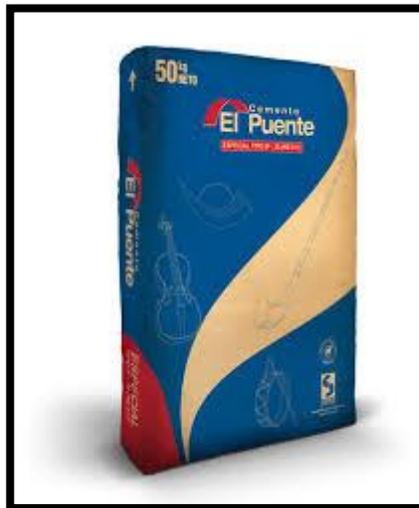
Imagen 3.2 Tramos viales que se realizó visitas técnicas



Fuente: Elaboración propia

Cemento: Para la obtención del cemento se eligió el puente IP 30 tipo I, el cual se compró a una agencia cercana que el precio moderado es de 46 bs

Imagen 3.3 Cemento el Puente



Fuente: Elaboración propia

Pavimento asfáltico reciclado (RAP): Para la obtención de materiales desechables (RAP) se pueden recolectar del tramo Tarija - Entre Ríos, donde se observan que se han realizado muchas reparaciones y el material está cerca de la carretera, lo que tiene un impacto en el medio ambiente.

Imagen 3.4 Obtención del material desechado RAP



Fuente: Elaboración propia

### 3.3 EXTRACCIÓN DEL MATERIAL

Selección de los puntos de estudio:

Lo primero que hay que consignar en la obtención de una muestra es que ésta sea representativa del suelo a estudiar. Un muestreo adecuado y representativo es de primordial importancia, pues tiene el mismo valor que el de los ensayos en sí. A menos que la muestra obtenida sea verdaderamente representativa de los materiales que se pretende usar, cualquier análisis de la muestra solo será aplicable a la propia muestra y no al material del cual procede. Para la selección del tramo, se tuvo en cuenta que fuera una carretera que no se encuentre en buenas condiciones.

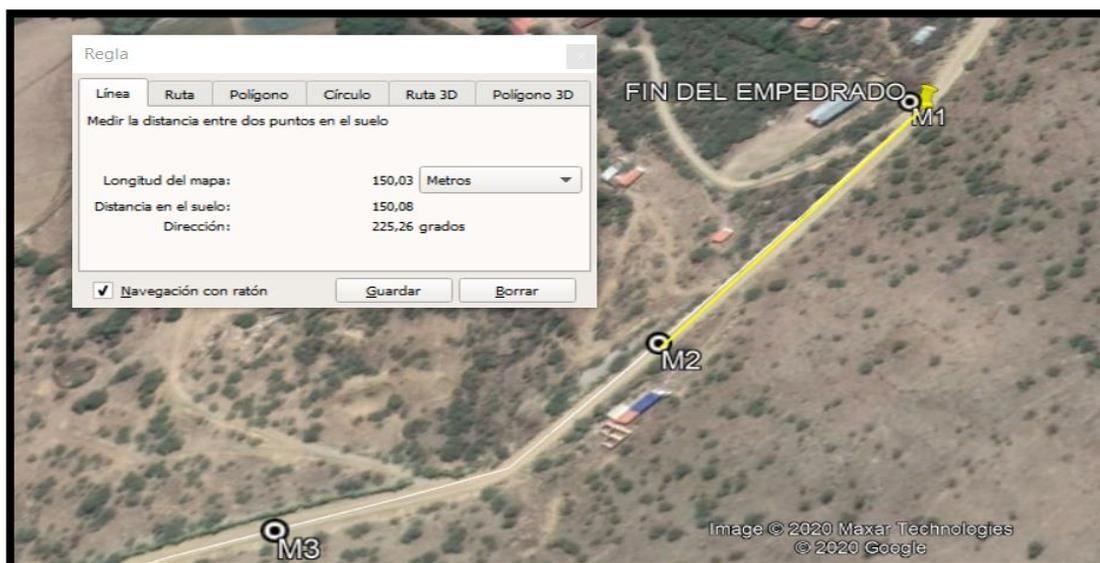
Imagen 3.5 Proceso de obtención de las muestras representativas



Fuente: Elaboración propia

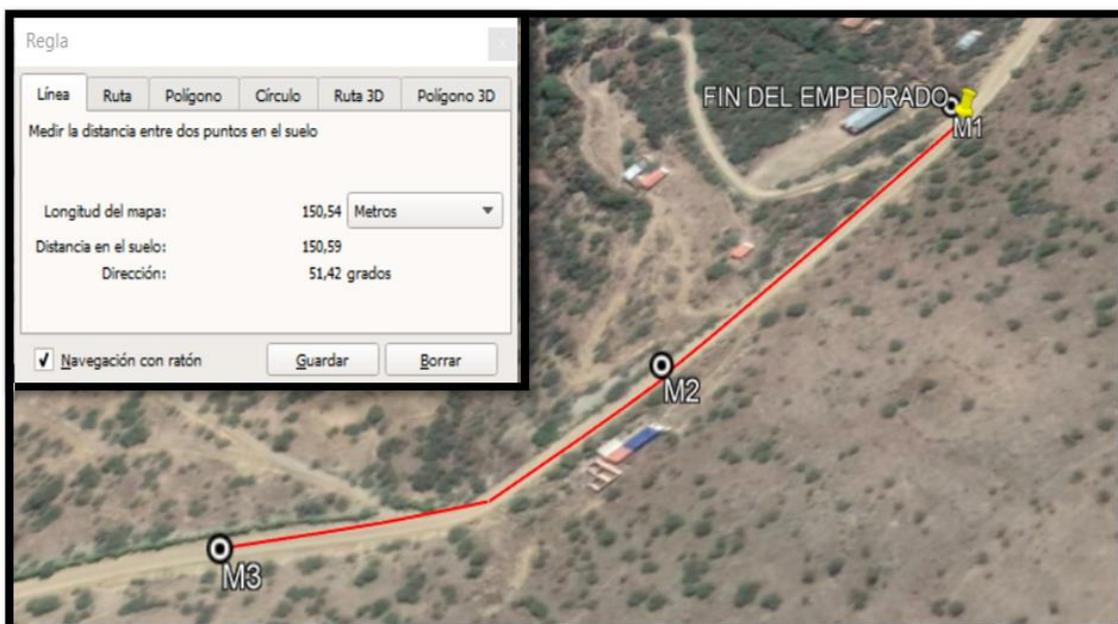
El muestreo se realiza cada 150 metros por el método de tres bolillos, el tramo es de 5,3 kilómetros de longitud, haciendo un total de 35 muestras, realizándose pruebas de caracterización para conocer el tipo de suelo.

Imagen 3.6 Proceso de recolección del suelo



Fuente: Programa Google Earth

Imagen 3. 7 Proceso de recolección del suelo cada 150 m método tres bolillos



Fuente: Programa Google Earth

En la siguiente tabla se muestra las coordenadas de cada muestra. Estas coordenadas se obtuvieron utilizando navegador GPS (aplicación móvil)

Imagen 3. 8 Tramo vial San Jacinto - Tolomosa Grande



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1 Coordenadas UTM de las muestras realizadas

N °	Coordenadas UTM		N °	Coordenadas UTM	
	Este	Norte		Este	Norte
M1	319903.2	7609426.7	M19	318157.9	7607739.9
M2	319798.9	7609309.9	M20	318180.2	7607626.6
M3	319721.7	7609251.4	M21	318058.6	7607559.2
M4	319629.3	7609242.3	M22	317971.1	7607533.5
M5	319507.4	7609188.9	M23	317861.7	7607497.2
M6	319417.9	7609134.3	M24	317869.4	7607414.5
M7	319344.4	7609077.3	M25	317829.8	7607426.0
M8	319269.2	7608923.1	M26	317729.9	7607424.9
M9	319193.4	7608840.3	M27	317594.9	7607346.6
M10	319118.9	7608768.4	M28	317522.1	7607192.7
M11	319050.0	7608697.3	M29	317485.8	7607020.9
M12	318992.0	7608578.1	M30	317418.8	7606761.4
M13	318911.3	7608516.8	M31	317274.4	7606792.5
M14	3188347	7608483.9	M32	317169.5	7606972.9
M15	318780.4	7608363.5	M33	317063.2	7607163.5
M16	318671.5	7608249.6	M34	316970.7	7607220.7
M17	318557.7	7608092.0	M35	316822.6	7607266.8
M18	318364.8	7607893.9			

Fuente: Elaboración propia

### 3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Es importante conocer el muestreo del suelo que será analizado en los laboratorios de mecánica de suelos, ya que consta de una actividad por la que se toman todas las muestras necesarias representativas que nos permiten caracterizar el suelo de estudio, de tal manera que la muestra puede ser definida como algo representativo, ya que presentan características o propiedades del material que se estudia.

### 3.4.1 El suelo

#### 3.4.1.1 Ensayos de laboratorio al suelo natural

Una vez obtenido las muestras de suelo y llevarlas al laboratorio se inició los ensayos de laboratorio con la finalidad de determinar sus propiedades físicas en relación a la estabilidad y capacidad portante de la subrasante.

A continuación, se indican la descripción de los ensayos de laboratorio que se realizaron para determinar la clasificación de los suelos de acuerdo a la granulometría y límites de consistencia.

#### 3.4.1.2 Determinación de contenido de humedad

Es un ensayo que permite determinar la cantidad de agua presente en una cantidad dada de suelo en términos de su peso en seco. A continuación, se indica los resultados obtenidos

Tabla 3.2 Contenido de humedad del muestreo

Muestra	Profundidad (cm)	Contenido de humedad (%)
M1	15	3.3
M2	15	4.6
M3	15	4.7
M4	15	4.6
M5	15	3.5
M6	15	3.3
M7	15	4.3
M8	15	4.3
M9	15	4.0
M10	15	4.3
M11	15	4.8
M12	15	4.9
M13	15	5.0
M14	15	3.5
M15	15	3.4
M16	15	3.0
M17	15	3.0
M18	15	3.8

Muestra	Profundidad (cm)	Contenido de humedad (%)
M19	15	3.3
M20	15	3.8
M21	15	3.5
M22	15	3.9
M23	15	4.0
M24	15	4.0
M25	15	4.0
M26	15	2.8
M27	15	4.0
M28	15	4.3
M29	15	3.1
M30	15	4.1
M31	15	3.9
M32	15	4.3
M33	15	4.7
M34	15	4.3
M35	15	4.5

Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.9 Balanza para contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1.3 Granulometría

#### **Análisis Granulométrico por tamizado (ASTM D-422)**

La granulometría de un suelo indica o da una idea de cómo están distribuidos los granos de este en una muestra representativa de suelo, se utilizan mallas o tamices discriminadores donde quedan materiales eliminados, pasantes y retenidos.

La denominación de los tamices se hace por la medida de la abertura en pulgadas hasta el de 3/8" y los más pequeños por el número de aberturas en una pulgada lineal.

El análisis granulométrico por tamizado se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de tamices agitando el conjunto. La cantidad de suelo retenido en cada tamiz se pesa y se determina el porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz.

El porcentaje de material que pasa por cada tamiz, determinado de la forma anterior, se representa en gráfico semilogarítmico. El diámetro de la partícula se representa en una escala logarítmica (abscisas), y el porcentaje del material que pasa se representa en escala aritmética

## Agregado grueso

Imagen 3.10 Proceso del ensayo de granulometría agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

## Agregado fino

En tanto para el método del lavado en el cual se pesa 500 gr como peso total, se procede a realizar el lavado por la malla número N° 200 de acuerdo a la norma AASHTO-T88. Después que el suelo está seco se pesa y se procede al tamizado por la malla N° 10 , 40 y 200, desde arriba hacia abajo. El primer tamiz, es el de mayor tamaño y es donde inicia el tamizado. Se tapa con el fin de evitar pérdidas de finos; el ultimo tamiz está abajo y descansa sobre un recipiente (base) de forma igual a uno de los tamices, y recibe el material más fino no retenido por ningún tamiz. Luego proceder a realizar el pesaje del material retenido en cada malla.

Imagen 3.11 Proceso del ensayo de granulometría agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3 Resultados de granulometría de los suelos naturales

Análisis granulométrico												
Tamices	Tamaño	% Que pasa del total										
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11
3"	75	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	50	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1"	25.00	93.9	95.8	100.0	95.8	97.0	89.6	98.3	98.4	100.0	97.1	97.7
3/4"	19.00	84.6	93.3	95.8	94.3	95.5	82.8	95.8	96.2	97.1	95.8	96.2
3/8"	9.50	73.3	84.0	90.7	91.8	93.2	78.3	90.8	90.0	93.1	87.9	90.2
Nº4	4.75	64.3	70.0	83.5	87.7	87.1	75.7	88.2	84.2	87.7	76.3	82.5
Nº10	2.00	56.4	61.2	73.9	71.2	70.9	68.6	76.9	73.8	80.1	64.4	77.3
Nº40	0.425	43.7	55.3	57.3	48.3	48.3	56.1	61.9	61.3	71.5	50.1	58.2
Nº200	0.075	19.8	33.4	30.2	29.6	29.9	37.4	44.6	40.3	66.7	30.1	29.5
Tamices	Tamaño	Muestra 12	Muestra 13	Muestra 14	Muestra 15	Muestra 16	Muestra 17	Muestra 18	Muestra 19	Muestra 20	Muestra 21	Muestra 22
3"	75	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	50	100.0	99.5	99.5	100.0	100.0	100.0	100.0	98.8	100.0	100.0	100.0
1"	25.00	100.0	98.7	87.8	87.4	83.7	100.0	92.3	96.8	96.2	93.5	95.3
3/4"	19.00	96.7	97.2	83.3	82.0	78.7	96.2	88.6	95.8	84.1	89.0	91.4
3/8"	9.50	94.4	96.1	80.3	79.0	67.2	93.3	86.8	91.7	73.8	78.0	82.5
Nº4	4.75	90.2	91.9	75.6	73.3	55.4	88.5	83.9	88.8	65.6	70.3	75.0
Nº10	2.00	78.8	86.1	72.4	71.7	47.4	66.6	75.5	76.5	56.3	64.8	68.3
Nº40	0.425	65.8	75.1	62.3	59.6	34.9	54.0	62.1	63.3	47.6	57.8	60.7
Nº200	0.075	36.3	22.4	32.7	14.9	31.4	22.1	35.1	39.6	35.6	38.2	38.5

Fuente: Elaboración propia

Análisis granulométrico												
Tamices	Tamaño	% Que pasa del total										
		Muestra 23	Muestra 24	Muestra 25	Muestra 26	Muestra 27	Muestra 28	Muestra 29	Muestra 30	Muestra 31	Muestra 32	Muestra 33
3"	75	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	97.1	100.0
2"	50	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	92.0	92.0
1"	25.00	97.5	98.8	99.2	91.6	95.7	97.3	90.2	93.9	84.9	94.8	84.9
¾"	19.00	94.8	96.5	94.8	86.2	91.5	93.0	85.7	88.7	78.3	92.3	78.3
3/8"	9.50	89.1	93.6	92.4	78.3	81.0	82.0	71.2	82.5	66.7	90.2	66.7
Nº4	4.75	82.0	86.0	85.5	67.7	70.8	72.0	54.8	72.7	57.1	87.2	57.1
Nº10	2.00	73.8	76.9	71.2	57.2	64.1	66.4	51.3	60.9	48.8	72.6	48.7
Nº40	0.425	64.8	53.1	60.6	43.3	50.1	51.9	42.3	50.7	36.9	56.6	36.8
Nº200	0.075	38.2	27.7	11.5	18.3	30.3	41.2	28.8	38.6	16.8	38.3	16.5
Tamices	Tamaño	% Que pasa del total										
		Muestra 34	Muestra 35									
3"	75	100.0	100.0									
2"	50	95.8	85.3									
1"	25.00	82.2	66.2									
¾"	19.00	75.6	60.7									
3/8"	9.50	60.7	53.5									
Nº4	4.75	50.7	46.2									
Nº10	2.00	43.8	38.4									
Nº40	0.425	33.2	21.1									
Nº200	0.075	19.0	9.5									

Fuente: Elaboración propia

#### 3.4.1.4 Límites de Atterberg (ASTM D4318 AASHTO T90-T89)

Un diagrama esquemático de un dispositivo para determinar el límite líquido se muestra en la Figura, que consiste en una copa de bronce y una base de hule duro. La copa de bronce se deja caer sobre la base por una leva operada por una manivela. Para la prueba del límite líquido se coloca una pasta en la copa. Se corta una ranura en el centro de la pasta de suelo, usando la herramienta de corte estándar. Luego, con la leva operada por la manivela, se levanta la copa y se deja caer desde una altura de 10mm. El contenido de agua en porcentaje para cerrar una distancia de 12.7mm a lo largo del fondo de la ranura a los 25 golpes se define como el límite líquido.

Imagen 3.12 Proceso de ensayo de límites líquidos



Fuente: Elaboración propia

#### 3.4.1.5 Límite plástico (ASTM D-4318)

El límite plástico se define como el contenido de agua, en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollos de 3.2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba es simple y se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal.

Imagen 3.13 Proceso de ensayo de límites plásticos



Fuente: Elaboración propia

El índice de plasticidad IP, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo.

#### 3.4.1.6 Índice de plasticidad

Los límites líquido y plástico son determinados por medio de pruebas de laboratorio relativamente simples que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. Las pruebas son usadas ampliamente por ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo, así como para la identificación del mismo. Casagrande (1932) estudio la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Con base en los resultados de pruebas, propuso una carta de plasticidad que muestra la figura. La característica importante de esta carta es la línea A empírica dada por la ecuación:  $IP = 0.73(LL-20)$ . la línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos orgánicos. las gráficas de los índices de plasticidad contra límites líquidos para las arcillas inorgánicas se encuentran arriba de la línea A y aquellas para limos inorgánicos se hayan debajo de la línea A. los limos orgánicos se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de compresibilidad media. Las arcillas orgánicas se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad. La información proporcionada en la carta de plasticidad es de gran valor y es la base de la

clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos.

Debe notarse, además que una línea llamada línea U se encuentra arriba de la línea A. la línea U es aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora. La ecuación para la línea U se da como:  $IP=0.9(LL-8)$ .

Tabla 3.4 Tabla resultados de plasticidad suelo natural

N°	LL	LP	IP	IG
M1	18.7	16.2	2.5	0
M2	14.1	12.9	1.3	0
M3	16.9	15.5	1.3	0
M4	20.6	18.2	2.4	0
M5	13.9	10.7	3.2	0
M6	15.5	11.0	4.5	0
M7	11.3	10.3	1.0	2
M8	14.5	13.1	1.5	1
M9	14.7	11.1	3.6	6
M10	20.2	13.2	6.9	0
M11	14.1	11.8	2.2	0
M12	17.8	15.0	2.8	0
M13	17.8	15.7	2.2	0
M14	15.6	10.7	4.9	0
M15	13.1	11.8	1.4	0
M16	17.3	12.7	4.6	0
M17	17.1	15.2	1.9	0

N°	LL	LP	IP	IG
M18	10.8	8.8	1.9	0
M19	13.6	10.4	1.9	1
M20	21.0	15.6	5.4	0
M21	23.7	17.8	5.9	1
M22	7.4	6.2	1.2	1
M23	28.8	20.2	8.6	1
M24	12.8	11.8	1	0
M25	15.9	14.6	1.2	0
M26	NP	NP	NP	0
M27	23.0	14.1	8.9	0
M28	19.0	11.8	7.2	1
M29	20.8	16.5	4.2	0
M30	19.6	18.2	1.4	1
M31	15.3	12.5	2.8	0
M32	19.1	15.3	3.8	1
M33	29.0	14.3	14.6	0
M34	20.5	13.3	7.1	0
M35	15.8	8.3	7.5	0

Fuente: Elaboración propia

#### 3.4.1.7 Sistema de clasificación AASHTO (ASTM D3282 AASHTO M-145)

Para la clasificación de los tipos de suelos se siguió la metodología descrita en el capítulo I, correspondiente al ensayo de clasificación AASHTO que es la que recomienda para la estabilización.

Tabla 3.5 Resultados de la clasificación AASHTO

N°	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS
M1	A - 1b (0)	Arena limosa con grava SM
M2	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M3	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M4	A - 2 - 4 (0)	Arena arcilloso-limosa SC-SM
M5	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa SM
M6	A - 4 (0)	Arena arcilloso-limosa con grava SC-SM
M7	A - 4 (2)	Arena limosa SM
M8	A - 4 (1)	Arena limosa con grava SM
M9	A - 4 (6)	Limo baja plasticidad arenoso ML
M10	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M11	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M12	A - 4 (0)	Arena limosa SM
M13	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa SM
M14	A - 2 - 4 (0)	Arena arcilloso-limosa con grava SC-SM
M15	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M16	A - 2 - 4 (0)	Grava arcilloso-limosa con arena GC-GM
M17	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa SM
M18	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M19	A - 4 (1)	Arena limosa SM
M20	A - 4 (0)	Grava arcilloso-limosa con arena GC-GM
M21	A - 4 (1)	Arena arcilloso-limosa con grava SC-SM
M22	A - 4 (1)	Arena limosa con grava SM
M23	A - 4 (1)	Arena arcillosa con grava SC
M24	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa SM
M25	A - 2 - 4 (0)	Arena mal graduada con limo SP SM
M26	A - 1b (0)	Arena limosa con grava SM
M27	A - 2 - 4 (0)	Arena arcillosa con grava SC
M28	A - 4 (1)	Arena arcillosa con grava SC
M29	A - 2 - 4 (0)	Grava arcilloso-limosa con arena GC-GM
M30	A - 4 (1)	Arena limosa con grava SM
M31	A - 1b (0)	Grava limosa con arena GM
M32	A - 4 (1)	Arena limosa con bloques SM
M33	A - 2 - 6 (0)	Grava arcillosa con arena GC
M34	A - 2 - 4 (0)	Grava arcillosa con arena GC
M35	A - 2 - 4 (0)	Grava mal graduada con arcilla con arena GP GC

Fuente: Elaboración propia

**Nota:** Luego de realizar la caracterización del tramo vial, se observa que el suelo que predomina es A-2-4, se procederá al estudio del mismo con fines de investigación.

### 3.4.1.8 Proctor modificado

Este método de ensayo cubre los procedimientos de compactación en laboratorio que se utilizan para determinar las relaciones entre el contenido de agua y el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactada en un molde con un diámetro de 101.6 o 152.4 mm (4 ó 6 pulg) con un pisón de 44.5-N (10-lbf) que cae a una altura de 457 mm (18 pulg) produciendo un esfuerzo de compactación

Existen tres procedimientos o métodos. El método que se usó para este proyecto de investigación sería por el procedimiento o método “A” según el siguiente cuadro:

Tabla 3.6 Métodos del ensayo proctor modificado

Porcentaje % retenido acumulado	Procedimiento “a”	Procedimiento “b”	Procedimiento “c”
Tamiz ¾”	-----	-----	≤ 30 %
Tamiz 3/8”	-----	≤ 20%	>20%
Tamiz n°4	≤20%	>20%	-----
Molde ø	4”	4”	6”
N ° de capas	5	5	5
N ° de golpes por capa	25	25	56
Peso del martillo	10 lb	10lb	10lb
Altura de caída en pulg	18”	18”	18”
Cantidad de material en kg	4	4	6
Usar material que pasa	N°4	3/8”	¾

Fuente: Braja M. Das 2014

**Procedimiento.** Se coloca un suelo a un contenido de agua seleccionado en cinco capas dentro de un molde de dimensiones particulares, con cada capa compactada con 25 o 56 golpes (según el método determinado anteriormente) de un pisón de 44.5 N (10 lbf) que cae desde una distancia de 457mm (18 pulg), sometiendo al suelo a un esfuerzo de compactación total de aproximadamente 2700 kn m/m<sup>3</sup>.

Se determina el peso unitario seco resultante. El procedimiento se repite con un número suficiente de contenido de agua para establecer una relación entre el peso unitario seco y el contenido de agua del suelo. Este dato, cuando se gráfica, representa una relación curvilínea conocida como curva de compactación. Los valores del óptimo contenido de

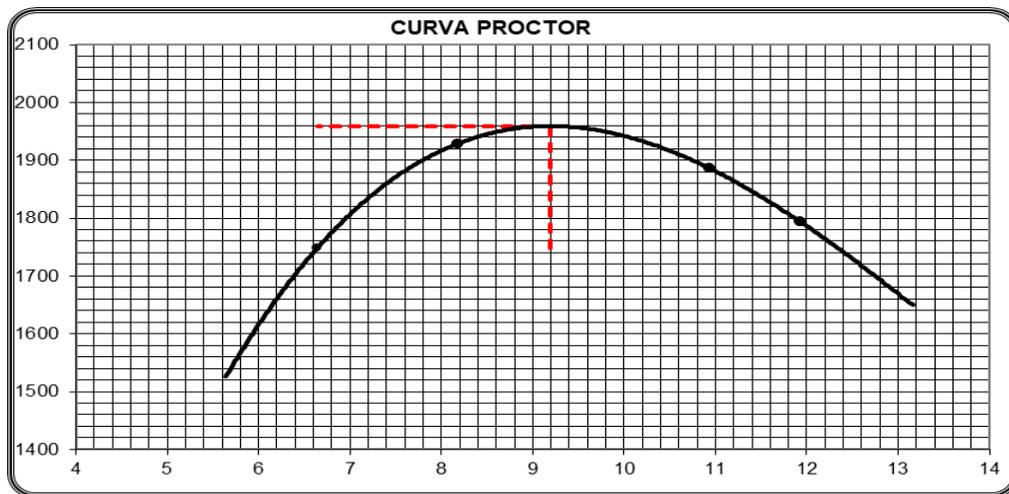
agua y el máximo peso unitario seco modificado se determinan en base a la curva de compactación.

Imagen 3.14 Proceso del ensayo proctor modificado



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1 Densidad vs contenido de Humedad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Proctor modificado suelo natural

Suelo	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (Kg/m3)
A-2-4	9.2	1959

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1.9 Relación de soporte de california CBR

#### Relación de Soporte de California CBR (ASTM D 1883 AASHTO T-193)

El ensayo C.B.R, se realizó de acuerdo a la norma AASHTO T-193, para obtener la resistencia del suelo, y así evaluar la capacidad de soporte del suelo en la capa de subrasante, base y sub-base de pavimentos. Para la obtención de los diferentes CBR se efectuaron tres moldes con distinta energía de compactación; la primera con 12 golpes, la segunda con 25 golpes y la tercera, con 56 golpes por cada ensayo de CBR.

Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos, se sometieron a un proceso de inmersión en agua para simular las condiciones de saturación a las cuales podrían estar sometidos los suelos como es la subrasante de una carretera, y en esta forma, obtener los C.B.R de los suelos bajo las condiciones más críticas ; esto durante un período mínimo de 96 horas donde se colocan pesas sobre las mismas, con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares , como de la estructura de pavimento y por otro lado determinar su expansión efectuando 4 lecturas empleando un extensómetro debidamente calibrado.

El ensayo de penetración se basa en la aplicación de una presión a una velocidad normalizada creciente efectuado mediante la prensa a la que va acopiada un pistón de sección anular sobre la muestra de suelo compactado con la humedad óptima. A continuación, se gráfica el proceso del ensayo de CBR.

Imagen 3.15 Proceso del ensayo relación soporte de california



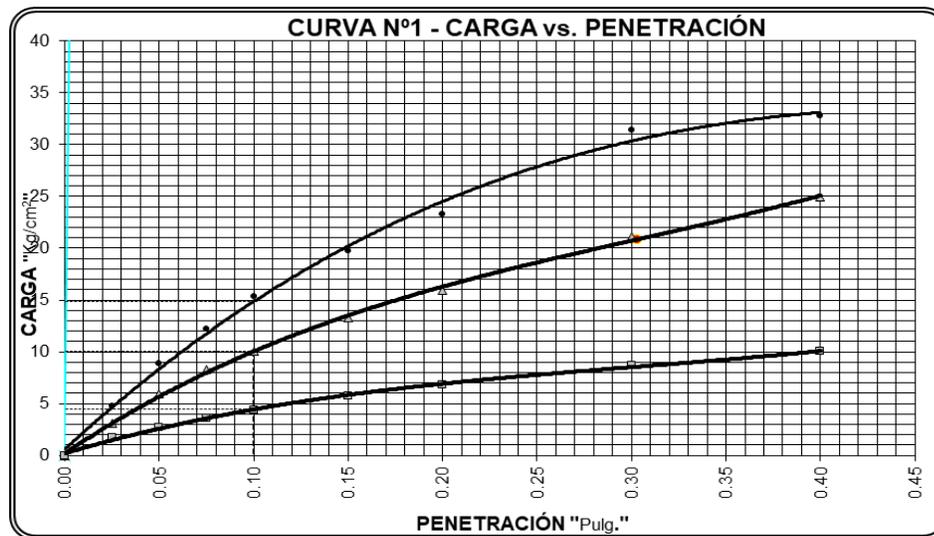
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 8 Resultados de CBR de los suelos y la expansión suelo natural

Muestra	A-2-4		
Dens. al 90%:	1.763 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 90%:	4.7
Dens. al 95%:	1.861 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 95%:	13.2
Dens. al 100%:	1.959 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 100%:	21.7
Exp. al 95%:	1.3 gr/cm <sup>3</sup>	Exp. al 100%:	1.3

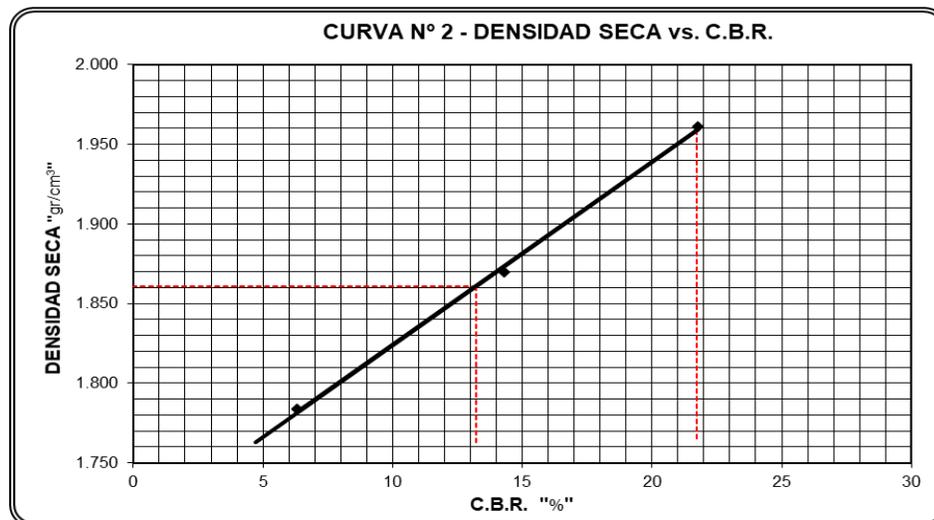
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2 Carga vs penetración



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3 Densidad seca vs CBR



Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2 RAP

Luego de la recolección del RAP se procede a la trituración por el equipo de chancadora que se encuentra en Santa Ana la nueva.

#### 3.4.2.1 Granulometría

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

Imagen 3.16 Recolección, trituración y clasificación del RAP



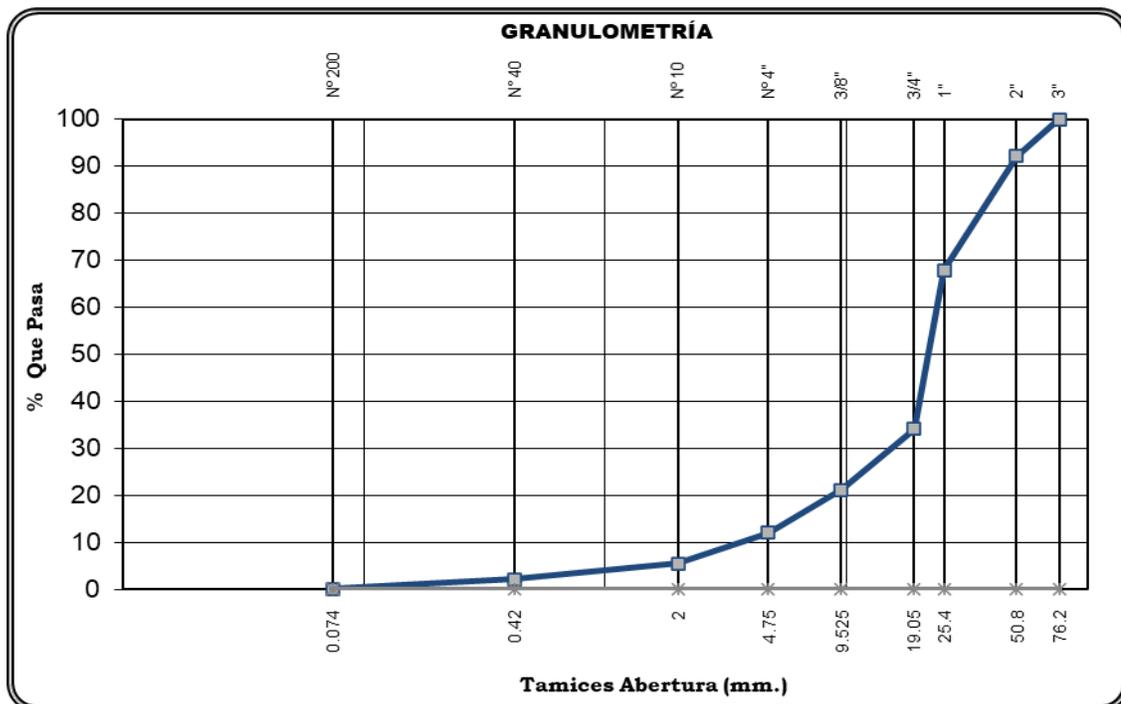
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9 Distribución granulométrica de material desechado RAP

Peso total seco (grs.)		4500.8	Muestra pasa tamiz N ° 4		500
Tamiz	Peso retenido tamiz (grs.)	Peso retenido acumulado (grs.)	Retenido tamiz (%)	Retenido acumulado (%)	Que pasa (%)
N °					
3"	0	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	351.8	351.8	7.8	7.8	92.2
1"	1095.3	1447.1	24.3	32.2	67.8
3/4"	1514.6	2961.7	33.7	65.8	34.2
3/8"	584.6	3546.3	13.0	78.8	21.2
4	407.7	3954.0	9.1	87.9	12.1
10	272.7	272.7	54.5	94.5	5.5
40	134.4	407.1	26.9	97.7	2.3
200	84.8	491.9	17.0	99.8	0.2

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.4 Granulometría RAP



Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3 Cemento

#### 3.4.3.1 Finura

Es una de las propiedades más importantes del cemento, ya que ella determina en gran medida la velocidad de hidratación, el desarrollo del calor de hidratación, la retracción y la adquisición de resistencia del cemento. Un cemento con grano fino se hidrata con mucha más facilidad.

Formula:

$$F=100 - \left( \frac{Pr}{Pi} \times 100 \right)$$

Donde:

F = Finura del cemento expresado en % en peso del residuo que no pasa el tamiz N°200.

Pr = Peso del residuo que no pasa tamiz N° 200. (gr)

Pi = Peso inicial de la muestra. (gr)

La relación que se utiliza para determinar el porcentaje de finura es la siguiente:

Que el ensayo del porcentaje de finura un tanto bajo significa que el cemento utilizado no era muy bueno, el tener un porcentaje de un 90 % o 95 % nos haría conocer que el cemento utilizado es de buena calidad

Procedimiento se pesa tres muestras de 50 gr cada uno. Previamente antes de usar el cemento este debe estar seco, sacada de una bolsa bien fresca. Antes de usar los tamices debemos asegurarnos que estos estén completamente limpios para no obtener datos errados por partículas que podría contener ya sea de anteriores ensayos hechos o partículas de otras impurezas. Introducimos los 50 gramos de cemento en el tamiz N° 40, teniendo correctamente armado el juego de tamices de forma que el tamiz N° 40 este encima del N° 200 y este a su vez sobre la base. Aseguramos la tapa y agitamos la muestra utilizando los tamices, esperamos el lapso de 10 a 15 minutos. Se hacen las pesadas de las fracciones retenidas en cada malla y el recipiente del fondo, procediendo de la forma indicada. Todos los pesos retenidos se anotan en la hoja de registro para el cálculo. Finalmente pesamos la muestra que queda retenida en los tamices N° 40 y 200. este mismo procedimiento para las 2 muestras restantes.

Imagen 3.17 Realización de la finura cemento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10 Resultado del ensayo de fino del cemento

<b>Pruebas pesos retenidos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Ud.</b>
Peso inicial del cemento	50	50	50	gr
Peso del cemento retenido en el tamiz N°40	0.3	0.1	0.0	gr
Peso del cemento retenido en el tamiz N°200	2.1	3.6	2.8	gr
Peso del cemento en la base	47.7	45.3	48.4	gr
Perdidas después del tamizado	0.1	1.0	0.8	gr
Peso retenido de tamices + pérdida	2.5	4.7	3.6	gr
Finura del cemento	95.0	90.6	92.8	%
Promedio finura del cemento	92.8			%

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3.2 Peso específico

El Peso de una sustancia se define como el peso por unidad de volumen. Se calcula al dividir el peso de la sustancia entre el volumen que esta ocupa. En el sistema métrico decimal, se mide en kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ).

El peso específico del concreto hidráulico se realiza aprovechando el conocido principio de Arquímedes por lo que el peso específico viene dado como:

Formula: 
$$P.E = \frac{P_c}{V}$$

Donde:

$P_c$  = Peso del cemento (gr).

$V$  = Volumen desplazado en (ml).

Para el procedimiento se pesa aproximadamente 64 gr de la muestra de cemento y se va introduciendo poco a poco en el matraz que tiene el líquido lleno al nivel de la graduación del cuello, después de que todo el cemento haya sido introducido en el matraz se tapa y se hace rodar en posición inclinada con el fin de eliminar el aire del cemento, se continua asta eliminar las burbujas de aire. Por último, se lee en el matraz la graduación correspondiente al nuevo nivel del líquido y se anota el dato

Imagen 3.18 Realización del peso específico del cemento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11 Resultados del ensayo peso específico

<b>Ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Ud</b>
Peso del cemento	64	64	64	gr
Vaso de precipitación + alcohol	300	300	300	ml
Vaso de precipitación + alcohol + cemento	320	321	324	ml
Volumen desplazado	20	21	24	ml
Peso específico	3.2	3.0	2.7	gr/ml
Peso específico promedio	3.0			gr/ml

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA CON PORCENTAJES DE RAP

Se comparan las características del suelo natural con las especificaciones técnicas de la capa base para ver si cumple o no con las características especificadas.

Tabla 3.12 Comparación del suelo natural con las especificaciones técnicas

<b>Características</b>	<b>Requerimiento para capa base</b>		<b>Suelo estudiado</b>
	<b>Deseable</b>	<b>Adecuado</b>	<b>Suelo natural</b>
Limite líquido %	25 máx.	30 máx.	23.4
Índice de plasticidad %	8 máx.	8 máx.	9.0
Compactación %	100 min.	100 min.	100.1
CBR %	100 min.	80 min.	21.7
Desgaste los Ángeles %	40 máx.	40 máx.	52.2

Fuente: Elaboración propia

Como puede verse, el suelo natural no cumple con las especificaciones técnicas de una capa base. Se realizará una mezcla de suelo cemento para cumplir con las especificaciones de la capa base. Dependiendo de si el suelo mejora, se agrega el material desechado (RAP). Para la estabilización de suelo se tomará una referencia una tabla para la dosificación de cemento por tipo de suelo según clasificación A.A.S.H.T.O

Tabla 3.13 Dosificación suelo - cemento

Clasificación del suelo por el sistema A.A.S.H.T. O			Peso de cemento para estabilización (%)
Suelo granular	A1	A-1-a	5-7
		A-1-b	7-9
	A2	A-2-4	7-10
A-2-5			
A-2-6			
A-2-7			
	A3		8-12
Suelo Fino	A4		8-12
	A5		8-12
	A6		10-14
	A7	A-7-5	10-14
A-7-6			

Fuente: Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, Vol. 37, No 1 (2019)

Tomando como referencia 7 – 10 % de peso de cemento, ya que el tipo predominante en este tramo es un A-2-4. Para saber cuál de estos dos porcentajes cumple con las especificaciones técnicas, se caracterizarán los materiales con los dos porcentajes de cemento

### 3.5.1 Dosificación del cemento con porcentaje de 7 % y 10%

Para la dosificación se realizará los ensayos de compactación para conocer la humedad óptima y densidad óptima para realizar el CBR

#### 3.5.1.1 Proctor modificado porcentaje de 7 % y 10%

El ensayo de Proctor efectuamos para determinar un óptimo contenido de humedad, para la cual se consigue la máxima densidad seca del suelo con una compactación determinada.

#### Procedimiento

Secar el material en una bandeja, disgregamos los terrones de material fino. cuarteamos la muestra y Tamizamos a través de las mallas pesamos el molde cilíndrico, agregamos cemento por peso. Donde se utilizará las dosificaciones de 7 % y 10 % de la muestra. se emplea material que pasa por el tamiz N° 4, preparar 4 o 5 muestras de 3 kg. Colocar la primera capa en el molde y aplicar 25 golpes, los golpes deben de ser aplicado a todas las áreas y tiene que ser de caída libre, la última capa debe quedar en el collarín de tal forma

que luego pueda enrasarse el molde con una regla metálica quitando previamente el collarín, retirar la base y registrar el peso del suelo más el molde con los datos obtenidos se calculó el contenido la densidad seca y la humedad óptima.

Este procedimiento se realizó con material natural y con incorporación de cemento

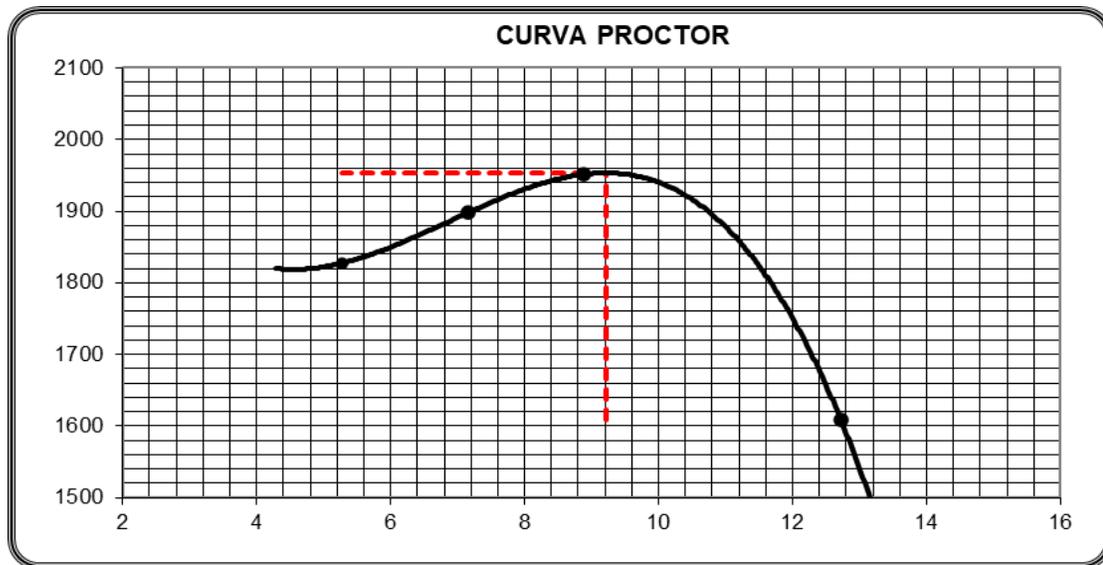
Imagen 3.19 Ensayo de proctor modificado con cemento al 7 %



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Gráfico 3.5 Densidad vs contenido humedad con 7% de cemento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14 Proctor modificado suelo - cemento 7%

Suelo	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (Kg/m³)
A-2-4	9.2	1953

Fuente: Elaboración propia

### Dosificación del cemento con porcentaje de 10 %

Para la dosificación, proceda a realizar el mismo procedimiento, pero ahora con una adición del 10% de cemento

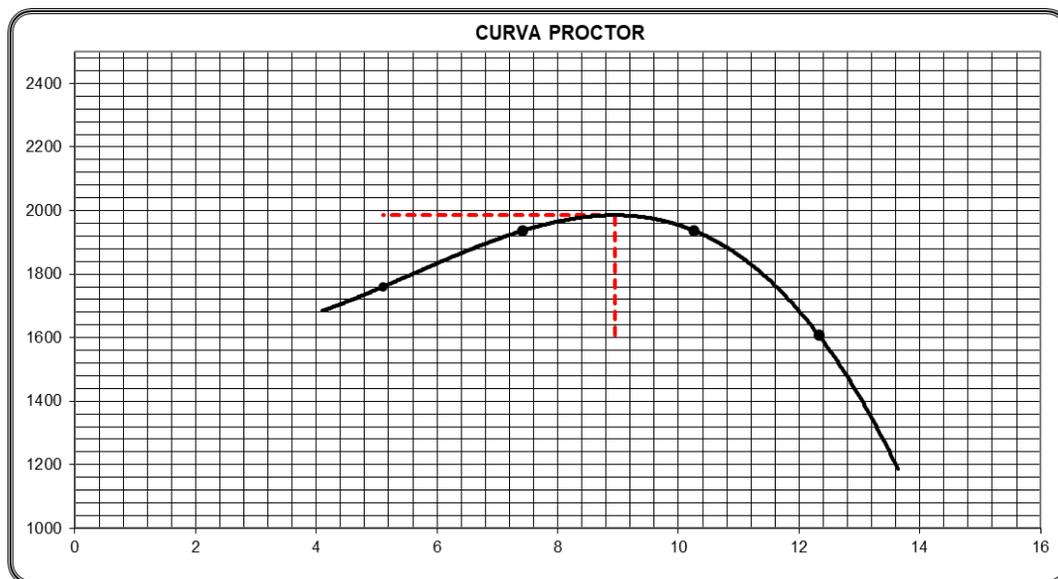
Imagen 3.20 Ensayo de proctor modificado con cemento al 10 %



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Gráfico 3.6 Densidad vs contenido humedad con 10% de cemento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15 Proctor modificado suelo - cemento 10%

Suelo	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (Kg/m <sup>3</sup> )
A-2-4	9.0	1978

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.1.2 Ensayo de CBR para las dosificaciones 7 y 10 %

Dosificación de suelo cemento 7% y 10% para CBR.

#### Ensayo de CBR

Realizamos este ensayo de índice de California (CBR) de medida para calcular la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidad y humedad, cuidadosamente controladas.

#### Procedimiento

Secar el material en una bandeja, disgregamos los terrones de material fino. cuarteamos la muestra y tamizamos a través de las mallas N° 4 pesamos el molde cilíndrico, agregamos agua por peso de la muestra hasta amasarlo. para el suelo natural de igual manera se trabajara con la incorporación del cemento 7 % y 10 % para las otras ,colocar la primera capa en el molde y aplicar 25 y los golpes deben de ser aplicado en todas las áreas hasta la última capa, enrasarse el molde con una regla metálica quitando previamente el collarín retirar la base y registrar el peso más el molde para calcular la penetración CBR, saturarlo por 96 horas luego se escurre durante 15 minutos y se pesa el molde con el material saturado y se pesa y se realiza el ensayo de penetración aplicando una sobrecarga y con los datos realizamos los cálculos, para determinar el CBR.

Imagen 3.21 Ensayo de relación soporte califonia CBR suelo cemento 7%



Fuente: Elaboración propia

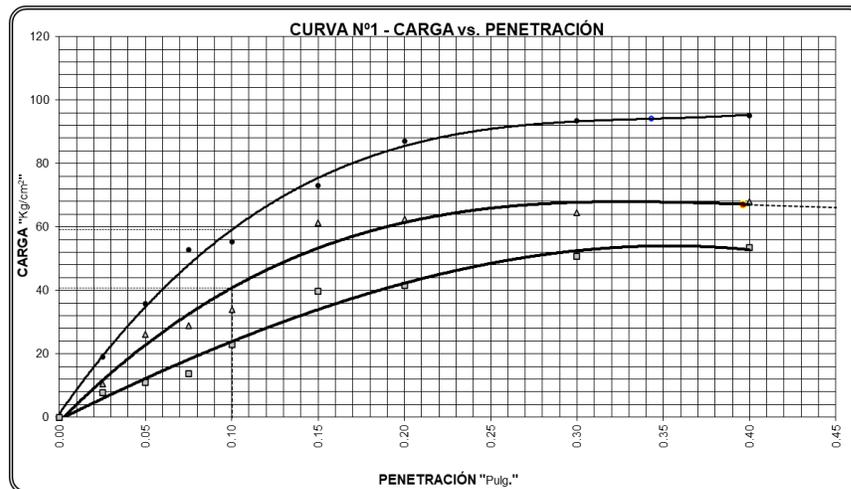
Tabla 3.16 CBR de suelo y la expansión del suelo - cemento 7 %

Muestra	Suelo cemento 7 %		
Dens. al 90 %:	1.758 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 90 %:	29.1
Dens. al 95 %:	1.856 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 95 %:	56.3
Dens. al 100 %:	1.953 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 100 %:	83.5
Exp. al 95 %:	1.2	Exp. al 100 %:	1.10

Fuente: Elaboración propia

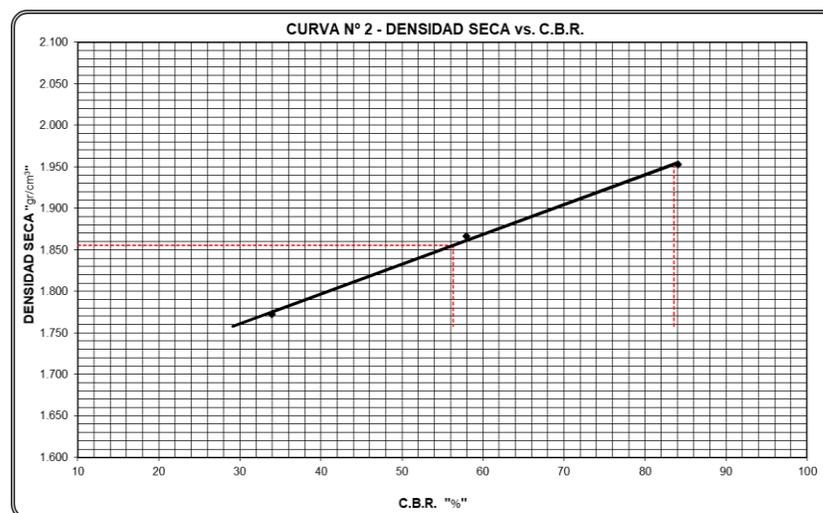
A continuación, se muestran las curvas de carga vs penetración para los suelos.

Gráfico 3.7 Carga vs penetración con adición 7 % de cemento



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.8 Densidad seca vs CBR con adicción de 7 % de cemento



Fuente: Elaboración propia

## Dosificación de suelo - cemento 10%

### Ensayo de CBR

Realizamos este ensayo de índice de California (CBR) de medida para calcular la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidad y humedad, cuidadosamente controladas.

Imagen 3.22 Ensayo de relación soporte california CBR suelo - cemento 10 %



Fuente: Elaboración propia

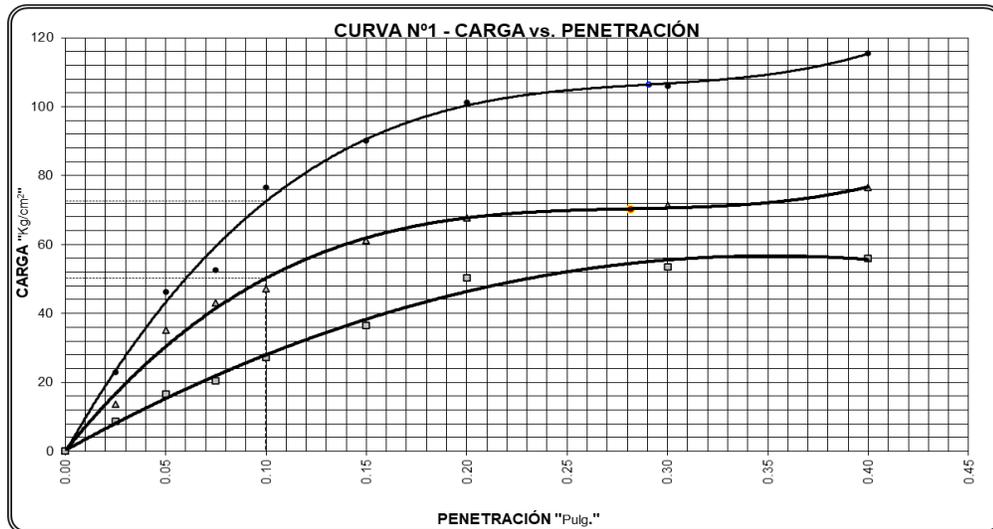
Tabla 3.17 CBR de suelo y la expansión del suelo - cemento 10 %

Muestra	Suelo cemento 10 %		
Dens. al 90 %:	1.780 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 90 %:	33.0
Dens. al 95 %:	1.879 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 95 %:	68.7
Dens. al 100 %:	1.978 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 100 %:	104.5
Exp. al 95 %:	1.2	Exp. al 100 %:	1.08

Fuente: Elaboración propia

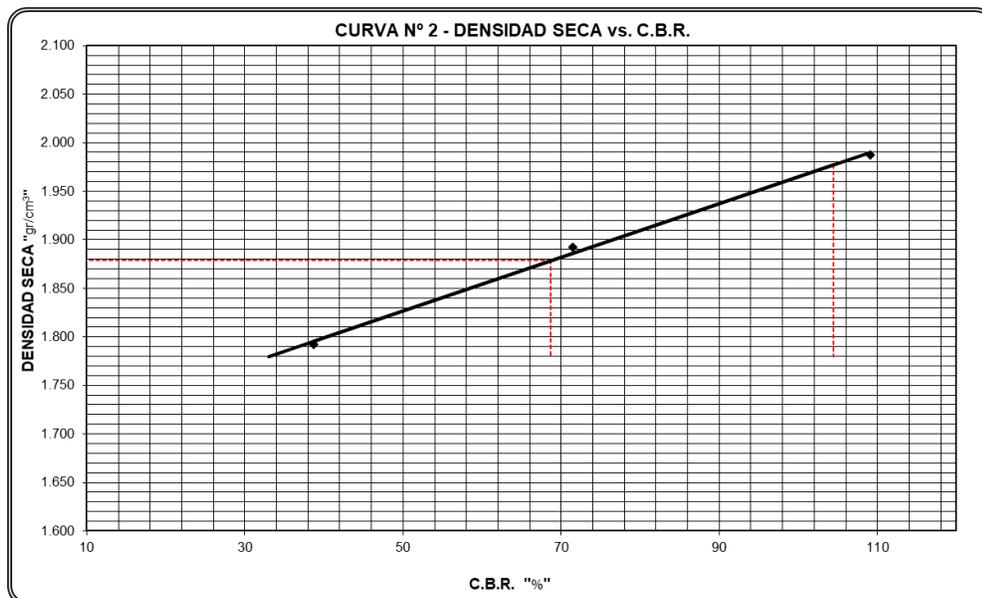
A continuación, se muestran las curvas de carga vs penetración para los suelos.

Gráfico 3.9 Carga vs penetración con adición 10 % de cemento



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.10 Densidad seca vs CBR con adicción de 10 % de cemento



Fuente: Elaboración propia

Obteniendo los resultados de la mezcla de suelo cemento se hará la comparación con las especificaciones de capa base

### 3.5.2 Análisis y comparación

Tabla 3.18 Comparación de las especificaciones técnicas para capa base

Características	Requerimiento para capa base		Suelo estudiado		
	Deseable	Adecuado	Suelo natural	Cemento 7%	Cemento 10%
Límite líquido %	25 máx.	30 máx.	23.4	21	17
Índice de plasticidad %	8 máx.	8 máx.	9.0	7.5	6.8
Compactación %	100 min	100 min	100.1	100.2	100.6
CBR %	100 min	80 min	21.7	83.5	104.5
Desgaste los Ángeles %	40 máx.	40 máx.	52.2	-	-

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los resultados de la caracterización, se encuentra que en las dosificaciones 7 y 10% del cemento, algunas características están fuera de las especificaciones técnicas para capa base, pero la característica del CBR del suelo han mejorado mucho. Donde trabajaremos con un porcentaje de 7 % de cemento.

### 3.5.3 Dosificación de suelo - RAP - cemento

Después de haber obtenido el porcentaje del 7 % de suelo cemento, se procede a agregar el material desechable (RAP) en diferentes porcentajes de 10 % ,20 % , 30 % para no cambiar mucho el valor de la resistencia.

Dosificación de la mezcla suelo - RAP - cemento con porcentajes

Tabla 3.19 Dosificación de la mezcla suelo - RAP - cemento en porcentajes

Porcentajes 100 %			
N °	Suelo	RAP	Cemento
M1	83	10	7
M2	73	20	7
M3	63	30	7

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3.1 Proctor modificado dosificación de suelo-RAP-cemento

El ensayo de Proctor efectuamos para determinar un óptimo contenido de humedad, para la cual se consigue la máxima densidad seca del suelo con una compactación determinada.

#### Procedimiento

Disgregamos los terrones de material. Preparamos el RAP por peso de la muestra de 10 % 20 % y 30 % del total de la muestra, luego alistamos el cemento de 7 % por el peso total de la muestra. se emplea material que pasa por el tamiz N°4, preparar 4 o 5 muestras de 6 kg. Colocar la primera capa en el molde y aplicar 25 golpes, los golpes deben de ser aplicado a todas las áreas y tiene que ser de caída libre, la última capa debe quedar en el collarín de tal forma que luego pueda enrasarse el molde con una regla metálica quitando previamente el collarín, retirar la base y registrar el peso del suelo más el molde con los datos obtenidos se calculó el contenido la densidad seca y la humedad óptima.

Dosificación de proctor suelo 83 % - RAP 10 % - cemento 7 %

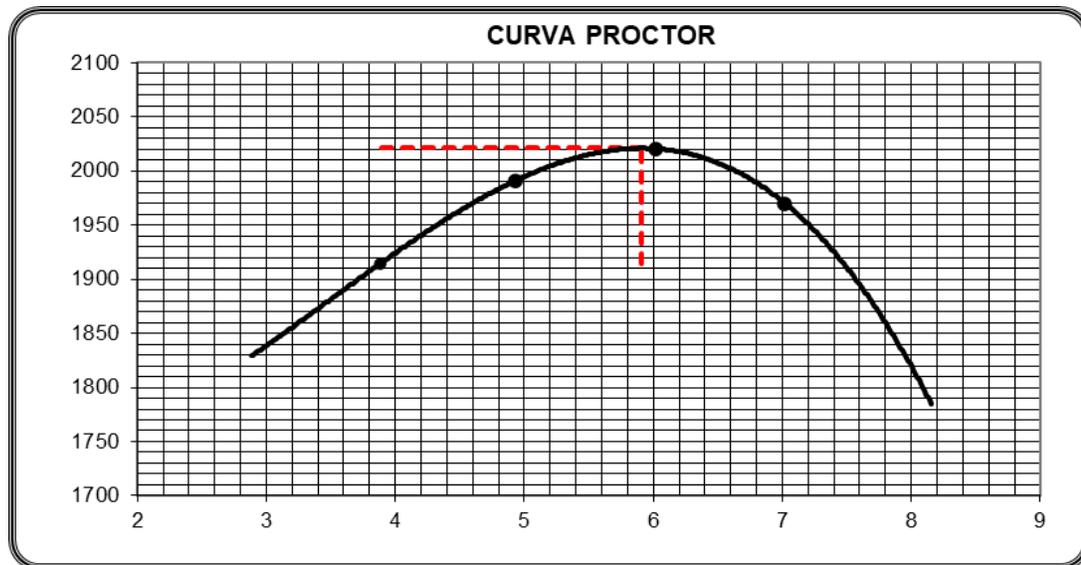
Imagen 3.23 Ensayo de proctor modificado con RAP 10%



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Gráfico 3.11 Densidad vs contenido de humedad con adicción de 10% RAP



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20 Proctor modificado suelo 83 % - RAP 10 % - cemento 7 %

Muestra	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (Kg/m3)
M1	5.9	2021

Fuente: Elaboración propia

Dosificación de proctor modificado suelo 73 % - RAP 20 % - cemento 7 %

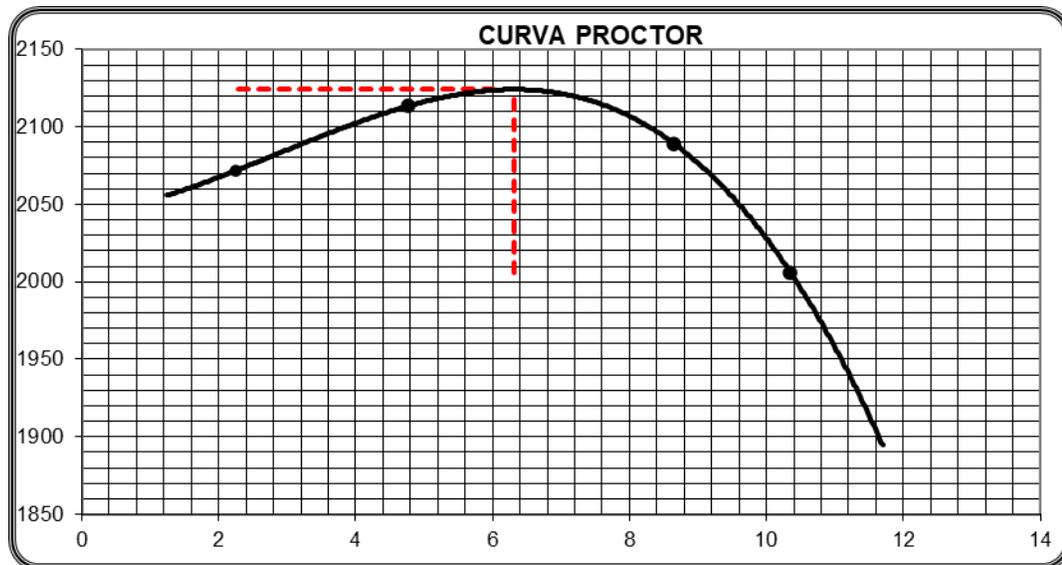
Imagen 3.24 Ensayo de proctor modificado con RAP 20 %



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Gráfico 3.12 Densidad vs contenido de humedad con adicción de 20% RAP



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21 Proctor modificado suelo 73 % - RAP 20 % - cemento 7 %

Muestra	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (Kg/m3)
M2	6.3	2124

Fuente: Elaboración propia

Dosificación de proctor modificado suelo 63 % - RAP 30 % - cemento 7 %

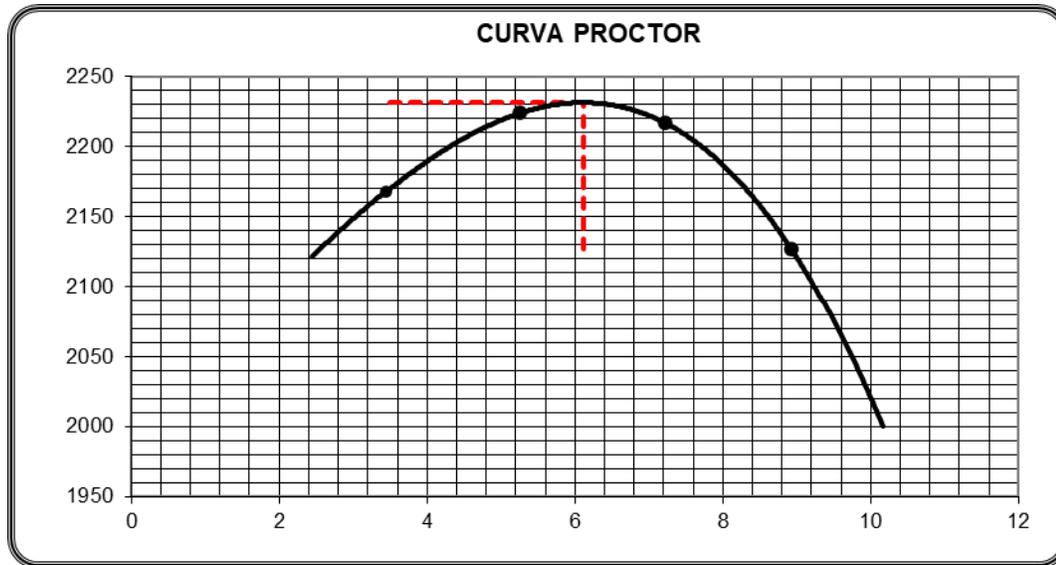
Imagen 3.25 Ensayo de proctor modificado con RAP 30 %



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Gráfico 3.13 Densidad vs contenido de humedad con adicción de 30% RAP



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22 Proctor modificado suelo 63 % - RAP 30 % - cemento 7 %

Muestra	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (Kg/m <sup>3</sup> )
M3	6.1	2231

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3.2 Ensayo de CBR dosificación de suelo-RAP-cemento 10 % 20 % 30 %

Realizamos este ensayo de índice de California (CBR) de medida para calcular la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidad y humedad, cuidadosamente controladas.

#### Procedimiento

Se prepara el material en una bandeja, disgregamos los terrones de material. cuarteamos la muestra y Tamizamos a través de las mallas N° 4 pesamos el molde cilíndrico, agregamos agua por peso de la muestra hasta amasarlo. para el suelo natural de igual manera se trabajara con la incorporación del cemento 7 % y para el material desechado (RAP) en 10 % 20 % 30 % por peso de muestra ,colocar la primera capa en el molde y

aplicar 25 y los golpes deben de ser aplicado en todas las áreas hasta la última capa, enrasarse el molde con una regla metálica quitando previamente el collarín retirar la base y registrar el peso más el molde para calcular la penetración CBR, saturarlo por 96 horas luego se escurre durante 15 minutos y se pesa el molde con el material saturado y se pesa y se realiza el ensayo de penetración aplicando una sobrecarga y con los datos realizamos los cálculos, para determinar el CBR

Dosificación de CBR suelo 83 % - RAP 10 % - cemento 7 %

Imagen 3.26 Ensayo relación soporte califonia CBR con 10% RAP



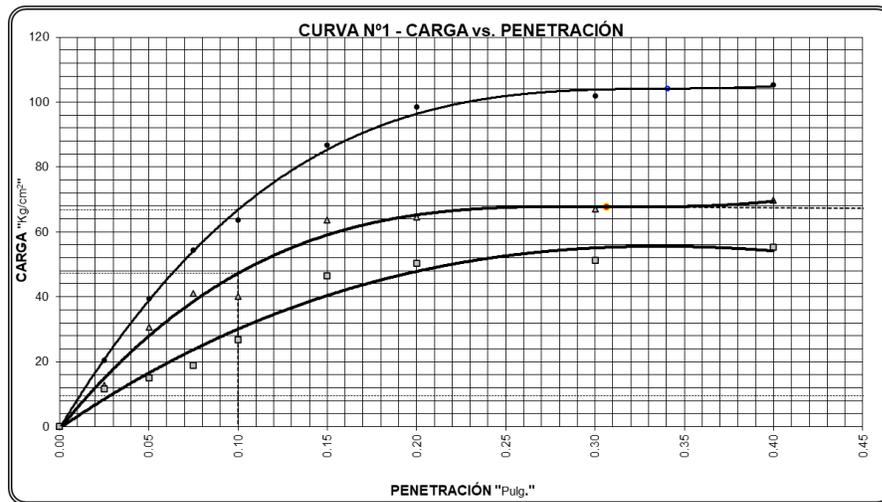
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23 CBR del suelo y la expansión suelo 83% - RAP 10% - cemento 7%

Muestra	suelo 83 % - RAP 10% - cemento 7 %		
Dens. al 90%:	1.819 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 90%:	35.5
Dens. al 95%:	1.920 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 95%:	64.6
Dens. al 100%:	2.021 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 100%:	93.6
Exp. al 95%:	1.2	Exp. al 100%:	1.08

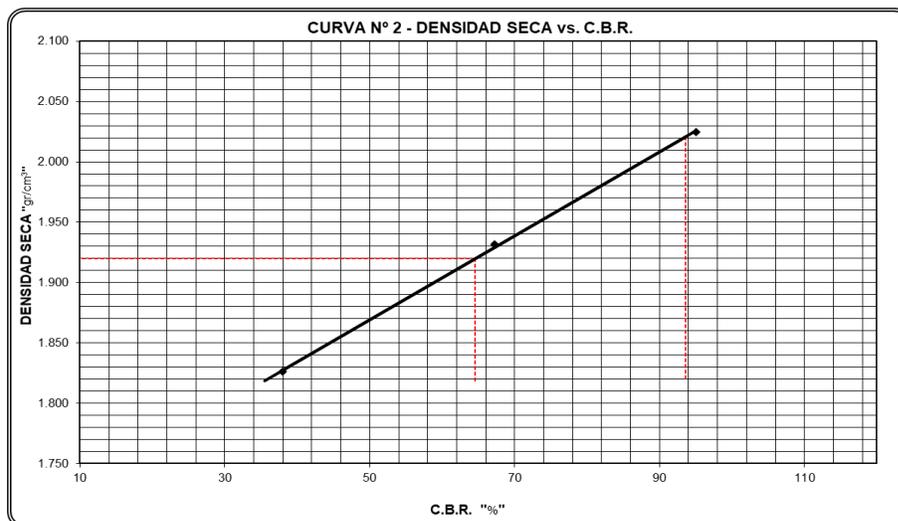
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.14 Carga vs penetración con adicción de 10 % RAP



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.15 Densidad seca vs CBR con la adicción de 10 % RAP



Fuente: Elaboración propia

Dosificación de CBR suelo 73 % - RAP 20 % - cemento 7 %

Imagen 3.27 Ensayo relación soporte california CBR con 20% RAP



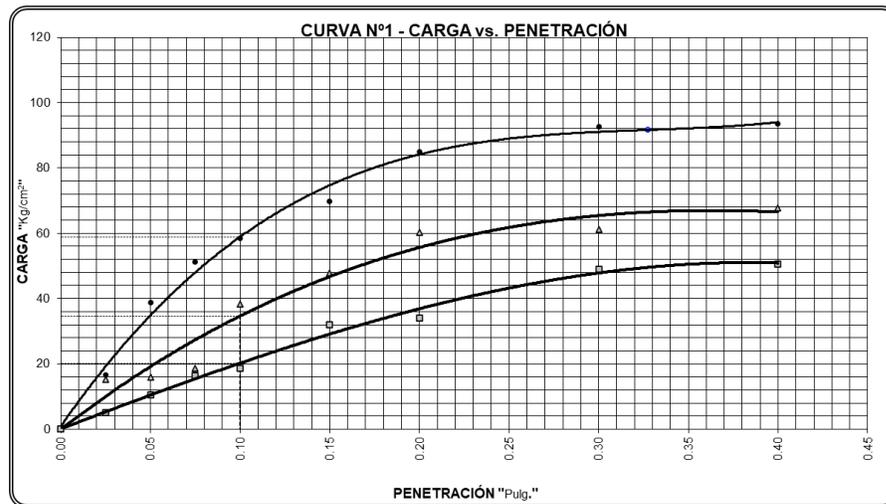
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.24 CBR del suelo y la expansión suelo 73% - RAP 20% - cemento 7%

Muestra	suelo 73 % - RAP 20% - cemento 7 %		
Dens. al 90%:	1.912 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 90%:	27.8
Dens. al 95%:	2.018 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 95%:	54.9
Dens. al 100%:	2.124 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 100%:	82.1
Exp. al 95%:	1.0	Exp. al 100%:	1.06

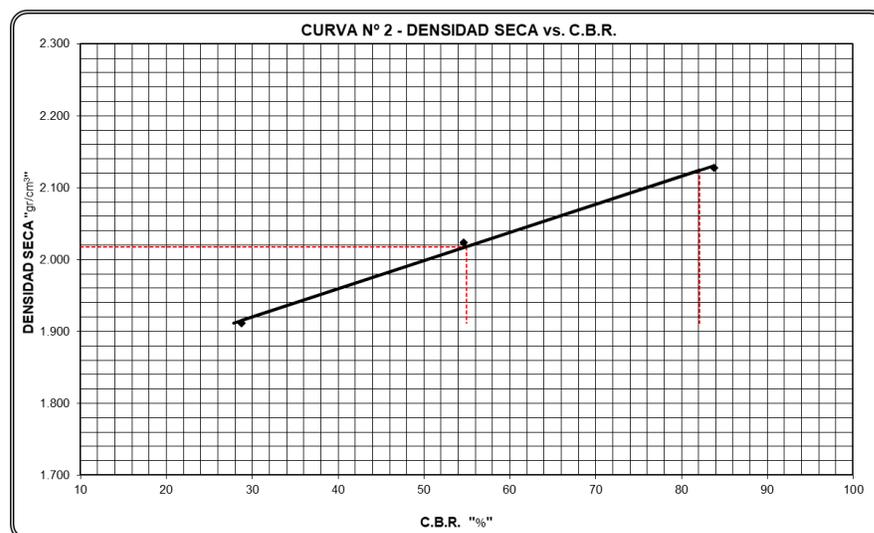
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.16 Carga vs penetración con adicción de 20 % RAP



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.17 Densidad seca vs CBR con adicción de 20% RAP



Fuente: Elaboración propia

Dosificación de CBR suelo 63 % - RAP 30 % - cemento 7 %

Imagen 3.28 Ensayo relación soporte california CBR con 30% RAP



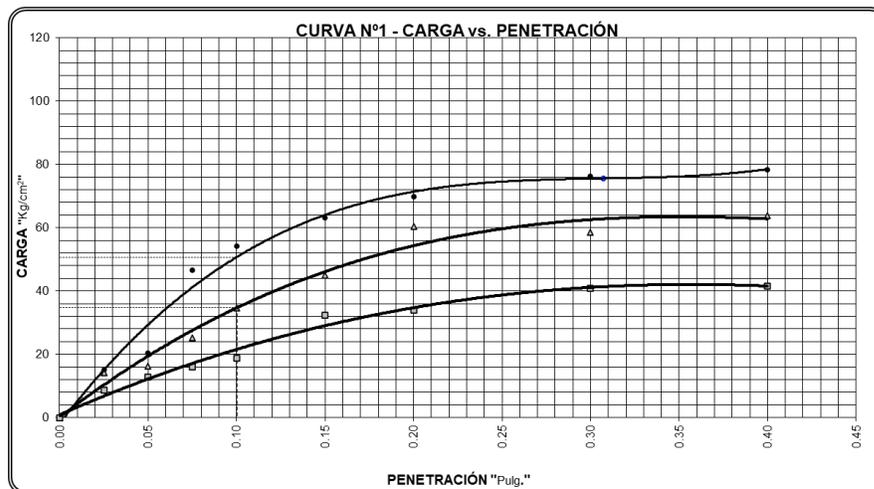
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.25 CBR del suelo y la expansión suelo 63% - RAP 30% - cemento 7%

Muestra	suelo 63 % - RAP 30% - cemento 7 %		
Dens. al 90%:	2.008 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 90%:	18.1
Dens. al 95%:	2.120 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 95%:	47.4
Dens. al 100%:	2.231 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 100%:	76.8
Exp. al 95%:	1.1	Exp. al 100%:	1.05

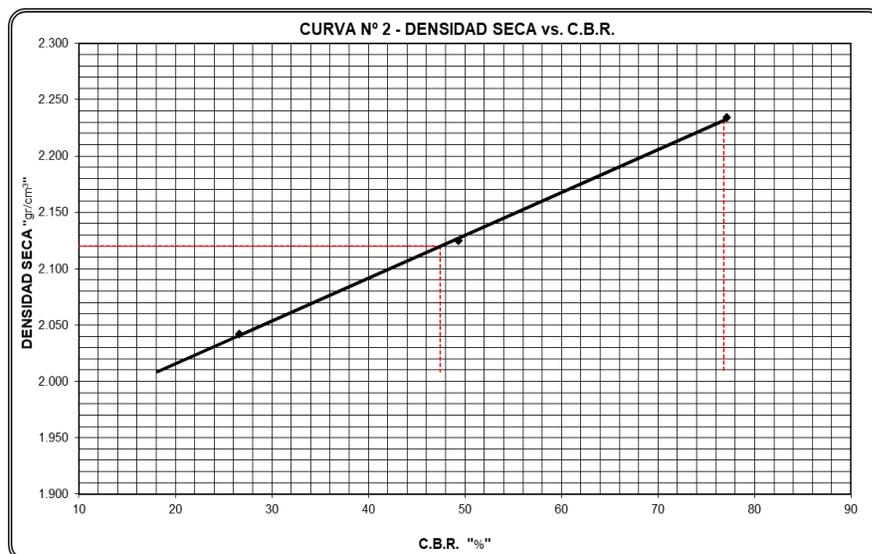
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.18 Carga vs penetración con adicción de 30 % RAP



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.19 Densidad seca vs CBR con adicción de 30% RAP



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.26 Resultados de CBR de las dosificaciones

Mezcla	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
CBR	93.6	82.1	76.8
RAP	10	20	30
Cemento	7	7	7

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.4 Evaluación de la mezcla analizada

#### 3.5.4.1 Grado de compactación

Mide el porcentaje de compactación alcanzando por un suelo con respecto a la densidad máxima seca alcanzada en laboratorio su fórmula este dado:

$$G_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_d \text{ max}} \times 100$$

Donde:

$G_c$  = Grado de compactación

$\gamma_d$  = Densidad seca probeta

$\gamma_d \text{ máx.}$  = Densidad máxima laboratorio

Imagen 3.29 Grado de compactación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27 % Grado de compactación suelo 83 % - RAP 10 % - cemento 7 %

<b>Molde N°</b>	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
N° de capas	5		5		5	
N° de golpes / capa	56		25		12	
Densidad seca probeta (grs./cm <sup>3</sup> )	2.0	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8
Densidad máxima lab. (grs./cm <sup>3</sup> )	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
% De compactación	100.2	100.4	95.6	95.5	90.4	90.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28 % Grado de compactación suelo 73 % - RAP 20 % - cemento 7 %

<b>Molde N°</b>	<b>16</b>		<b>18</b>		<b>15</b>	
N° de capas	5		5		5	
N° de golpes / capa	56		25		12	
Densidad seca probeta (grs./cm <sup>3</sup> )	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9
Densidad máxima lab. (grs./cm <sup>3</sup> )	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
% De compactación	100.2	100.2	95.3	95.5	90.0	90.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29 % Grado de compactación suelo 63 % - RAP 30 % - cemento 7 %

<b>Molde N°</b>	<b>16</b>		<b>18</b>		<b>15</b>	
N° de capas	5		5		5	
N° de golpes / capa	56		25		12	
Densidad seca probeta (grs./cm <sup>3</sup> )	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
Densidad máxima lab. (grs./cm <sup>3</sup> )	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
% De compactación	100.1	100.0	95.2	96.2	91.5	91.7

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.4.2 Distribución granulométrica de la mezcla analizada

Se denomina distribución granulométrica de un suelo a la división del mismo en diferentes fracciones, seleccionadas por el tamaño de sus partículas componentes; las partículas de cada fracción se caracteriza porque su tamaño se encuentra comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo, en forma correlativa para las distintas fracciones de tal modo que el máximo de una fracción es el mínimo de la que le sigue correlativamente. En suelos gruesos (gravas, arenas y limos no plásticos), de estructura simple, la característica más importante para definir su resistencia es la compacidad; la angulidad de los granos y la orientación de las partículas juegan también un papel importante, aunque menor. La gráfica de la distribución granulométrica suele dibujarse con porcentajes como ordenadas y tamaños de las partículas como abscisas. Las ordenadas se refieren a porcentaje, en peso, de las partículas menores que el tamaño correspondiente. La representación en escala semilogarítmica resulta preferible a la simple presentación natural, pues en la primera se dispone de mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos, que en escala natural resultan muy comprimidos

Imagen 3.30 Ensayo de distribución granulométrica de las mezclas analizadas



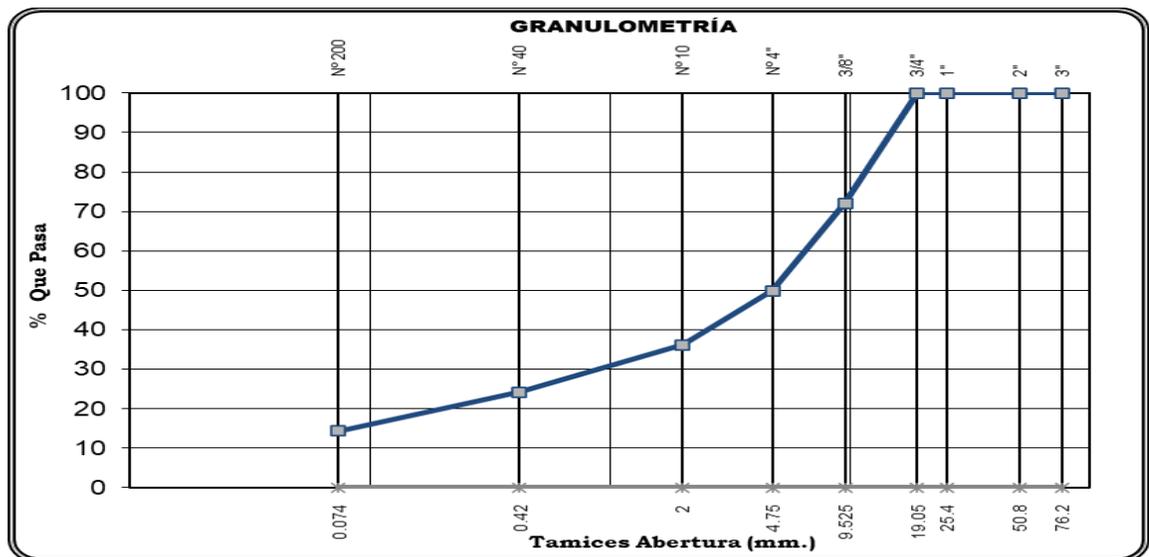
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.30 Distribución granulométrica suelo 83 % - RAP 10 % - cemento 7 %

Peso total seco (grs.)		4150	Muestra pasa tamiz N° 4		457.3
Tamiz	Peso retenido tamiz (grs.)	Peso retenido acumulado (grs.)	Retenido tamiz (%)	Retenido acumulado (%)	Que pasa (%)
N°					
3"	0	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	1160.0	1160.0	28.0	28.0	72.0
4	920.0	2080.0	22.2	50.1	49.9
10	125.0	125.0	27.3	63.8	36.2
40	110.0	235.0	24.1	75.8	24.2
200	90.0	325.0	19.7	85.6	14.4

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.20 Distribución granulométrica 10% RAP



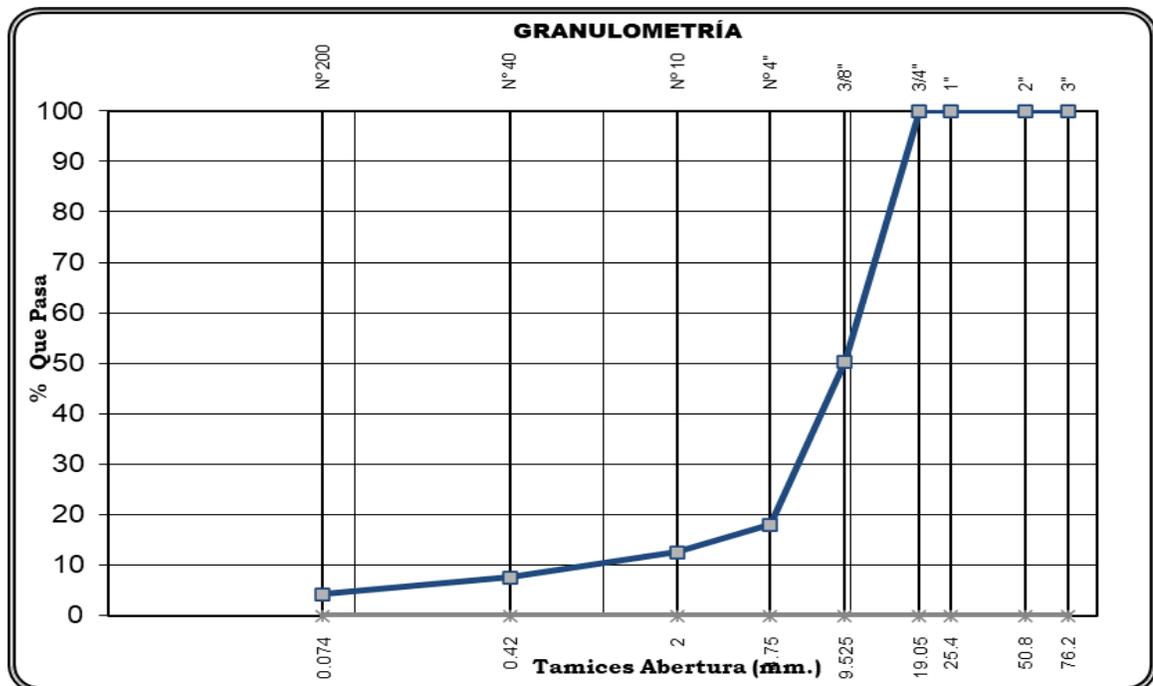
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.31 Distribución granulométrica suelo 73 % - RAP 20 % - cemento 7 %

Peso total seco (grs.)		2325	Muestra pasa tamiz N° 4		457.1
Tamiz	Peso retenido Tamiz (grs.)	Peso retenido acumulado (grs.)	Retenido tamiz (%)	Retenido acumulado (%)	Que pasa (%)
N°					
3"	0	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	1155	1155	49.7	49.7	50.3
4	750	1905	32.3	81.9	18.1
10	140	140	30.6	87.5	12.5
40	125	265	27.3	92.4	7.6
200	85	350	18.6	95.8	4.2

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.21 Distribución granulométrica 20% RAP



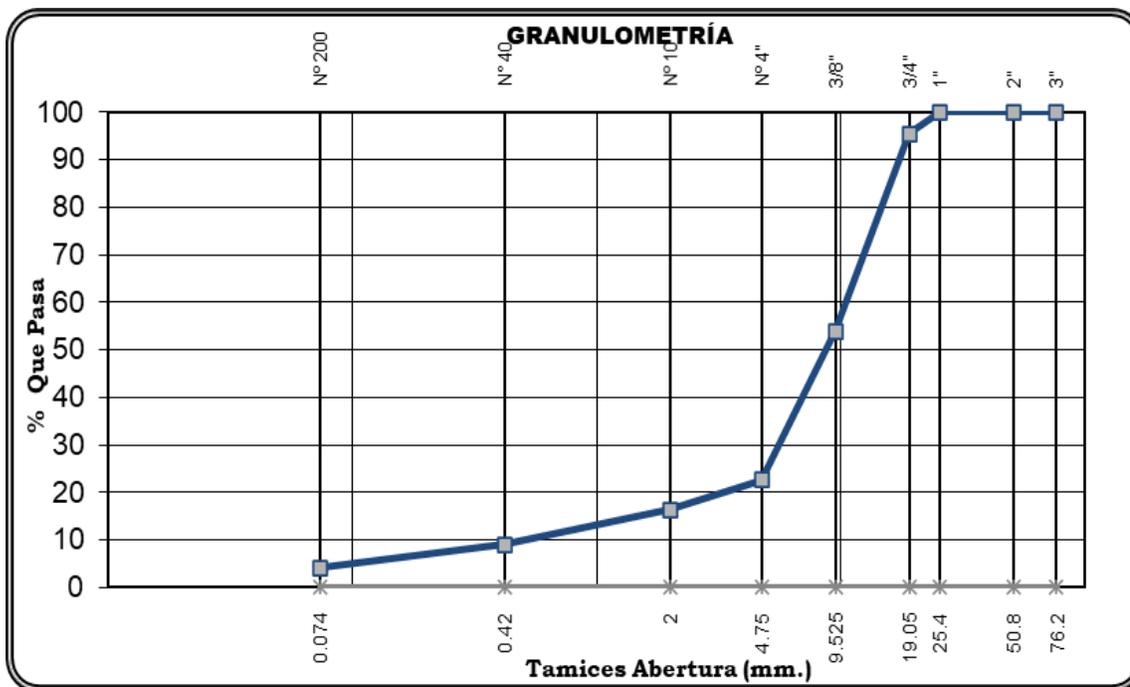
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.32 Distribución granulométrica suelo 63 % - RAP 30 % - cemento 7 %

Peso total seco (grs.)		2570	Muestra pasa tamiz N°4		442.5
Tamiz	Peso retenido tamiz (grs.)	Peso retenido acumulado (grs.)	Retenido tamiz (%)	Retenido acumulado (%)	Que pasa (%)
N°					
3"	0	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	115	115	4.5	4.5	95.5
3/8"	1070	1185	41.6	46.1	53.9
4	805	1990	31.3	77.4	22.6
10	120	120	26.2	83.3	16.7
40	145	265	31.7	90.5	9.5
200	95	360	20.8	95.2	4.8

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.22 Distribución granulométrica 30% RAP



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.4.3 Desgaste de los Ángeles

Este método cubre el procedimiento para ensayos de agregado grueso menores de 1½ pulgadas (37.5 mm), para determinar su resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles.

Tabla 3.33 Gradaciones para ensayo desgaste de los Ángeles

Gradación	Pasa	Retiene	Peso (g)	Cant.	Vel.	
A (12)	1 1/2"	1"	1250	500 rev.	32.5 rpm	
	1"	3/4"	1250			
	3/4"	1/2"	1250			
	1/2"	3/8"	1250			
B (11)	3/4"	1/2"	2500			
	1/2"	3/8"	2500			
C (8)	3/8"	1/4"	2500			
	1/4"	N°4	2500			
D (6)	N°4	N°8	5000			
E (12)	3"	2 1/2"	2500			1000 rev.
	2 1/2"	2 "	2500			
	2 "	1 1/2"	5000			
F (12)	2 "	1 1/2"	5000			
	1 1/2"	1"	5000			
G (12)	1 1/2"	1"	5000			
	1"	3/4	5000			

Fuente: AASTHO T-96

#### Resumen del método

La prueba de la máquina de los ángeles es una medida de la degradación de los minerales de los agregados de graduaciones normales, resulta de la combinación de acciones incluyendo abrasión e impacto en un tambor rotativo de acero que contiene un número específico de esferas, que dependerá de la graduación de la muestra. Mientras el tambor rota, una placa eleva la muestra y las esferas de acero, transportándolas hasta ser soltadas desde la parte opuesta del tambor, creando un efecto de trituración por impacto. El contenido sigue rotando dentro del tambor con una acción abrasiva hasta que la placa hace impacto y el ciclo se repite. Después de transcurrido el número de revoluciones preestablecido, el contenido es removido del tambor y la porción de agregado es tamizada para medir el desgaste como el porcentaje de peso perdido.

Formula:

$$P \% = \frac{M_i - M_f}{5000} \times 100$$

Donde:

P% = Porcentaje de desgaste.

M<sub>i</sub> = Muestra inicial antes de entrar a la máquina. (gr)

M<sub>f</sub> = Muestra final después del movimiento. (gr)

Procedimiento de cálculos

Se utilizará la Gradación B

Tabla 3.34 Gradación tipo B

Pasado	Retenido	Cantidad tomada
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500

Fuente: AASTHO T-96

Desgaste de los Ángeles para la **muestra 1** de material desechable (RAP)

Imagen 3.31 Realización del ensayo desgaste de los Ángeles con RAP



Fuente: Elaboración propia

Desgaste de los ángeles **muestra 2** del suelo natural A-2-4

Imagen 3.32 Realización del ensayo desgaste de los Ángeles con suelo A-2-4



Fuente: Elaboración propia

Desgaste de los Ángeles **muestra 3** suelo 83 % - RAP 10 % - cemento 7 %

Imagen 3.33 Realización del ensayo desgaste de los Ángeles con 10% de RAP



Fuente: Elaboración propia

Desgaste de los Ángeles **muestra 4** suelo 73 % - RAP 20 % - cemento 7%

Imagen 3.34 Realización del ensayo desgaste de los Ángeles con 20 % de RAP



Fuente: Elaboración propia

Desgaste de los ángeles **muestra 5** suelo 63 % - RAP 30 % - cemento 7%

Imagen 3.35 Realización del ensayo desgaste de los Ángeles con 30 % de RAP



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.35 Resultados de las mezclas desgaste los Ángeles

Nº	Muestra	Ret. tamiz Nº 12	Desgaste (%)
M1	RAP	2954	40.9
M2	Suelo natural (A-2-4)	2390	52.2
M3	suelo 83 % - RAP 10 % - cemento 7 %	2735	45.3
M4	suelo 73 % - RAP 20 % - cemento 7 %	2847	43.1
M5	suelo 63 % - RAP 30 % - cemento 7 %	2954	40.6

Fuente: Elaboración propia

#### 3.5.4.4 Contenido de fino

Se ha reconocido por diferentes estudios que el contenido de finos afecta la estructura interna de un suelo granular. Trabajos realizados por Terzaghi en 1956 sugieren que el agregar finos no plásticos en arena crean una estructura meta-estable. Estudios en compresión monótona, sugieren que arenas sueltas con una cantidad baja de finos son más compresibles, particularmente a presiones de confinamiento bajas, en comparación son arenas limpias. Se obtiene el contenido de fino del % que pasa tamiz Nº 200

Imagen 3.36 Realización del contenido fino de las mezclas estudiadas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.36 Contenido de fino N° 200 suelo 83 % - RAP 10 % - cemento 7 %

<b>Tamiz</b>	<b>Peso retenido tamiz (grs.)</b>	<b>Peso retenido acumulado (grs.)</b>	<b>Retenido tamiz (%)</b>	<b>Retenido acumulado (%)</b>	<b>Que pasa (%)</b>
<b>N°</b>					
200"	90	325	19.7	85.6	14.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37 Contenido de fino N° 200 suelo 73 % - RAP 20 % - cemento 7 %

<b>Tamiz</b>	<b>Peso retenido tamiz (grs.)</b>	<b>Peso retenido acumulado (grs.)</b>	<b>Retenido tamiz (%)</b>	<b>Retenido acumulado (%)</b>	<b>Que pasa (%)</b>
<b>N°</b>					
200"	85	350	18.6	95.8	4.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.38 Contenido de fino N° 200 suelo 63 % - RAP 30 % - cemento 7 %

<b>Tamiz</b>	<b>Peso retenido tamiz (grs.)</b>	<b>Peso retenido acumulado (grs.)</b>	<b>Retenido tamiz (%)</b>	<b>Retenido acumulado (%)</b>	<b>Que pasa (%)</b>
<b>N°</b>					
200"	95	360	20.8	95.2	4.8

Fuente: Elaboración propia

### 3.6 DISEÑO DE CAPA DE PAVIMENTO

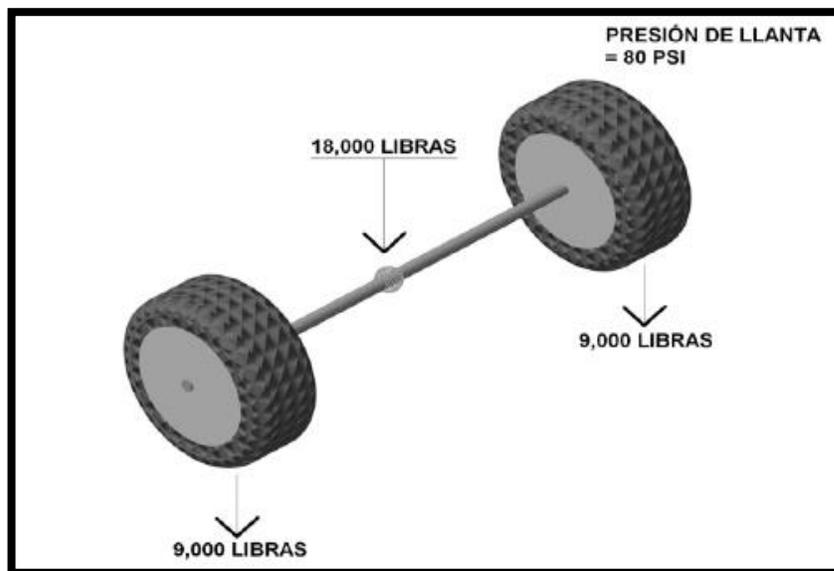
#### Metodo CBR

Dentro de los métodos de base empírica se destaca el Método CBR que fue exhaustivamente estudiado por el Cuerpo de Ingeniero de U.S.A. durante la segunda Guerra Mundial por lo que a posteriori de la misma fue la metodología más aplicada.

#### Peso por eje

Esta carga uniformizada según AASHTO es de 18,000 Libras o 8.2 tn/eje

Imagen 3.37 Carga equivalente



Fuente: Método CBR

## DISEÑO DE PAVIMENTO DE LA CAPA BASE NORMAL

Se utilizara material de capa base comprada de una cantera con un CBR de 80%

Datos para el diseño

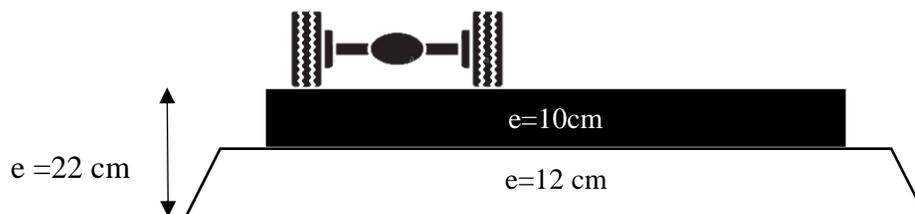
Peso por Eje=8.2 tn/eje

CBR de subrasante=21.7 %

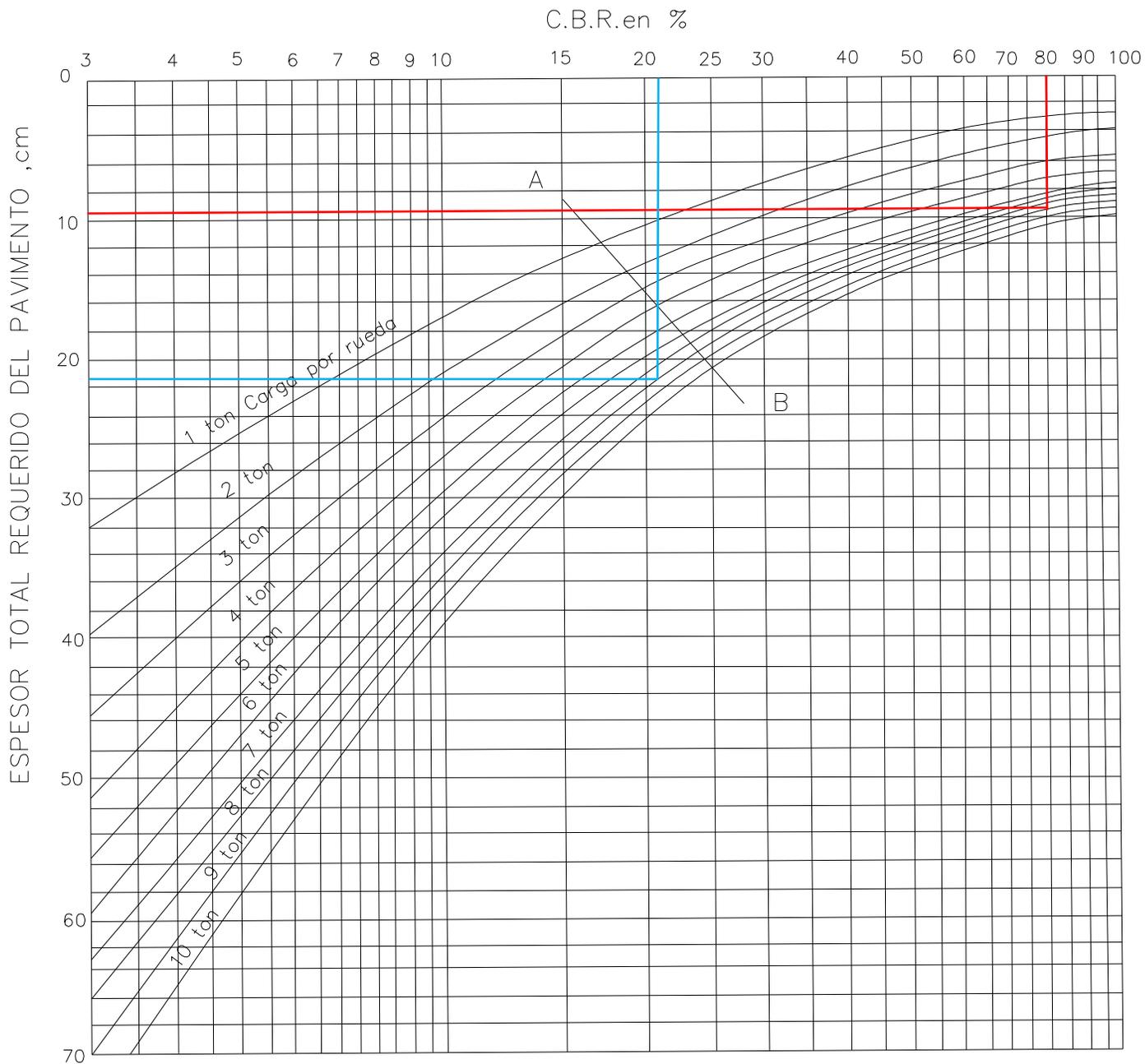
CBR de base=80 %

Entonces con el abaco encontramos los espesores de la capa de rodadura y capa base

Capa de rodadura – Capa base



### CURVAS PARA EL CÁLCULO DE ESPESORES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA DIFERENTES CBR Y CARGAS POR RUEDA



## DISEÑO DE PAVIMENTO SUELO - CEMENTO

Datos para el diseño

Peso por Eje=8.2 tn/eje

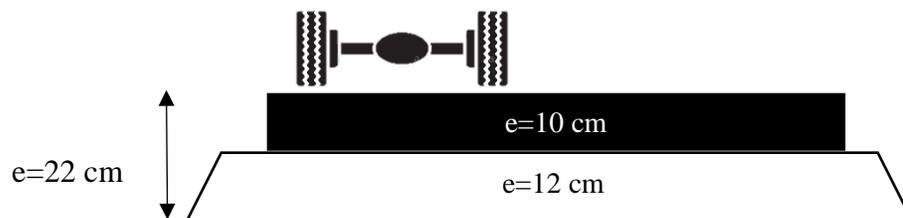
CBR de subrasante=21.7 %

CBR de base=83.5 %

Entonces con el abaco

Entonces con el abaco encontramos los espesores de la capa de rodadura y capa base

Capa de rodadura – Capa base





**DISEÑO DE PAVIMENTO DE MEZCLA SUELO 68 % - RAP 25% - CEMENTO 7%**

Datos para el diseño

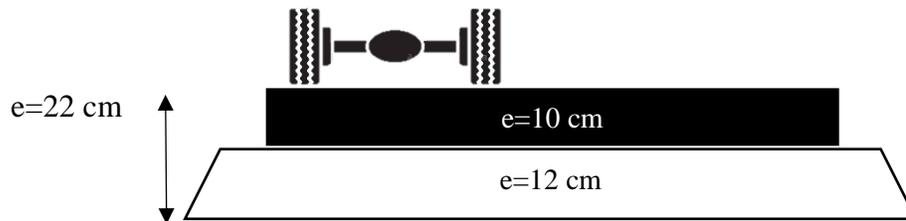
Peso por Eje=8.2 tn/eje

CBR de subrasante=21.7%

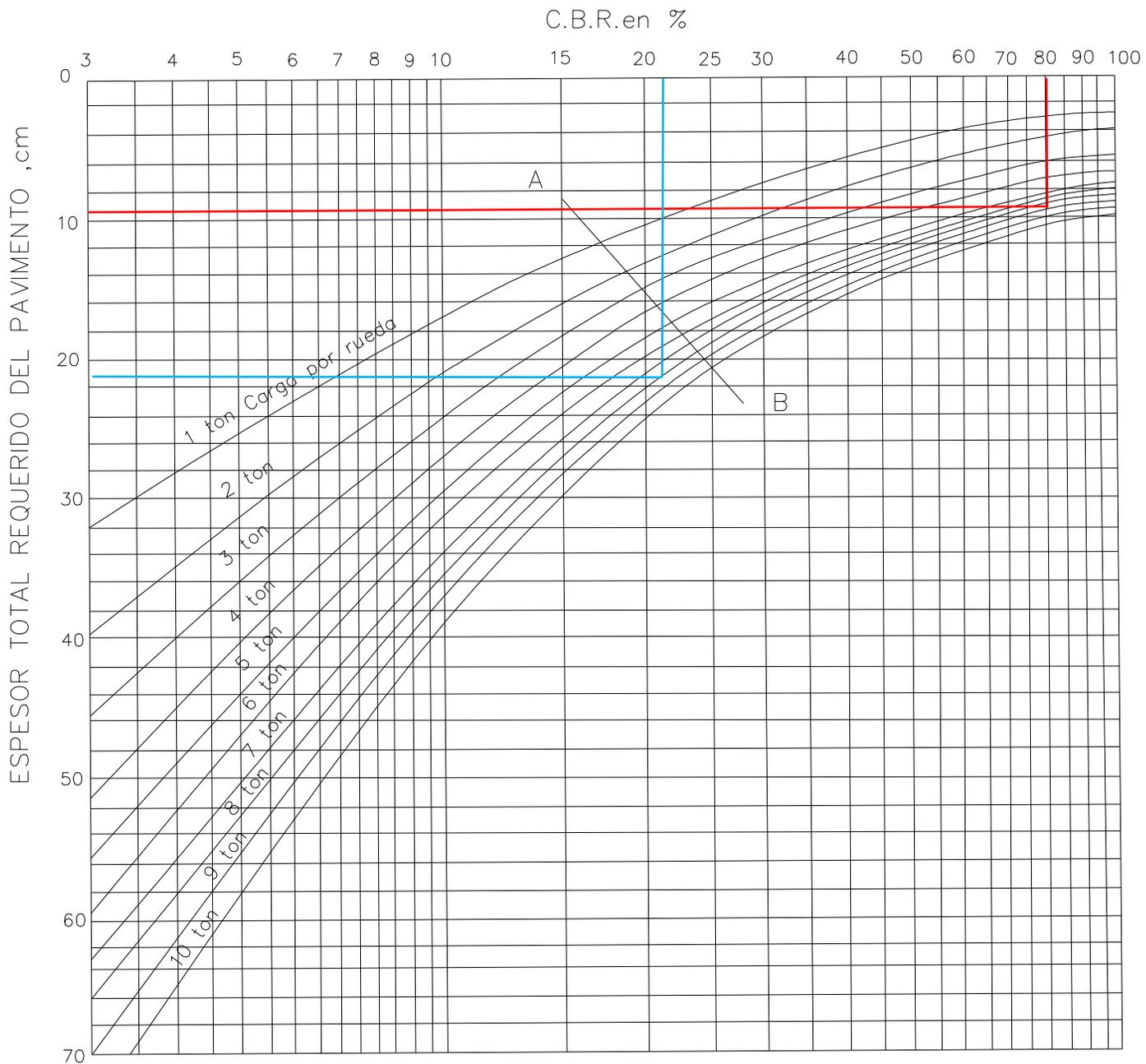
CBR de base=80%

Entonces con el abaco encontramos los espesores de la capa de rodadura y capa base

Capa de rodadura – Capa base



## CURVAS PARA EL CÁLCULO DE ESPESORES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA DIFERENTES CBR Y CARGAS POR RUEDA



## Análisis de diseño de pavimento

Tabla 3.39 Espesores de capa base

Diseño de capa base	CBR	Espesor Capa base
Capa base normal	80	12
Mezcla suelo - cemento 7%	80	12
Mezcla suelo 68 % - RAP 25% - cemento 7%	80	12

Al diseñar las capas de pavimento se observa que el espesor no cambio en absoluto porque la resistencia de la capa base no varían, donde se debe llegar una resistencia de 80 % como mínimo bajo norma, entonces los espesores no aumentarán como también disminuirá, la investiga hizo estudios agregando material desechado observando si influye en la resistencia pero se tuvo un punto crítico donde agregando mucho material desechado se perdía tal resistencia entonces se buscó el punto medio para que cumpla en la resistencia de capa base, la investigación es de utilizar la muestra de suelo de la subrasante y estabilizarlo con cemento y RAP para utilizar como material de capa base así mismo también cumpliendo con características de resistencia.

### 3.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados de las pruebas de laboratorio del material para la capa base granular con y sin material reciclado (RAP), obtenemos los parámetros necesarios para comparar y definir las condiciones de análisis de mezclas con cemento portland y material desechable (RAP). la realización de las pruebas de humedad, granulometría, plasticidad y finalmente pudiendo clasificar muestras y seleccionar la más representativas para aplicar en esta investigación, se obtiene la siguiente clasificación según la AASHTO.

Tabla 3.40 Resumen de la clasificación de suelos

N°	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS
M1	A - 1b (0)	Arena limosa con grava SM
M2	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M3	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M4	A - 2 - 4 (0)	Arena arcilloso-limosa SC-SM
M5	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa SM
M6	A - 4 (0)	Arena arcilloso-limosa con grava SC-SM
M7	A - 4 (2)	Arena limosa SM
M8	A - 4 (1)	Arena limosa con grava SM
M9	A - 4 (6)	Limo baja plasticidad arenoso ML
M10	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M11	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M12	A - 4 (0)	Arena limosa SM
M13	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa SM
M14	A - 2 - 4 (0)	Arena arcilloso-limosa con grava SC-SM
M15	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M16	A - 2 - 4 (0)	Grava arcilloso-limosa con arena GC-GM
M17	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa SM
M18	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa con grava SM
M19	A - 4 (1)	Arena limosa SM
M20	A - 4 (0)	Grava arcilloso-limosa con arena GC-GM
M21	A - 4 (1)	Arena arcilloso-limosa con grava SC-SM
M22	A - 4 (1)	Arena limosa con grava SM
M23	A - 4 (1)	Arena arcillosa con grava SC
M24	A - 2 - 4 (0)	Arena limosa SM
M25	A - 2 - 4 (0)	Arena mal graduada con limo SP SM
M26	A - 1b (0)	Arena limosa con grava SM
M27	A - 2 - 4 (0)	Arena arcillosa con grava SC
M28	A - 4 (1)	Arena arcillosa con grava SC
M29	A - 2 - 4 (0)	Grava arcilloso-limosa con arena GC-GM
M30	A - 4 (1)	Arena limosa con grava SM
M31	A - 1b (0)	Grava limosa con arena GM
M32	A - 4 (1)	Arena limosa con bloques SM
M33	A - 2 - 6 (0)	Grava arcillosa con arena GC
M34	A - 2 - 4 (0)	Grava arcillosa con arena GC
M35	A - 2 - 4 (0)	Grava mal graduada con arcilla con arena GP GC

Fuente: Elaboración propia

**Nota:** Luego de realizar la caracterización del tramo vial, se observa que el suelo que predomina es A-2-4, se procederá al estudio con fines de investigación

Tabla 3.41 Resumen de las características del suelo estudiado

<b>Límite líquido</b>	23.4	<b>Límite plástico</b>		14.4	<b>Índice de plasticidad</b>	9.0	<b>Clasificación AASHTO M 145</b>
							<b>A - 2 - 4 (0)</b>
<b>Coefficiente de uniformidad</b>	<b>D60=</b>	7.9	<b>D30=</b>	0.6	<b>D10=</b>	-	Grava arcillosa con arena GC

<b>Suelo</b>	<b>Humedad óptima (%)</b>	<b>Densidad máxima (kg/m<sup>3</sup>)</b>
A-2-4	9.2	1959

<b>Muestra</b>	<b>A-2-4</b>		
Dens. al 90%:	1.763 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 90%:	4.7
Dens. al 95%:	1.861 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 95%:	13.2
Dens. al 100%:	1.959 gr/cm <sup>3</sup>	C.B.R. al 100%:	21.7
Exp. al 95%:	1.3 gr/cm <sup>3</sup>	Exp. al 100%:	1.3

Fuente: Elaboración propia

Con los ensayos que se efectuaron en el laboratorio y los resultados expuestos en el capítulo III, se puede concluir que el suelo en su estado natural no cumple con las especificaciones técnicas mínimas como para ser utilizado en una capa base determinando de esa manera que será necesario un proceso como estabilización para mejorar las propiedades del suelo.

Tabla 3.42 Comparación y análisis de las especificaciones técnicas

<b>Características</b>	<b>Requerimiento para capa base</b>		<b>Suelo estudiado</b>
	<b>Deseable</b>	<b>Adecuado</b>	<b>Suelo natural</b>
Límite líquido %	25 máx.	30 máx.	23.4
Índice plástico %	8 máx.	8 máx.	9.0
Compactación %	100 min.	100 min.	100.1
CBR %	90 min.	80 min.	21.7
Desgaste los Ángeles %	40 máx.	40 máx.	52.2

Fuente: Elaboración propia

El suelo se ha mejorado agregando cemento para mejorar su característica del CBR, aunque se deben cumplir algunas características mínimas del suelo para que la mezcla sea adecuadamente.

Tabla 3.43 Características mínimas del análisis mezcla suelo - cemento

<b>Características mínimas</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Suelo A-2-4</b>
Limite liquido	50 máx.	23.4
Índice plástico	25 máx.	9.0
% que pasa malla 200	50 máx.	16.7

Fuente: (Crespo,2004)

Para el cemento, se realizaron pruebas de caracterización para ver si el material estaba en buenas condiciones.

Tabla 3.44 Análisis de las características del cemento

Finura del cemento

<b>Pruebas pesos retenidos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Ud.</b>
Peso inicial del cemento	50	50	50	gr
Peso del cemento retenido en el tamiz N°40	0.3	0.1	0.0	gr
Peso del cemento retenido en el tamiz N°200	2.1	3.6	2.8	gr
Peso del cemento en la base	47.7	45.3	48.4	gr
Perdidas después del tamizado	0.1	1.0	0.8	gr
Peso retenido de tamices + perdida	2.5	4.7	3.6	gr
Finura del cemento	95	90.6	92.8	%
Promedio finura del cemento	92.8			%

Fuente: Elaboración propia

Peso específico

<b>Ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Ud</b>
Peso del cemento	64	64	64	gr
Vaso de precipitacion + alcohol	300	300	300	ml
Vaso de precipitacion + alcohol + cemento	320	321	324	ml
Volumen desplazado	20	21	24	ml
Peso específico	3.2	3.0	2.7	gr/ml
Peso específico promedio	3.0			gr/ml

Fuente: Elaboración propia

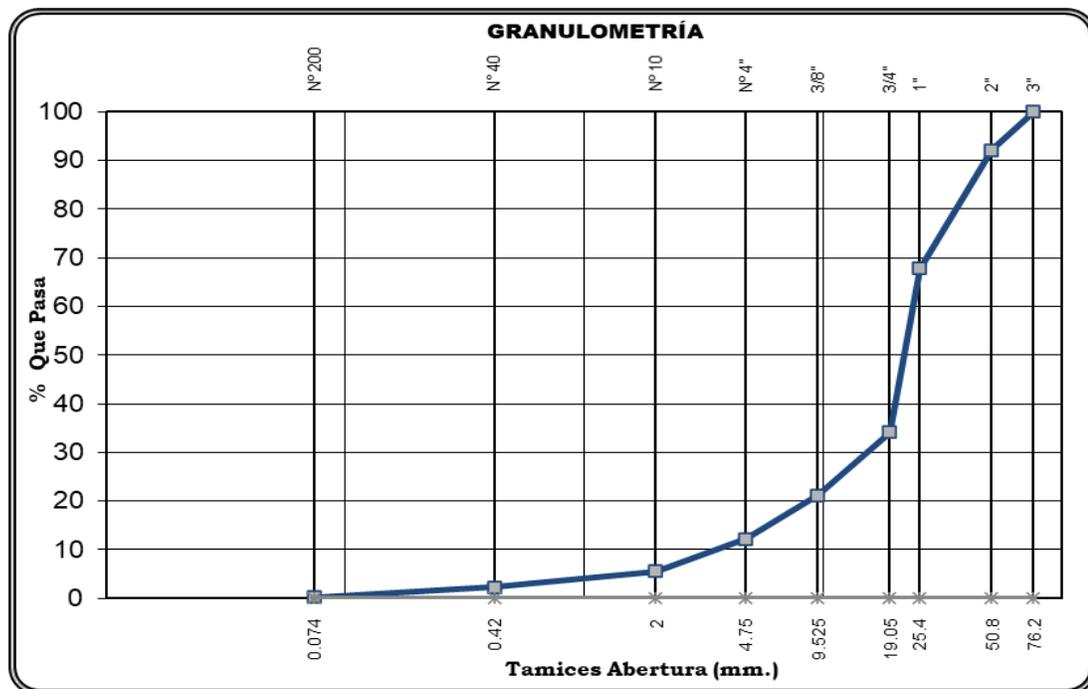
En cuanto a la prueba granulométrica del RAP, el material es de agregado grueso como se indica en la cinta granulométrica

Tabla 3.45 Análisis de granulometría del RAP

Peso total seco(grs.)		4500.8	Muestra pasa tamiz N° 4		500
Tamiz	Peso retenido tamiz (grs.)	Peso retenido acumulado (grs.)	Retenido tamiz (%)	Retenido acumulado (%)	Que pasa (%)
N°					
3"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	351.8	351.8	7.8	7.8	92.2
1"	1095.3	1447.1	24.3	32.2	67.8
3/4"	1514.6	2961.7	33.7	65.8	34.2
3/8"	584.6	3546.3	13.0	78.8	21.2
4	407.7	3954.0	9.1	87.9	12.1
10	272.7	272.7	54.5	94.5	5.5
40	134.4	407.1	26.9	97.7	2.3
200	84.8	491.9	17.0	99.8	0.2

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.23 Granulometría material desechado (RAP)



Fuente: Elaboración propia

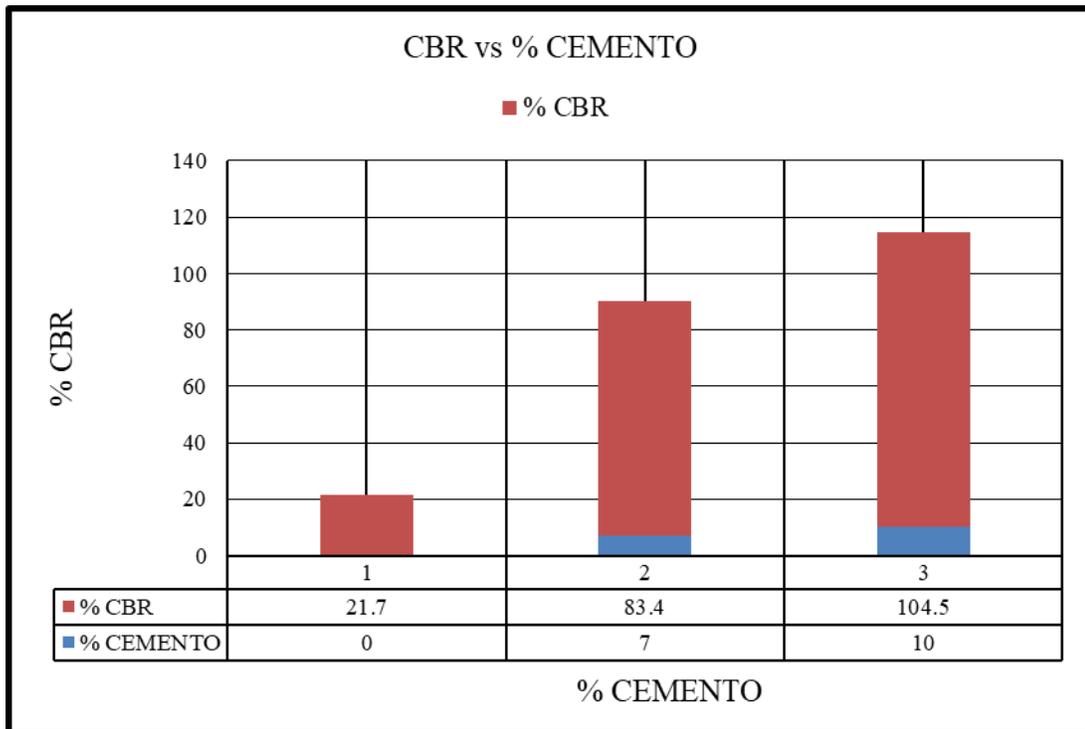
Se procedió a mejorarlo con un conglomerante, el cemento para lograr alcanzar un CBR optimo mayor a un 80 % donde se utilizó 2 dosificaciones de cemento y las dos cumplió con las expectativas, escogiendo de ahí la de 7 % de cemento donde se muestras resultados en la tabla 3.45

Tabla 3.46 Análisis y comparación del suelo - cemento

Características	Requerimiento para capa base		Suelo estudiado		
	Deseable	Adecuado	Suelo natural	Cemento 7%	Cemento 10%
Limite liquido %	25 máx.	30 máx.	23.4	21	17
Índice plástico %	8 máx.	8 máx.	9	7.5	6.8
Compactación %	100 min.	100 min.	100.1	100.2	100.6
CBR %	90 min.	80 min.	21.7	83.5	104.5
Desgaste los Ángeles %	40 máx.	40 máx.	52.2	-	-

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.24 CBR vs % cemento



Fuente: Elaboración propia

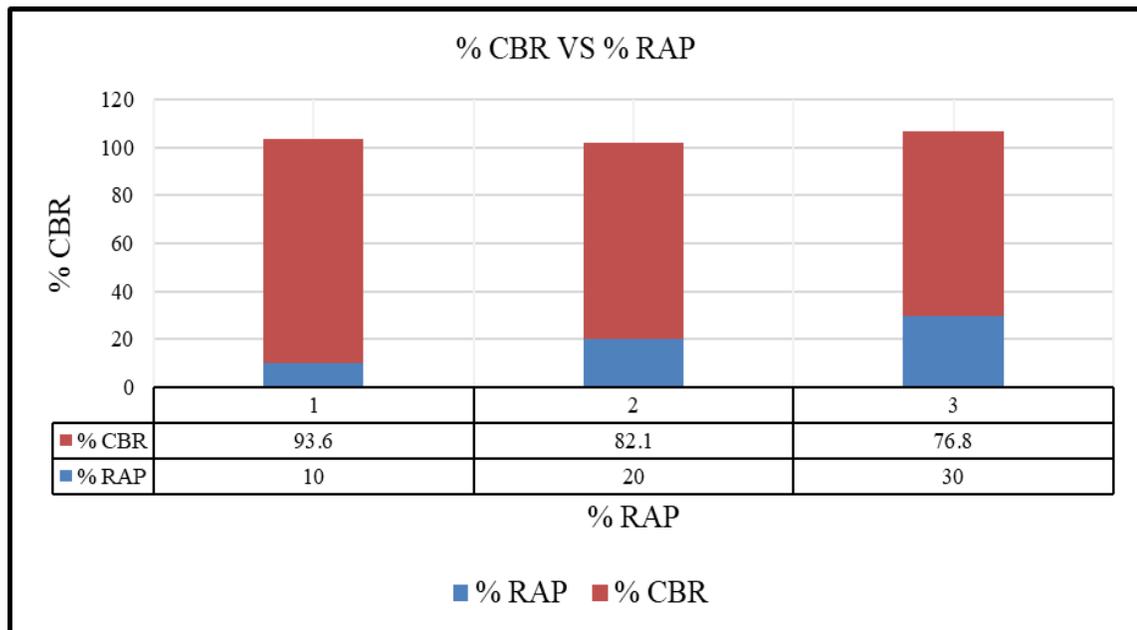
Una vez encontrado el porcentaje óptimo de cemento, el material desechable triturado se reutilizó en varios porcentajes 10, 20 ,30 % con el fin de reutilizarlo y encontrar el material desechable óptimo requerido para cumplir con las especificaciones técnicas de la capa base en la que se muestran los resultados. las siguientes tablas

Tabla 3.47 Especificaciones técnicas de capa base en las muestras estudiadas

Características	Requerimiento para capa base		Suelo estudiado		
	Deseable	Adecuado	RAP 10%	RAP 20%	RAP 30%
Limite liquido %	25 máx.	30 máx.	19	18.3	17.3
Índice plástico %	8 máx.	8 máx.	9.1	8	6.6
Compactación %	100 min.	100 min.	100.3	100.2	100.1
CBR %	100 min.	80 min.	93.6	82.1	76.8
Desgaste los Ángeles	40 máx.	40 máx.	45.3	43.1	40.6

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.25 % CEMENTO vs % RAP



Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos de CBR se procede a buscar el contenido óptimo de RAP en la mezcla para un 80 % de CBR

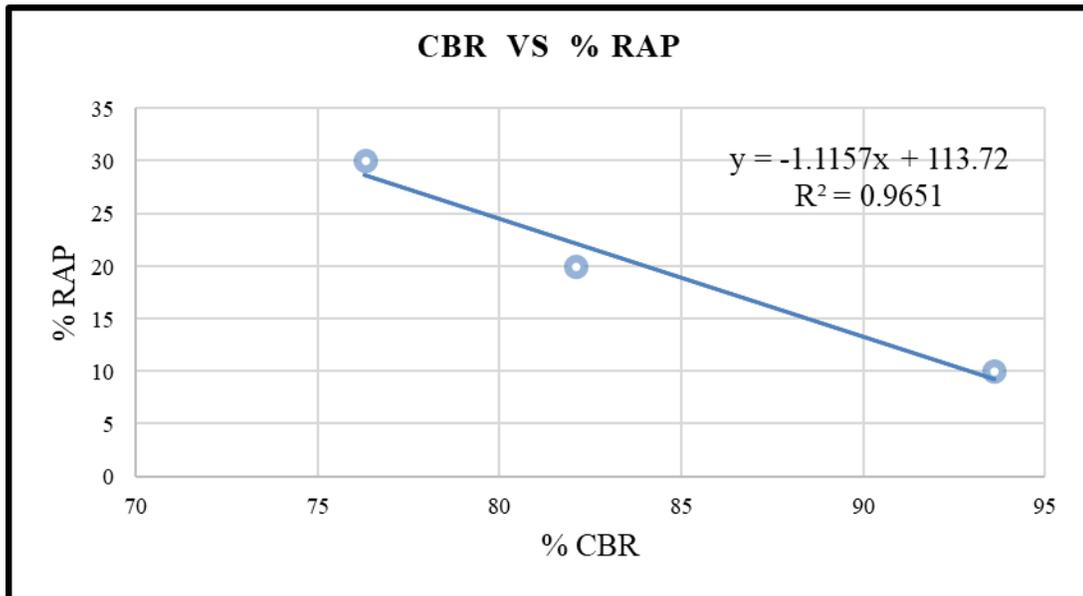
Tabla 3.48 Análisis CBR VS RAP

Características	RAP 10%	RAP 20%	RAP 30 %
CBR	93.6	82.1	76.8

Fuente: Elaboración propia

Se realizará una gráfica CBR vs RAP para encontrar un contenido óptimo de RAP para la mezcla del suelo-cemento, para que cumpla con las especificaciones de capa base.

Gráfico 3.26 % óptimo de RAP



Fuente: Elaboración propia

Porcentaje de RAP óptimo = 24.5 %

Porcentaje de RAP óptimo = 25 %

Después de un largo trabajo de análisis de la mezcla se puede sacar un óptimo de RAP que está al 25 % con un 7 % de cemento que cumpliría los requisitos para capa base.

## Evaluación de la mezcla

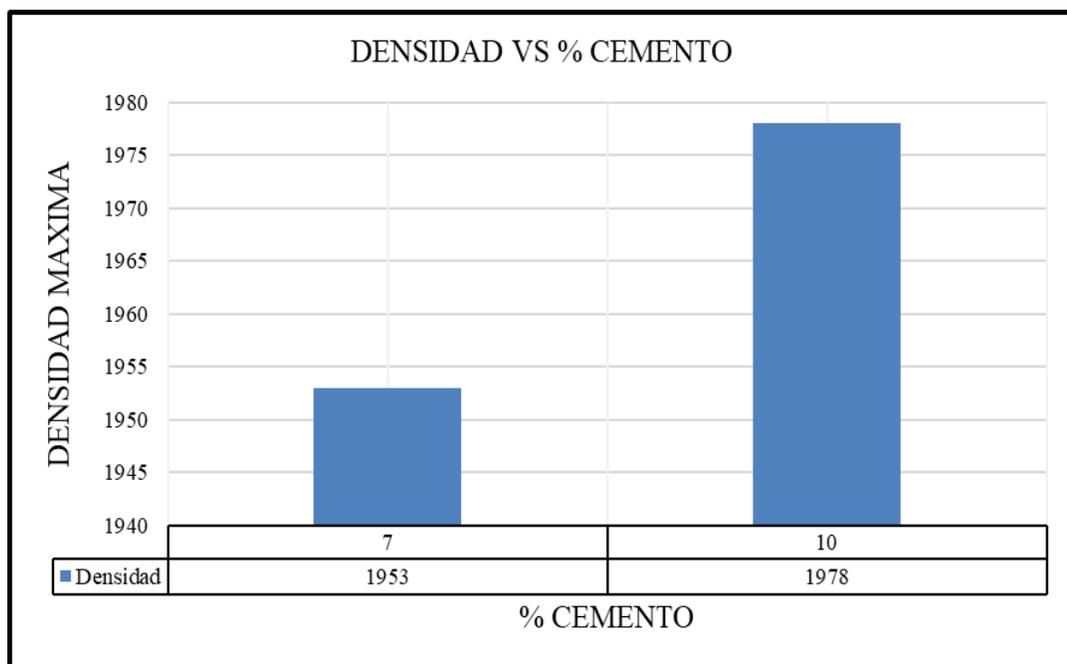
Proctor modificado

Tabla 3.49 Análisis de densidades de suelo - cemento

Suelo	Cemento (%)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (Kg/m <sup>3</sup> )
A-2-4	7	9.21	1953
A-2-4	10	9.01	1978

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.27 Densidad máxima vs % cemento



Fuente: Elaboración propia

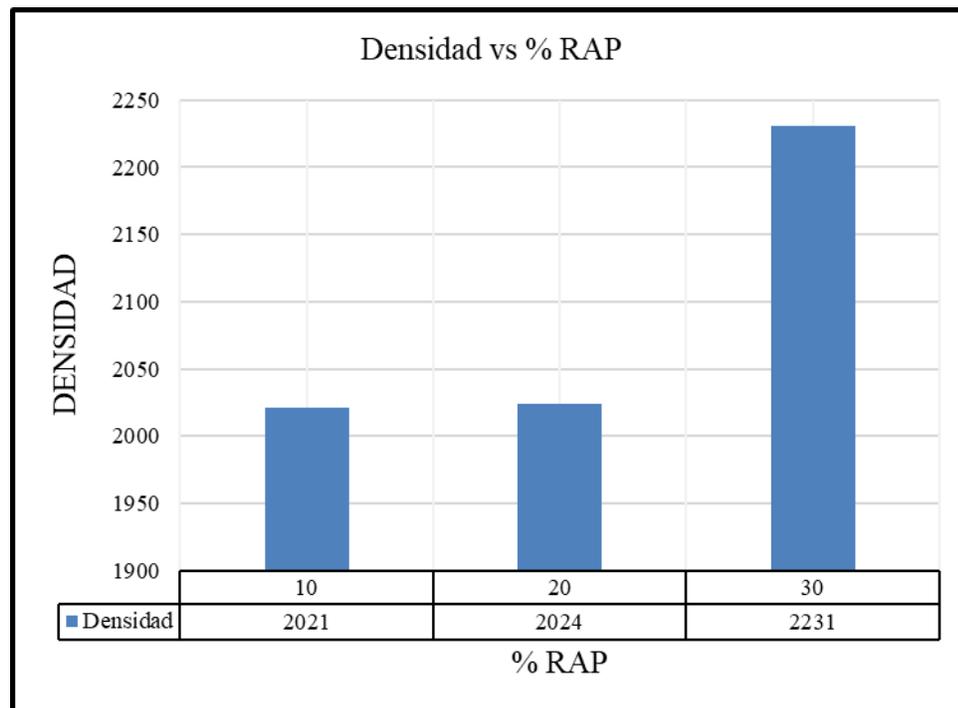
Se observa que las densidades en la mezcla suelo cemento varían dependiendo la cantidad de cemento que se adiciona.

Tabla 3.50 Análisis densidades de suelo - RAP - cemento

Suelo	Cemento (%)	RAP (%)	Suelo (%)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (Kg/m3)
A-2-4	7	10	83	5.9	2021
A-2-4	7	20	73	6.3	2124
A-2-4	7	30	63	6.1	2231

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.28 Densidad vs % RAP



Fuente: Elaboración propia

En la otra mezcla donde se agregará el RAP se podrá también diferenciar que la densidad varía dependiendo la cantidad del material desechable (RAP) que se agrega

En el parámetro de grado de compactación, esta prueba indica el grado de compactación que se tuvo en la investigación, que no estuvo por debajo del 90 por ciento, por lo que se ubica dentro de un rango adecuado que es el 90% para terraplenes.

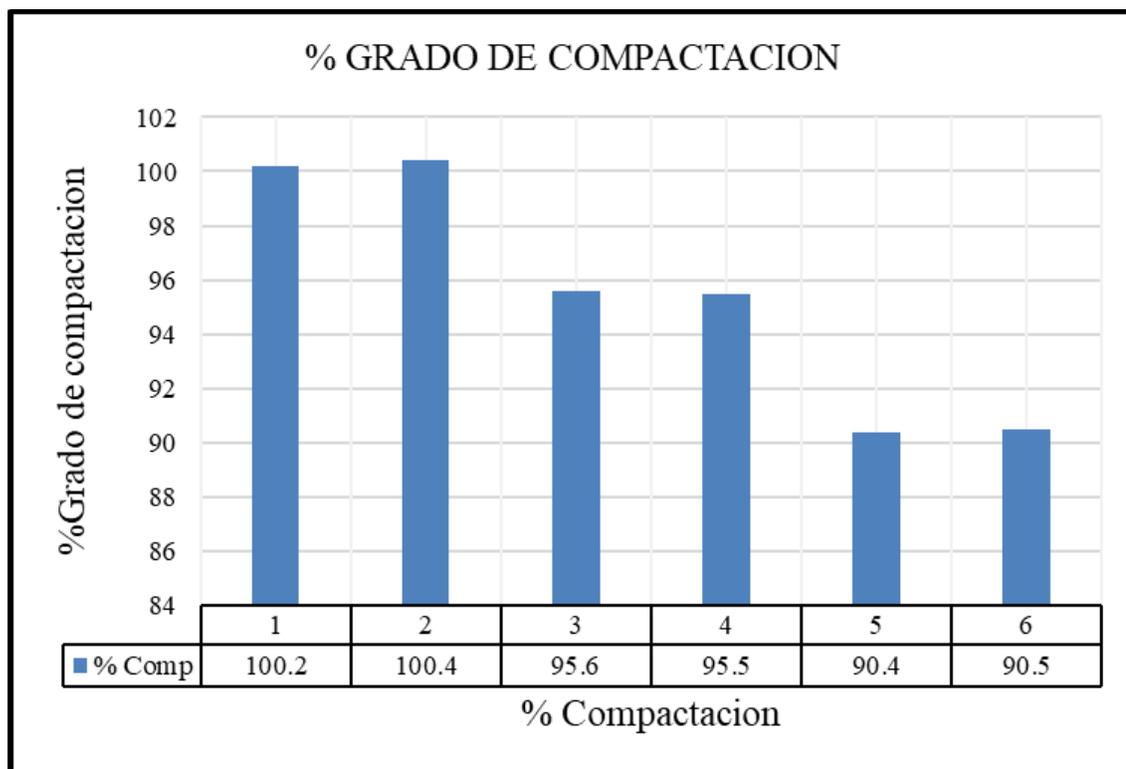
Tabla 3.51 Análisis % de compactación

Muestra 1 suelo 83 % - RAP 10 % - cemento 7 %

Molde N°	1		2		3	
N° de capas	5		5		5	
N° de golpes / capa	56		25		12	
Densidad seca probeta (grs./cm <sup>3</sup> )	2.0	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8
Densidad máxima lab. (grs./cm <sup>3</sup> )	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
% De compactación	100.2	100.4	95.6	95.5	90.4	90.5

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.29 % Grado de compactación de la mezcla con 10 % de RAP



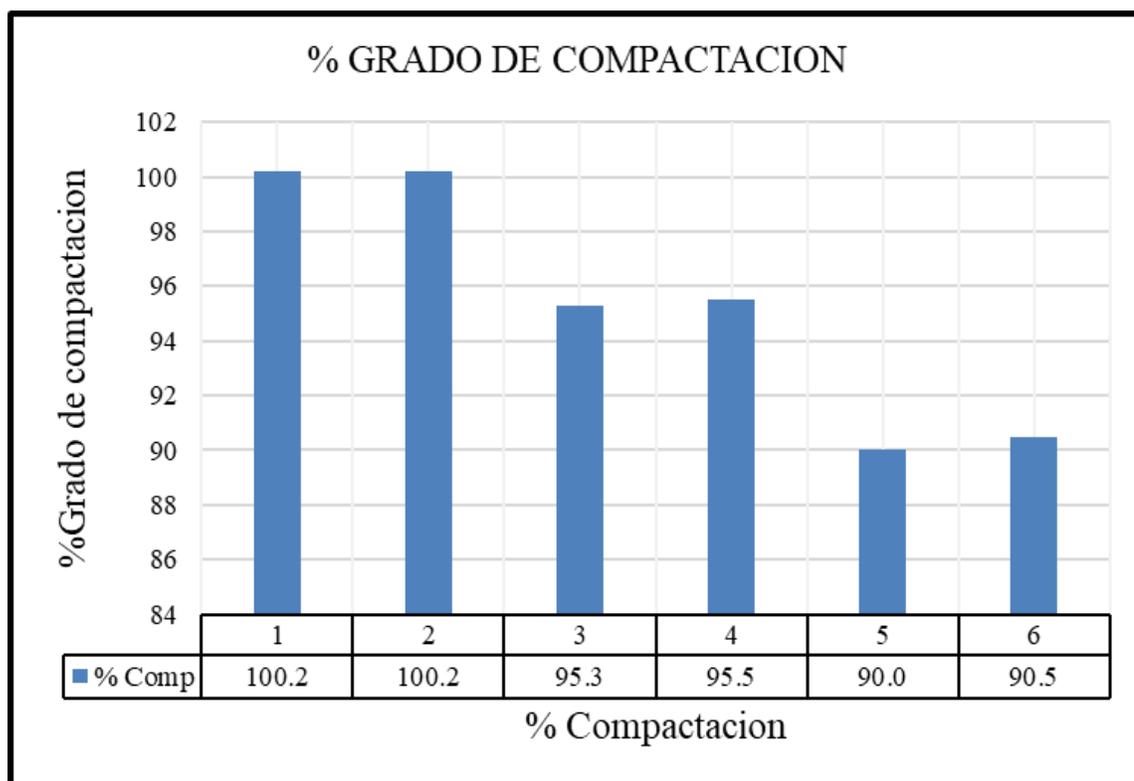
Fuente: Elaboración propia

Muestra 1 suelo 73 % - RAP 20 % - cemento 7 %

<b>Molde N°</b>	<b>16</b>		<b>18</b>		<b>15</b>	
N° de capas	<b>5</b>		<b>5</b>		<b>5</b>	
N° de golpes / capa	<b>56</b>		<b>25</b>		<b>12</b>	
Densidad seca probeta (grs./cm <sup>3</sup> )	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9
Densidad máxima lab. (grs./cm <sup>3</sup> )	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
% De compactación	100.2	100.2	95.3	95.5	90.0	90.5

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.30 % Grado de compactación de la mezcla con 20 % de RAP



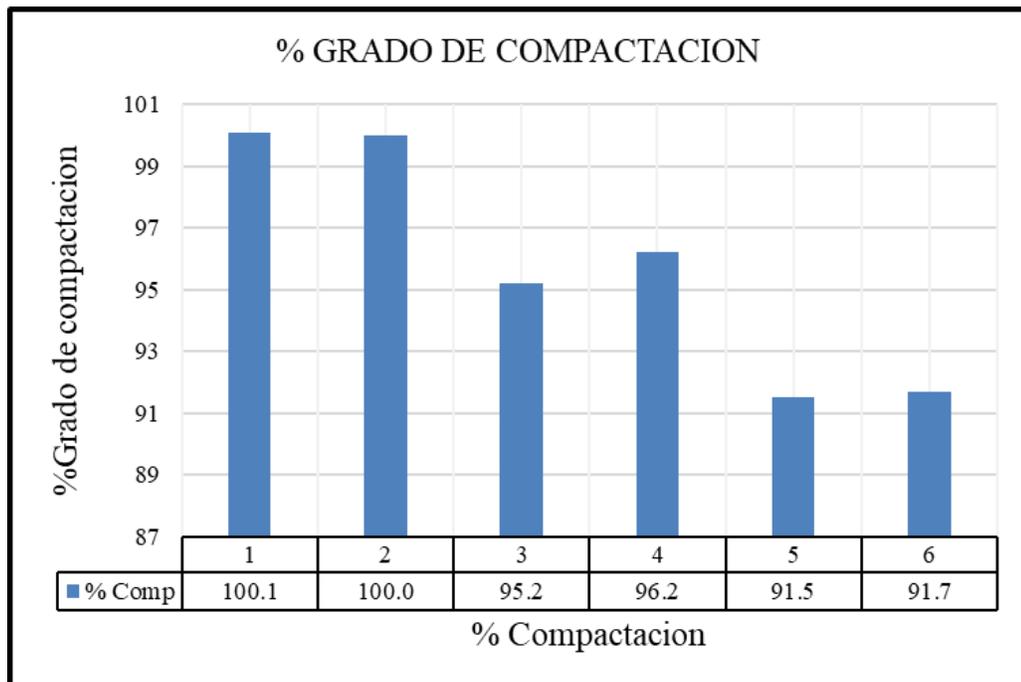
Fuente: Elaboración propia

Muestra 1 suelo 63 % - RAP 30 % - cemento 7 %

Molde N°	16		18		15	
N° de capas	5		5		5	
N° de golpes / capa	56		25		12	
Densidad seca probeta (grs./cm <sup>3</sup> )	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
Densidad máxima lab. (grs./cm <sup>3</sup> )	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
% De compactación	100.1	100.0	95.2	96.2	91.5	91.7

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.31 % Grado de compactación de la mezcla con 30 % de RAP



Fuente: Elaboración propia

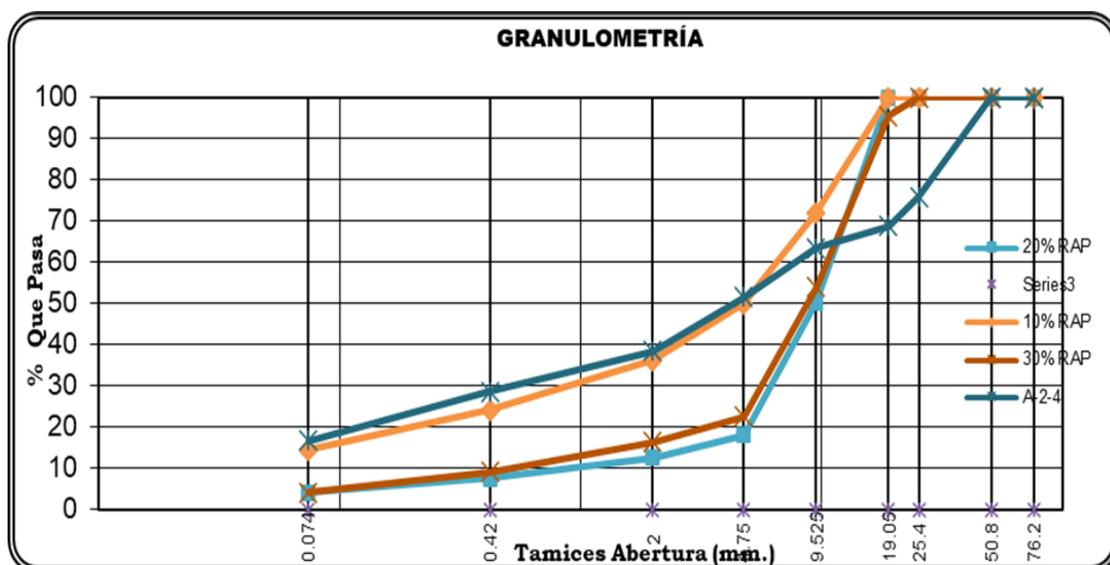
Para el ensayo de granulometría de la mezcla se hizo este ensayo con el fin de observar si la franja de la mezcla cambia cuando se aumenta el RAP.

Tabla 3.52 Análisis de la distribución granulométrica de la mezcla

Mezcla		10% RAP	20% RAP	30% RAP	Suelo
Tamiz	Abertura (mm)	Que pasa (%)	Que pasa (%)	Que pasa (%)	Que pasa (%)
Nº					
3"	76.20	100	100	100	100.0
2"	50.80	100	100	100	100.0
1"	25.40	100	100	100	75.8
3/4"	19.05	100	100	95.5	68.8
3/8"	9.525	72	50.3	53.9	63.4
4	4.800	49.9	18.1	22.6	51.6
10	2.000	36.2	12.5	16.7	38.5
40	0.420	24.2	7.6	9.5	28.6
200	0.074	14.4	4.2	4.8	16.7

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.32 Franja granulométrica de las mezclas analizadas



Fuente: Elaboración propia

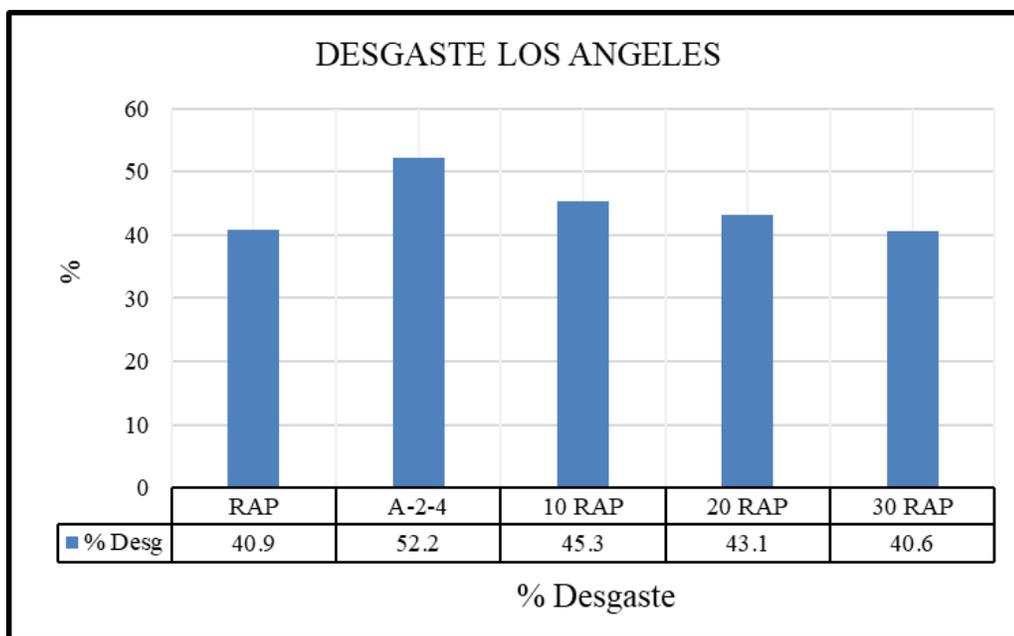
Se realizó la evaluación de la prueba de desgaste de los Ángeles para confirmar los datos obtenidos del CBR, donde mayor desgaste, menor resistencia al CBR y menor desgaste, mayor CBR, se aplicaron al suelo natural y las mezclas utilizadas como se muestra en la tabla 3.52.

Tabla 3.53 Análisis desgaste los Ángeles

N °	Muestras	Ret. tamiz N°12	Desgaste
M1	RAP	2954	40.9
M2	Suelo natural (A-2-4)	2390	52.2
M3	Suelo 83 % RAP 10 % Cemento 7 %	2735	45.3
M4	Suelo 73 % RAP 20 % Cemento 7 %	2847	43.1
M5	Suelo 63 % RAP 30 % Cemento 7 %	2954	40.6

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.33 Comparación desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

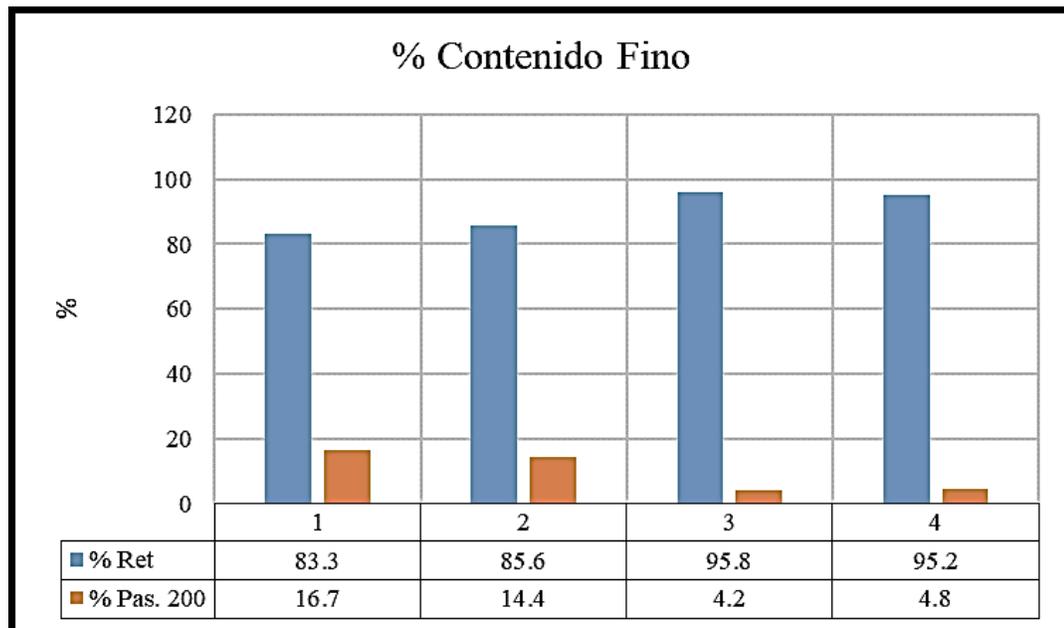
El último parámetro examinado es contenido fino. Se observa que no ha cambiado mucho porque el RAP no fue pulverizado y no afecta la parte del contenido fino, pero sí varía en función de las dosificaciones realizadas como se muestra en las tablas.

Tabla 3.54 Análisis de contenido de fino

Mezclas	Tamiz	Peso retenido tamiz (grs.)	Peso retenido acumulado (grs.)	Retenido tamiz (%)	Ret. acu. (%)	Que pasa (%)
	N °					
A-2-4	200"	112	329.2	23	83.3	16.7
10 RAP	200"	90	325	19.7	85.6	14.4
20 RAP	200"	85	350	18.6	95.8	4.2
30 RAP	200"	95	360	20.5	95.2	4.8

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.34 Comparación de % contenido de fino de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

### 3.8 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

#### 3.8.1 Costo de precio de RAP

##### Análisis de precios unitario

Actividad: PREPARACIÓN Y TRANSPORTE DE RAP

Unitario: m<sup>3</sup>

Moneda: Bolivianos

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total
<b>1.- MATERIALES</b>				
				0.00
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>0.00</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>				
CHOFER	HR.	0.01920	16.25	0.31
PEON	HR.	0.05076	12.00	0.61
				0.00
				0.00
				0.00
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>0.92</b>
BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA			71.18%	0.66
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES			14.94%	0.24
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>1.81</b>
<b>3.- EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>				
CHANCADORA AST40 - KTM	HR.	0.01110	375.00	4.16
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS >=950 M3	HR.	0.00068	422.27	0.29
VOLQUETA >= 4	HR.	0.00218	225.06	0.49
				0.00
				0.00
HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA			5.00%	0.09
<b>TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>				<b>5.03</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES</b>				
GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3			18.00%	1.23
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>				<b>1.23</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>				
UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4			10.00%	0.81
<b>TOTAL UTILIDAD</b>				<b>0.81</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5			3.09%	0.27
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>				<b>0.27</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>9.16</b>

### 3.8.2 Costo del precio unitario de las capas estabilizadas con RAP y cemento

#### Análisis de precios unitario

Actividad: PROV. Y CONFORM. CAPA BASE

Unitario: m<sup>3</sup>

Moneda: Bolivianos

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total
<b>1.- MATERIALES</b>				
MATERIAL DE CAPA BASE	M3	1.1000	30.00	33.00
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>33.00</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>				
A YUDANTE MAQUINARIA Y EQUIPO	HR.	0.01480	15.14	0.22
CHOFER	HR.	0.01920	16.25	0.31
OPERADOR	HR.	0.06254	23.28	1.46
OPERADOR DE EQUIPO PESADO 1	HR.	0.01110	23.28	0.26
OPERADOR DE PLANTA	HR.	0.05076	24.00	1.22
PEON	HR.	0.05076	12.00	0.61
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>4.08</b>
BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA			71.18%	2.90
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES			14.94%	1.04
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>8.02</b>
<b>3.- EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>				
BOMBA DE AGUA 2 A 6 PLG	HR.	0.00740	28.41	0.21
CAMION CISTERNA 4000 A 10000 LT	HR.	0.01030	210.13	2.16
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS >=950 M3	HR.	0.00068	422.27	0.29
COMPAC ROD LISO Y PATA DE CABRA AUTOPROP M2 /HR	HR.	0.00740	304.66	2.25
MOTONIVELADORA 14G M2/HR	HR.	0.00740	340.47	2.52
PLANTA CLASIFICADORA VIBRADORA PORTATIL M3	HR.	0.04590	1,161.06	53.29
RODILLO NEUMATICO TSP >=1000	HR.	0.00370	332.33	1.23
TRACTOR DE ORUGA C/ESC. Y C/TOP >=D7	HR.	0.03921	716.03	28.08
VOLQUETA 4 M3	HR.	0.00218	225.06	0.49
HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA			5.00%	0.40
<b>TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>				<b>90.93</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES</b>				
GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3			18.00%	23.75
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>				<b>23.75</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>				
UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4			10.00%	15.57
<b>TOTAL UTILIDAD</b>				<b>15.57</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5			3.09%	5.29
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>				<b>5.29</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>176.56</b>

### Análisis de precios unitario

Actividad: PROV. Y CONFORM. CAPA BASE (Suelo-Cemento)

Unitario: m<sup>3</sup>

Moneda: Bolivianos

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total
<b>1.- MATERIALES</b>				
CEMENTO	KG	81.9000	0.80	65.52
MATERIAL DE SUB-RASANTE	M3	0.93000	15.00	13.95
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>79.47</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>				
A YUDANTE MAQUINARIA Y EQUIPO	HR.	0.01480	15.14	0.22
CHOFER	HR.	0.01920	16.25	0.31
OPERADOR	HR.	0.06254	23.28	1.46
OPERADOR DE EQUIPO PESADO 1	HR.	0.01110	23.28	0.26
PEON	HR.	0.05076	12.00	0.61
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>2.86</b>
BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA			71.18%	2.04
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES			14.94%	0.73
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>5.63</b>
<b>3.- EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>				
CAMION CISTERNA 4000 A 10000 LT	HR.	0.01030	210.13	2.16
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS >=950 M3	HR.	0.00068	422.27	0.29
COMPAC ROD LISO Y PATA DE CABRA AUTOPROP M2 /HR	HR.	0.00740	304.66	2.25
MOTONIVELADORA 14G M2/HR	HR.	0.01400	340.47	4.77
RODILLO NEUMATICO TSP >=1000	HR.	0.00370	332.33	1.23
VOLQUETA 4 M3	HR.	0.00400	225.06	0.90
HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA			5.00%	0.28
<b>TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>				<b>11.88</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES</b>				
GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3			18.00%	17.46
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>				<b>17.46</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>				
UTILIDAD - % DE 1+2+3+4			10.00%	11.44
<b>TOTAL UTILIDAD</b>				<b>11.44</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5			3.09%	3.89
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>				<b>3.89</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>129.77</b>

### Análisis de precios unitario

Actividad: PROV. Y CONFORM. CAPA BASE (Suelo 68 %-RAP 25%-Cemento 7%)

Unitario: m<sup>3</sup>

Moneda: Bolivianos

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total	
<b>1.- MATERIALES</b>					
CEMENTO	KG	81.900	0.80	65.52	
PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO	M3	0.25000	9.16	2.29	
MATERIAL DE LA SUBRASANTE	M3	0.68000	15.00	10.20	
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>78.01</b>	
<b>2.- MANO DE OBRA</b>					
AYUDANTE MAQUINARIA YEQUIPO	HR.	0.01480	15.14	0.22	
CHOFER	HR.	0.01920	16.25	0.31	
OPERADOR	HR.	0.06254	23.28	1.46	
OPERADOR DE EQUIPO PESADO 1	HR.	0.01110	23.28	0.26	
PEON	HR.	0.05076	12.00	0.61	
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>2.86</b>	
BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA			71.18%	2.04	
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES			14.94%	0.73	
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>5.63</b>	
<b>3.- EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>					
CAMION CISTERNA 4000 A 10000 LT	HR.	0.01030	210.13	2.16	
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS >=950 M3	HR.	0.00068	422.27	0.29	
COMPAC ROD LISO Y PATA DE CABRA AUTOPROP M2 /HR	HR.	0.00740	304.66	2.25	
MOTONIVELADORA 14G M2/HR	HR.	0.01400	340.47	4.77	
RODILLO NEUMATICO TSP >=1000	HR.	0.00370	332.33	1.23	
VOLQUETA 4 M3	HR.	0.00400	225.06	0.90	
HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA				5.00%	0.28
<b>TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>				<b>11.88</b>	
<b>4.- GASTOS GENERALES</b>					
GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3			18.00%	17.19	
<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>				<b>17.19</b>	
<b>5.- UTILIDAD</b>					
UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4			10.00%	11.27	
<b>TOTAL UTILIDAD</b>				<b>11.27</b>	
<b>6.- IMPUESTOS</b>					
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5			3.09%	3.83	
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>				<b>3.83</b>	
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>127.82</b>	

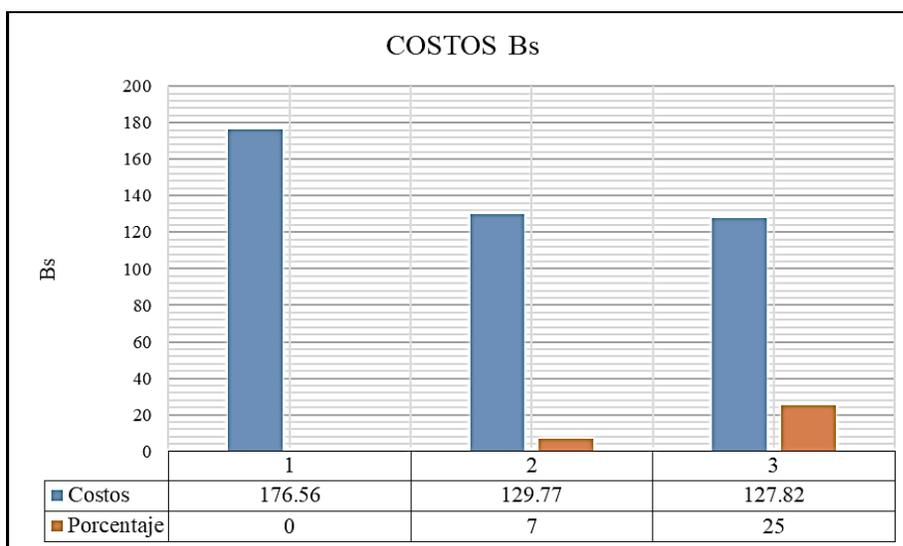
## Análisis de resultado de costos

Tabla 3.55 Costo de la capa base

Identificación	Costo
Prov. y conform. capa base	176.56
Prov. y conform. capa base (suelo -cemento)	129.77
Prov. y conform. capa base (suelo - RAP 25 % - cemento)	127.82

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.35 Comparación de costos de capa base



Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar es preciso tener en cuenta que el costo de producción es uno de los indicadores importantes a considerar en los proyectos de ingeniería. por tanto, mientras más eficiente sea la labor de estas, menos recursos se invertirán en su producción, por así mismo decir menor será la cuantía de los gastos.

Para el análisis comparativo del presupuesto de la capa base y la capa estabilizadas se puede observar que la capa base tiene un precio alto porque el material se compra a una cantera, sin contar el costo de sobre acarreo a la obra que tendría otro precio, para la opción 2 donde se mejorara la subrasante de la zona adicionando cemento y cumpliendo con características de resistencia para la capa base donde su costo es menor a un 27 % con respecto a la capa base normal y para la opción 3 capa estabilizada con suelo-RAP-

cemento también se mejora la capa subrasante de la zona con cemento pero se adicionado el RAP para disminuir el suelo utilizado como complemento así mismo cumpliendo con características de resistencia para una capa base y se tiene una disminución de 28 % con respecto a la capa base normal, la mezcla tiene una diferencia de 1 % respecto a la opción 2 porque el material RAP tiene un costo de producción que no es elevado.

Bueno en los precios en tanto a la estabilización suelo cemento y suelo-RAP-cemento no existe una gran diferencia de precios, pero si se está ocupando un material desechado que ese material no tenía algún uso en específico en tanto ayudamos que no exista un impacto ambiental recolectando ese material.

En conclusión, se puede decir que utilizando el material de la zona de subrasante es factible realizarse cualquiera de las mezclas ya que tendrá un menor costo y no tendrían el ítem de sobre acarreo que elevaría el precio del proyecto.

### 3.8.3 Costo de colocado en 1 km de capa base

Costo de capa base colocado a un 1 km

Capa base	Capa base suelo cemento	Capa base suelo RAP cemento optimo
e=12	e=12	e=12
Costo=176.56 Bs/m <sup>3</sup>	Costo=129.77	Costo=127.82 Bs/m <sup>3</sup>

### Costo para 1 km de capa base granular

Datos:

L=1 km

Ancho de vía 7 m

Espesor de capa base=0.12 m

Volumen del suelo en 1 km

$$V=1000 \times 7 \times 0.12$$

$$V=840 \text{ m}^3$$

Costo Capa base granular con sobre acarreo del material para la zona.

$$\text{Prov. y conform. capa base} = 840 \times 176.56 = 148,310 \text{ bs}$$

$$\text{Precio total de colocado de capa base} = 148,310 \text{ bs}$$

**Costo para 1 km de capa base suelo-cemento 7%**

Datos:

Espesor de capa base=0.12 m

Volumen del suelo en 1 km

$$V = 1000 \times 7 \times 0.12$$

$$V = 840 \text{ m}^3$$

Costo Capa base mejorada con la adición de cemento y RAP para la subrasante

$$\text{Prov. y conform. capa base (suelo-cemento)} = 840 \times 129.77 = 109,006 \text{ bs}$$

$$\text{Precio total de colocado de capa base (suelo-cemento)} = 109,006 \text{ bs}$$

**Costo para 1 km de capa base suelo 68 % - RAP 25 % - cemento 7%**

Datos:

Espesor de capa base=0.12 m

Volumen del suelo en 1 km

$$V = 1000 \times 7 \times 0.12$$

$$V = 840 \text{ m}^3$$

Costo Capa base mejorada con la adición de cemento y RAP para la subrasante

$$\text{Prov. y conform. capa base (suelo-RAP-cemento)} = 840 \times 127.82 = 107,368 \text{ bs}$$

$$\text{Precio total de colocado de capa base (suelo-RAP-cemento)} = 107,368 \text{ bs}$$

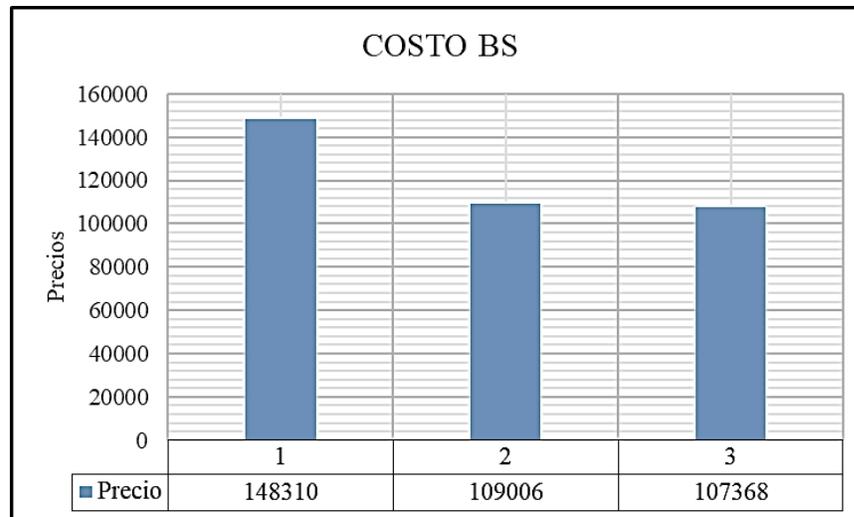
Análisis de costo de capa base colocado en el tramo San Jacinto Tolomosa para un 1 Km

Tabla 3.56 Costo para 1 km de capa base

Mezcla	Costo (Bs)
Capa base normal	148,310 bs
Capa base suelo-cemento	109,006 bs
Capa base suelo-RAP-cemento	107,368 bs

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.36 Comparación de costo para 1 km de capa base



Fuente: Elaboración propia

Bueno analizando el precio colocado en obra primero analizamos la capa base normal que tiene un precio elevado porque el material no se encuentra en la zona y se debe comprar y a la vez el mismo transportar a la obra haciendo que el monto del proyecto se eleve mientras más lejos este el material de capa base más se elevara será el precio. En la opción 2 donde se realiza una mezcla del suelo de la subrasante con cemento así obteniendo propiedades de capa base pero en datos de resistencia elevados con una diferencia del precio a la capa normal de 27 % , para la opción 3 , donde se hace una mezcla con material desechado RAP donde se pretende que el material funcione como capa base en tanto al precio se tiene una diferencia de precio de un 28 % menos que la capa base normal dando así que mejorando el suelo de la zona sea más factible el proyecto.

La idea es que el material desechado pueda ser utilizado sin que afecte la resistencia de la capa base estabilizada con el RAP.

### 3.8.4 Especificaciones técnicas

#### PROV. Y COLOCADO DE CAPA BASE

##### 1. DESCRIPCIÓN

Esta especificación regula localidad y gradación de las mezclas; la ejecución y control de la capa base de material granular natural y/o triturado, que constituye una capa de la estructura del pavimento con espesor constante en toda la sección transversal. Esta capa se colocará debidamente compactada y regularizada, respetando el alineamiento, perfil y secciones transversales indicados en el proyecto. La base estabilizada granulométricamente está constituida por una capa granular colocada sobre la sub base, subrasante o sobre el refuerzo estructural compactada y regularizada. Esta capa será ejecutada con materiales previamente seleccionados

##### 2. MATERIALES

La base estabilizada será ejecutada con materiales que cumplan los siguientes requisitos:

- a) Poseer una composición granulométrica encuadrada en una de las columnas de la tabla recomendadas AASHTO M-147 de 1990.

##### Gradaciones para materiales de capa base

Porcentajes por peso del material que pasa por tamices con malla cuadrada según AASHTO T-11 y T-27:

Tipo de gradación				
Tamiz	A	B	C	D
2"	100	100		
1"	-	75-95	100	100
3/8"	30 - 65	40-75	50-85	50-80
No. 4	25-55	30-60	35-65	35-65
No. 10	15-40	20-45	25-50	25-30
No. 40	8-20	15-30	15-30	10-30
No. 200	2-8	5-15	5-15	0-15

- b) La fracción que pasa el tamiz No., 40 deberá tener un límite líquido inferior o igual a 25% y un índice de plasticidad inferior o igual a 6%. Pasando de este límite, hasta 8 como máximo, el equivalente de arena deberá ser mayor que 30%.
- c) La fracción fina de la capa base será arena triturada o natural. La fracción que pasa el tamiz No. 200 de la serie U.S. Standart no debe ser mayor que los dos tercios de la fracción pasa el tamiz No. 40 de la misma serie.
- d) El índice de Soporte de California no deberá ser inferior a 80% para pavimentos flexibles y la expansión máxima será de 0,5%, cuando sean determinados con la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180-D.
- e) El agregado retenido en el tamiz No. 10 debe estar constituido de partículas duras y durables, exentas de fragmentos blandos, alargados o laminados y exentos de materia vegetal, terrones de arcilla u otra sustancia perjudicial. Los agregados gruesos deberán tener un desgaste no superior a 40% a 500 revoluciones según lo determine el ensayo AASHTO T-96.
- f) El 50% de las partículas retenidas en el tamiz N°4, de la serie U.S. Standard, para los agregados utilizados para capa base en pavimentos flexibles deben tener al menos una cara fracturada por trituración.

Los materiales serán explotados de las fuentes mencionadas en el diseño. La SUPERVISION podrá indicar o aprobar otras fuentes, de acuerdo a su criterio.

### **3. EQUIPO**

Se requiere el siguiente equipo, en excelentes condiciones de operación, para la ejecución de la base:

- a) Planta trituradora, dosificadora o seleccionadora según el caso.
- b) Equipo de extracción, carga y transporte.
- c) Distribuidor autopropulsado.
- d) Motoniveladora pesada con escarificador.
- e) Camión tanque distribuidor de agua.

- f) Rodillos compactadores tipo liso-vibratorio y neumático.
- g) Azadas rotativas, si es necesario.

Además del equipo indicado, podrá utilizarse otro tipo de equipo aceptado por LA SUPERVISIÓN.

#### **4. EJECUCIÓN**

En general, la ejecución de la capa base estabilizada granulométricamente, comprende las operaciones de producción, distribución sobre plataforma, mezcla y pulverización, humedecimiento o desecación, compactación y acabado, de los materiales transportados del yacimiento o planta, colocados sobre una superficie debidamente preparada, conformada monolíticamente y aprobada por el SUPERVISOR en el ancho establecido, en cantidades que permitan llegar al espesor diseñado luego de la compactación.

El transporte del material se realizará en volquetas. El material será protegido con lona o algún material adecuado que apruebe la supervisión.

Antes de iniciar las operaciones construcción

El espesor mínimo de cualquier capa de base será de 0.10 m después de su compactación.

Las densidades de la capa acabada deberán ser como mínimo de 100% de la densidad máxima determinada según el ensayo AASHTO T-180 y el contenido de humedad deberá variar como máximo entre  $\pm 2\%$  de la humedad óptima obtenida en el ensayo anterior.

El material será distribuido uniformemente sobre la capa inferior aprobada de modo que se evite la segregación y en cantidad tal que permita obtener el espesor programado después de la compactación.

Después de la obtención del contenido de humedad se iniciarán las operaciones de compactación. Los rodillos recorrerán la capa que está siendo compactada, en trayectorias equidistantes del eje, a modo de sobreponer, en cada recorrido, a mitad del rastro debajo en el recorrido anterior. En los alineamientos rectos se realizará en los bordes hacia el eje, en los tramos con curva del borde más bajo al borde más alto, repetidamente, hasta obtener

el grado de compactación especificado en los planos. En las primeras pasadas se utilizará rodillo vibratorio.

Las pasadas sucesivas de un mismo rodillo compactador serán ejecutadas de modo de evitar que el retorno no sea en la misma sección. No será permitida ninguna maniobra de los rodillos compactadores sobre la base que está siendo compactada, los cambios de dirección debiendo hacerse fuera del sector en curso de compactación.

En las partes adyacentes al inicio y al final de la capa base en construcción, la compactación será ejecutada transversalmente al eje. En las partes inaccesibles a los rodillos compactadores, así como las partes en que su uso no fuera deseable (cabeceras de obras de arte especiales), la compactación se ejecutará con compactadores vibratorios manuales o con saltarín mecánico. Las operaciones de compactación deberán proseguir, hasta que, en todo el espesor y en toda la superficie de la capa base en construcción, el grado de compactación iguale o exceda el grado de compactación especificado. entonces, se iniciará el acabado de la superficie.

La conformación de la superficie final de la capa base será ejecutada simultáneamente con la compactación de la última capa. El acabado de la superficie será ejecutado con rodillos lisos y de neumáticos, admitiendo cortes cuando sea necesario, pero no rellenos. Si hubiera necesidad de relleno, la última capa deberá ser escarificada homogeneizada y compactada nuevamente. Las operaciones de acabado comprenden el retiro del material suelto, proveniente de los cortes para alcanzar las cotas previstas.

Si la superficie requiere correcciones geométricas y si se nota visiblemente segregada, la última capa será escarificada, homogeneizada y compactada nuevamente de acuerdo a estas especificaciones.

Los materiales de las canteras deberán ser triturados totalmente, cuando no se trate de materiales granulares naturales determinados por la supervisión.

No se autorizará la colocación del material de la capa base, cuando la humedad sea superior o inferior a la admisible para la compactación.

Los lugares en que las condiciones de compactación no cumplan con esta especificación serán totalmente retiradas y nuevamente configuradas, de acuerdo a estas especificaciones.

Durante todo el tiempo de la construcción de la capa base hasta la recepción de la capa, los materiales serán protegidos contra la acción destructiva de las aguas pluviales, del tránsito y de otros agentes que puedan dañarla.

La capa base no será sometida a la acción directa de cargas y de la abrasión que produce el tránsito, para lo cual el contratista deberá mantener adecuadamente los caminos de servicio. El supervisor autorizará, el tráfico en situaciones excepcionales y en áreas limitadas, cuando los daños que puedan ser provocados en la superficie acabada no perjudiquen la calidad de la capa base o al pavimento que será construido sobre la capa base. En caso que se produzca tráfico de vehículos sobre la capa base antes de la colocación de la siguiente capa (que forme parte de la base) o de la capa de rodadura, el supervisor verificará que la superficie de la capa base mantenga y cumpla con los requerimientos de compactación y conformación geométrica antes de la colocación del material de la siguiente capa.

## **5. CONTROL POR LA SUPERVISIÓN**

### **5.1 CONTROL DEL MATERIAL**

Para los materiales se exigirá el cumplimiento de normas y la realización de los siguientes ensayos.

- a) Ensayos de granulometría, de límite líquido y límite plástico según los métodos AASHTO T-27, AASHTO T-89 y AASHTO T-90 respectivamente, con espaciamiento máximo de 300 m. lineales.
- b) Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según el método AASHTOT-180-D, cada 300 m. como máximo con las muestras recogidas en puntos que, en principio, obedezcan el orden: derecho, eje, borde izquierdo, eje, borde derecho, etc. A 60 cm. del borde.
- c) Un ensayo del índice de Soporte de California (CBR) conforme el método AASHTO T-193, con la energía de compactación del ensayo AASHTOT-180-

Determinado con la energía de compactación AASHTO T-180-D, con un espaciamiento máximo de 300 m. lineales.

- d) Un ensayo de desgaste de los ángulos de cada yacimiento y si existe variación natural del material.
- e) Un ensayo de índice de forma de cada yacimiento o cuando se presente variación natural del material.

El número de los ensayos mencionados en los ítems "a", "d" y "e", podrán ser reducidos, siempre que, a exclusivo criterio de la supervisión, se verifique una homogeneidad del material en el lugar de aplicación y que la ejecución sea uniformizada y controlada.

La supervisión podrá definir, en base a observación visual de la plataforma terminada, el punto de ejecución de los ensayos de densidad.

Para la aceptación serán considerados los valores individuales de los resultados de los ensayos.

## **5.2 CONTROL DE LA EJECUCION**

- a) Determinación de contenido de humedad del material cada 100 m. antes del proceso de compactación. Las tolerancias admitidas para la humedad de compactación en la superficie serán de (+/-) 2 % respecto a la humedad óptima.
- b) Determinación de la densidad “in situ” del material compactado con un espaciamiento de cada 100 m, en principio, en puntos ubicados a los tres bolillos: borde izquierdo, eje, borde derecho, eje, borde izquierdo, etc. De acuerdo a procedimientos estándar T- 191 y T 224, este último para el ajuste de la densidad máxima por variación en el contenido de partículas gruesas.
- c) Determinación del grado de compactación (GC), con la utilización de los valores de densidad sea máxima determinados en el laboratorio y de la densidad seca” in situ” obtenidos en la superficie. El GC de la capa ejecutada tendrá un valor mínimo de 100%.

La supervisión podrá definir, en base a observación visual de la plataforma terminada, el punto de ejecución de los ensayos de densidad.

### **5.3 CONTROL GEOMÉTRICO**

Después de la ejecución de la capa de base, se procederá a la nivelación del eje y los bordes, permitiéndose las siguientes tolerancias:

- a) Variación máxima en el ancho de más 10 cm., no admitiéndose variación en menos
- b) Variación máxima en el bombeo establecido de más 5%, no admitiéndose variación en menos
- c) Variación máxima de cotas para el eje y para los bordes de menos (+/-) 1 cm. con relación a las cotas de diseño.
- d) Variación máxima de más (-) 1 cm., no admitiéndose variación en menos (-), en el espesor de la capa con relación al espesor indicado en el diseño y/u Ordenes de Trabajo, medido como mínimo en un punto cada 100 m.

### **6. MEDICIÓN**

La cantidad de capa base de material granular ejecutada y aceptada y aprobada será medida en metros cúbicos(m<sup>3</sup>) ejecutadas conforme a las secciones transversales del proyecto.

Para el cálculo de los volúmenes, tomando en cuenta las tolerancias especificadas, se consideran los espesores individuales medidos en borde, eje, borde. Si el espesor individual (E.I.) es inferior al espesor del diseño ((E.D), se considerará para el cálculo de la sección el valor de (E.I) en caso contrario se tomará (E.D.).

El transporte del material e la capa base, será medido por metro cubico por kilómetro como resultado del producto del volumen colocado de este material por la distancia del menor recorrido indicado en el proyecto o a criterio de la supervisión.

### **8. TRANSPORTE**

El material de capa base se transportará en vehículos apropiados protegidos con lonas u otros cobertores adecuados, asegurándolos a la carrocería, de manera de impedir que parte del material caiga sobre las vías por las cuales transitan los vehículos.

## **7. PAGO**

Los trabajos de construcción de la capa base, medidos en conformidad al inciso 6, serán pagados a los precios unitarios contractuales correspondientes a los ítems de Pago definidos y presentados en los Formularios de Propuesta.

Dichos precios constituyen la compensación total por el servicio efectuado e incluyen operaciones de desbroce y limpieza del yacimiento, extracción, trituración, dosificación o selección caso sea necesario, excavación, carga, distribución, mezcla, pulverización, humedecimiento o desecación, compactación y acabado.

Asimismo, incluirá la construcción y mantenimiento de los caminos de servicio y toda la mano de obra, equipo, herramientas e Imprevistos necesarios para ejecutar los trabajos descritos en esta especificación.

### **PROV. Y COLOCADO CAPA BASE (SUELO CEMENTO)**

#### **1. DESCRIPCIÓN**

Esta especificación regula localidad y gradación de las mezclas; la ejecución y control de la capa base de material granular natural y/o triturado (suelo-cemento), que constituye una capa de la estructura del pavimento con espesor constante en toda la sección transversal. Esta capa se colocará debidamente compactada y regularizada, respetando el alineamiento, perfil y secciones transversales indicados en el proyecto. La base estabilizada granulométricamente está constituida por una capa granular colocada sobre la sub base, subrasante o sobre el refuerzo estructural compactada y regularizada. Esta capa será ejecutada con materiales previamente seleccionados.

#### **2. MATERIALES**

Cemento Portland IP-30, es un Cemento Portland con Puzolana, Tipo IP, Categoría resistente Media, con resistencia a la compresión de 30MPa a 28 días en mortero normalizado de cemento.

Se caracteriza por su menor calor de hidratación, menor fisuración y retracción térmica, mejor trabajabilidad, mayor resistencia a ataques químicos, menor reacción álcali/agregado, mayor impermeabilidad, mayor durabilidad.

Recomendado para hormigón armado estructural, prefabricados, hormigones en masa, hormigones con áridos reactivos, hormigones en ambientes agresivos, hormigón compactado a rodillo, obras hidráulicas, cimentaciones, y en general en todo tipo de construcciones.

### **CARACTERISTICAS**

Sus características físico-mecánicas le permiten brindar el mejor rendimiento en dosificaciones de cualquier tipo de hormigón y mortero para diferentes aplicaciones.

El cemento Tipo IP-30 debe contar con:

- Sello de certificación de la calidad IBNORCA.
- Modernos laboratorios.
- Equipo de Asesores Comerciales que llegan hasta su obra,
- brindándole un servicio personalizado.

Aplicaciones:

- Elementos estructurales en general (vigas, losas, etc).
- Elementos prefabricados (pretensados, premoldeados, postensados).
- Pavimento rígido.
- Puentes y viaductos.
- Revestimientos o revoques.
- Morteros para tabiquería.
- Represas.

La base estabilizada será ejecutada con materiales que cumplan los siguientes requisitos:

- a) Poseer una composición granulométrica encuadrada en una de las columnas de la tabla recomendadas AASHTO M-147 de 1990.

### Gradaciones para materiales de capa base

Porcentajes por peso del material que pasa por tamices con malla cuadrada según AASHTO T-11 y T-27:

Tipo de gradación				
Tamiz	A	B	C	D
2"	100	100		
1"	-	75-95	100	100
3/8"	30 - 65	40- 75	50 -85	50-80
No. 4	25 - 55	30-60	35-65	35-65
No. 10	15 - 40	20-45	25-50	25-30
No. 40	8 - 20	15-30	15-30	10-30
No. 200	2- 8	5-15	5-15	0-15

- b) La fracción que pasa el tamiz No., 40 deberá tener un límite líquido inferior o igual a 25% y un índice de plasticidad inferior o igual a 6%. Pasando de este límite, hasta 8 como máximo, el equivalente de arena deberá ser mayor que 30%.
- c) La fracción fina de la capa base será arena triturada o natural. La fracción que pasa el tamiz No. 200 de la serie U.S. Standart no debe ser mayor que los dos tercios de la fracción que pasa el tamiz No. 40 de la misma serie.
- d) El índice de Soporte de California no deberá ser inferior a 80% para pavimentos flexibles y la expansión máxima será de 0,5%, cuando sean determinados con la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180-D.
- e) El agregado retenido en el tamiz No. 10 debe estar constituido de partículas duras y durables, exentas de fragmentos blandos, alargados o laminados y exentas de materia vegetal, terrones de arcilla u otra sustancia perjudicial. Los agregados gruesos deberán tener un desgaste no superior a 40% a 500 revoluciones según lo determine el ensayo AASHTO T-96.
- f) El 50% de las partículas retenidas en el tamiz N°4, de la serie U.S. Standard, para los agregados utilizados para capa base en pavimentos flexibles deben tener al menos una cara fracturada por trituración.

Los materiales serán explotados de las fuentes mencionadas en el diseño. La SUPERVISION podrá indicar o aprobar otras fuentes, de acuerdo a su criterio.

### **3. EQUIPO**

Se requiere el siguiente equipo, en excelentes condiciones de operación, para la ejecución de la base:

- a) Equipo de extracción, carga y transporte.
- b) Motoniveladora pesada con escarificador.
- c) Camión tanque distribuidor de agua.
- d) Rodillos compactadores tipo liso-vibratorio y neumático.
- e) Azadas rotativas, si es necesario.

Además del equipo indicado, podrá utilizarse otro tipo de equipo aceptado por LA SUPERVISIÓN.

### **4. EJECUCIÓN**

En general, la ejecución de la capa base estabilizada granulométricamente, comprende las operaciones de producción, distribución sobre plataforma, mezcla y pulverización, humedecimiento o desecación, compactación y acabado, de los materiales transportados del yacimiento o planta, colocados sobre una superficie debidamente preparada, conformada monolíticamente y aprobada por el SUPERVISOR en el ancho establecido, en cantidades que permitan llegar al espesor diseñado luego de la compactación.

El transporte del material se realizará en volquetas. El material será protegido con lona o algún material adecuado que apruebe la supervisión.

Antes de iniciar las operaciones construcción

El espesor mínimo de cualquier capa de base será de 0.10 m después de su compactación.

Las densidades de la capa acabada deberán ser como mínimo de 100% de la densidad máxima determinada según el ensayo AASHTO T-180 y el contenido de humedad deberá variar como máximo entre  $\pm 2\%$  de la humedad óptima obtenida en el ensayo anterior.

El material será distribuido uniformemente sobre la capa inferior aprobada de modo que se evite la segregación y en cantidad tal que permita obtener el espesor programado después de la compactación.

Después de la obtención del contenido de humedad se iniciarán las operaciones de compactación. Los rodillos recorrerán la capa que está siendo compactada, en trayectorias equidistantes del eje, a modo de sobreponer, en cada recorrido, a mitad del rastro debajo en el recorrido anterior. En los alineamientos rectos se realizará en los bordes hacia el eje, en los tramos con curva del borde más bajo al borde más alto, repetidamente, hasta obtener el grado de compactación especificado en los planos. En las primeras pasadas se utilizará rodillo vibratorio.

Las pasadas sucesivas de un mismo rodillo compactador serán ejecutadas de modo de evitar que el retorno no sea en la misma sección. No será permitida ninguna maniobra de los rodillos compactadores sobre la base que está siendo compactada, los cambios de dirección debiendo hacerse fuera del sector en curso de compactación.

En las partes adyacentes al inicio y al final de la capa base en construcción, la compactación será ejecutada transversalmente al eje. En las partes inaccesibles a los rodillos compactadores, así como las partes en que su uso no fuera deseable (cabeceras de obras de arte especiales), la compactación se ejecutará con compactadores vibratorios manuales o con saltarín mecánico. Las operaciones de compactación deberán proseguir, hasta que, en todo el espesor y en toda la superficie de la capa base en construcción, el grado de compactación iguale o exceda el grado de compactación especificado. Entonces, se iniciará el acabado de la superficie.

La conformación de la superficie final de la capa base será ejecutada simultáneamente con la compactación de la última capa. El acabado de la superficie será ejecutado con rodillos lisos y de neumáticos, admitiendo cortes cuando sea necesario, pero no rellenos. Si hubiera necesidad de relleno, la última capa deberá ser escarificada homogeneizada y compactada nuevamente. Las operaciones de acabado comprenden el retiro del material suelto, proveniente de los cortes para alcanzar las cotas previstas.

Si la superficie requiere correcciones geométricas y si se nota visiblemente segregada, la última capa será escarificada, homogeneizada y compactada nuevamente de acuerdo a estas especificaciones.

Los materiales de las canteras deberán ser triturados totalmente, cuando no se trate de materiales granulares naturales determinados por la SUPERVISION.

No se autorizará la colocación del material de la capa base, cuando la humedad sea superior o inferior a la admisible para la compactación.

Los lugares en que las condiciones de compactación no cumplan con esta especificación serán totalmente retiradas y nuevamente configuradas, de acuerdo a estas especificaciones.

Durante todo el tiempo de la construcción de la capa base hasta la recepción de la capa, los materiales serán protegidos contra la acción destructiva de las aguas pluviales, del tránsito y de otros agentes que puedan dañarla.

La capa base no será sometida a la acción directa de cargas y de la abrasión que produce el tránsito, para lo cual el contratista deberá mantener adecuadamente los caminos de servicio. el supervisor autorizará, el tráfico en situaciones excepcionales y en áreas limitadas, cuando los daños que puedan ser provocados en la superficie acabada no perjudiquen la calidad de la capa base o al pavimento que será construido sobre la capa base. en caso que se produzca tráfico de vehículos sobre la capa base antes de la colocación de la siguiente capa (que forme parte de la base) o de la capa de rodadura, el supervisor verificará que la superficie de la capa base mantenga y cumpla con los requerimientos de compactación y conformación geométrica antes de la colocación del material de la siguiente capa.

## **LABORES PRELIMINARES**

### **RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA MEZCLA SUELO-CEMENTO**

La humedad óptima determinada en el ensayo Proctor para el suelo solo, será la empleada para la mezcla de suelo cemento, sobre entendiendo que se empleará 7% de cemento. Se moldearán 3 cilindro (ASTM D1 632) y se los someterá a rotura para verificar su

resistencia a compresión simple a los siete (7) días (ASTM D1 633), el valor de resistencia obtenida servirá para el control de calidad en obra. La resistencia mínima obtenida no deberá ser menor a 2.5 MPa.

### **PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE EXISTENTE**

Antes de construir la capa de suelo-cemento se comprobará que la superficie que va a servir de apoyo tenga la densidad y planicidad apropiadas, así como las cotas indicadas en los planos o definidas por el Supervisor. Todas las cotas se deberán corregir de acuerdo a lo establecido por el Supervisor.

### **TRANSPORTE**

El cemento se transportará en vehículos apropiados protegidos con lonas u otros cobertores adecuados, asegurándolos a la carrocería, de manera de impedir que parte del material caiga sobre las vías por las cuales transitan los vehículos.

### **EXTENDIDO DEL SUELO**

Se depositará y distribuirá el suelo seleccionado conformándolo de manera que se obtengan aproximadamente las secciones longitudinales y transversales indicadas en los planos. El suelo no deberá presentar aglomeración de partículas, si se diera el caso, se deberá disgregar las mismas. La capa a tratar no deberá ser menor a 10 cm ni superior a 20 cm, si el espesor de suelo a tratar es superior a 20 cm, la conformación deberá realizarse por capas hasta de 20 cm.

### **APLICACIÓN DEL CEMENTO**

El cemento se aplicará en bolsas, estas son colocadas y espaciadas en la plataforma para la distribución requerida. Después de que las bolsas se colocan correctamente, se cortan con un cuchillo o pala, y la cal se vierte en montones o en camellones transversales a la calzada. Después, se nivelará el cemento utilizando una motoniveladora para asegurar la extensión adecuada del material, generalmente, se requieren dos pasadas para que el cemento cubra con una película uniforme toda la superficie del suelo a mejorar.

Conformación de la mezcla suelo-cemento:

Se procederá a la mezcla del suelo-cemento con la motoniveladora con unas 6 pasadas hasta homogeneizar la mezcla.

### **APLICACIÓN DEL AGUA**

Tan pronto como se haya terminado el proceso de mezclado de suelo y cemento, se procederá a agregar la cantidad necesaria de agua, fijada en base al ensayo de compactación Proctor Standard. Se comenzará aplicando agua, con riesgos parciales y paralelos, evitándose la concentración de la misma en la superficie. Terminada la aplicación del agua, se continuará con el mezclado hasta obtener una distribución homogénea de la humedad de toda la mezcla.

### **EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN**

Una vez humedecida la mezcla, se conformará la capa de forma que satisfaga el perfil, con los pendientes indicados en los planos y se dará comienzo de inmediato a la compactación con rodillos hasta que la mezcla quede totalmente compactada en todo su ancho y espesor, hasta obtener una superficie lisa y de textura cerrada. Los trabajos se desarrollarán en forma tal que, desde la colocación del cemento hasta la terminación de la compactación, no transcurra un tiempo mayor a tres (3) horas.

### **CURADO**

El proceso de curado descrito a continuación, mismo que de ser utilizado será cancelado con el ítem correspondiente, es el recomendado para preparar la capa de suelo-cemento para el posterior colocado de una capa de cemento asfáltico: Para evitar la rápida evaporación del agua contenida en la masa de suelo-cemento compactada, se cubrirá la superficie inmediatamente, regándola con emulsión bituminosa.

Para que el riego bituminoso sea eficaz, no debe penetrar en la masa del suelo-cemento, a cuyo fin se tomará la siguiente precaución: en el momento de distribuir el material bituminoso, la humedad superficial deberá estar comprendida entre la óptima y la correspondiente a su superficie saturada; la cantidad mínima de emulsión para el curado será de un (1) litro por metro cuadrado de base.

Si la aplicación del riego de curado no se hace inmediatamente después de terminada la compactación, deberá mantenerse la humedad de la superficie mediante riego frecuente de agua por aspersión. En ningún caso el riego podrá efectuarse después de veinticuatro (24) horas de terminada la compactación.

### **APERTURA AL TRÁNSITO**

La capa de suelo-cemento no podrá habilitarse al tránsito público y de los equipos de construcción antes de los siete (7) días de su compactación. La apertura inicialmente será durante un tiempo corto para verificar el comportamiento de la capa y localizar las áreas que deban ser objeto de corrección. De acuerdo al comportamiento de la capa estabilizada, el supervisor definirá la apertura definitiva de la misma al tránsito.

### **LIMITACIONES**

En invierno o en días excesivamente fríos, se distribuirá el cemento, solo cuando la temperatura sea como mínimo igual a cinco (5) grados centígrados y con tendencia a aumentar. Hasta que la mezcla haya endurecido suficientemente no será liberada al tránsito, excepto para aquellos implementos necesarios para la construcción, los mismos que estarán previstos de rodados neumáticos.

### **CONTROLES**

Para el control en obra se aceptará el tramo de vía ejecutado, mismo que no será de longitud mayor a 100 metros lineales, en el que la resistencia promedio a la compresión a los siete días, determinada sobre tres (3) probetas, no deberá ser inferior al 95 % de la resistencia a la compresión obtenida en Laboratorio. Las probetas se moldearán en el Laboratorio con mezcla extraída de obra y en el momento en que se considere que el suelo-cemento tiene humedad óptima de compactación. La densidad de moldeo de estas probetas será la correspondiente al 100 % del Proctor Standard del suelo estabilizado o corregido.

## **5. CONTROL POR LA SUPERVISIÓN**

### **5.1 CONTROL DEL MATERIAL**

Para los materiales se exigirá el cumplimiento de normas y la realización de los siguientes ensayos.

- a) Ensayos de granulometría, de límite líquido y límite plástico según los métodos AASHTO T-27, AASHTO T-89 y AASHTO T-90 respectivamente, con espaciamiento máximo de 300 m. lineales.
- b) Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según el método AASHTOT-180-D, cada 300 m. como máximo con las muestras recogidas en puntos que, en principio, obedezcan el orden: derecho, eje, borde izquierdo, eje, borde derecho, etc. A 60 cm. del borde.
- c) Un ensayo del índice de Soporte de California (CBR) conforme el método AASHTO T-193, con la energía de compactación del ensayo AASHTOT-180-Determinado con la energía de compactación AASHTO T-180-D, con un espaciamiento máximo de 300 m. lineales.
- d) Un ensayo de desgaste de los ángeles de cada yacimiento y si existe variación natural del material.
- e) Un ensayo de índice de forma de cada yacimiento o cuando se presente variación natural del material.

El número de los ensayos mencionados en los ítems "a", "d" y "e", podrán ser reducidos, siempre que, a exclusivo criterio de la supervisión, se verifique una homogeneidad del material en el lugar de aplicación y que la ejecución sea uniformizada y controlada.

La supervisión podrá definir, en base a observación visual de la plataforma terminada, el punto de ejecución de los ensayos de densidad.

Para la aceptación serán considerados los valores individuales de los resultados de los ensayos.

## **5.2 CONTROL DE LA EJECUCIÓN**

- a) Determinación de contenido de humedad del material cada 100 m. antes del proceso de compactación. Las tolerancias admitidas para la humedad de compactación en la superficie serán de (+/-) 2 % respecto a la humedad óptima.
- b) Determinación de la densidad "in situ" del material compactado con un espaciamiento de cada 100 m, en principio, en puntos ubicados al tres bolillo: borde izquierdo, eje, borde derecho, eje, borde izquierdo, etc. De acuerdo a

procedimientos estándar T- 191 y T 224, este último para el ajuste de la densidad máxima por variación en el contenido de partículas gruesas.

- c) Determinación del grado de compactación (GC), con la utilización de los valores de densidad sea máxima determinados en el laboratorio y de la densidad seca "in situ" obtenidos en la superficie. El GC de la capa ejecutada tendrá un valor mínimo de 100%.

la supervisión podrá definir, en base a observación visual de la plataforma terminada, el punto de ejecución de los ensayos de densidad.

### **5.3 CONTROL GEOMETRICO**

Después de la ejecución de la capa de base, se procederá a la nivelación del eje y los bordes, permitiéndose las siguientes tolerancias:

- a) Variación máxima en el ancho de más 10 cm., no admitiéndose variación en menos
- b) Variación máxima en el bombeo establecido de más 5%, no admitiéndose variación en menos
- c) Variación máxima de cotas para el eje y para los bordes de menos (+/-) 1 cm. con relación a las cotas de diseño.
- d) Variación máxima de más (-) 1 cm., no admitiéndose variación en menos (-), en el espesor de la capa con relación al espesor indicado en el diseño y/u Ordenes de Trabajo, medido como mínimo en un punto cada 100 m.

### **6. MEDICIÓN**

La cantidad de capa base de material granular ejecutada y aceptada y aprobada será medida en metros cúbicos(m<sup>3</sup>) ejecutadas conforme a las secciones transversales del proyecto.

Para el cálculo de los volúmenes, tomando en cuenta las tolerancias especificadas, se consideran los espesores individuales medidos en borde, eje, borde. Si el espesor individual (E.I.) es inferior al espesor del diseño ((E.D), se considerará para el cálculo de la sección el valor de (E.I) en caso contrario se tomará (E.D.).

El transporte del material e la capa base, será medido por metro cúbico por kilómetro como resultado del producto del volumen colocado de este material por la distancia del menor recorrido indicado en el proyecto o a criterio de la supervisión.

## **7. PAGO**

Los trabajos de construcción de la capa base, medidos en conformidad al inciso 6, serán pagados a los precios unitarios contractuales correspondientes a los ítems de Pago definidos y presentados en los Formularios de Propuesta.

Dichos precios constituyen la compensación total por el servicio efectuado e incluyen operaciones de desbroce y limpieza del yacimiento, extracción, trituración, dosificación o selección caso sea necesario, excavación, carga, distribución, mezcla, pulverización, humedecimiento o desecación, compactación y acabado.

Así mismo, incluirá la construcción y mantenimiento de los caminos de servicio y toda la mano de obra, equipo, herramientas e Imprevistos necesarios para ejecutar los trabajos descritos en esta especificación.

### **PROV. Y COLOCADO CAPA BASE (SUELO-RAP-CEMENTO)**

#### **1. DESCRIPCIÓN**

Esta especificación regula localidad y gradación de las mezclas; la ejecución y control de la capa base de material granular natural y/o triturado (suelo-RAP-cemento), que constituye una capa de la estructura del pavimento con espesor constante en toda la sección transversal. Esta capa se colocará debidamente compactada y regularizada, respetando el alineamiento, perfil y secciones transversales indicados en el proyecto. La base estabilizada granulométricamente está constituida por una capa granular colocada sobre la sub base, subrasante o sobre el refuerzo estructural compactada y regularizada. Esta capa será ejecutada con materiales previamente seleccionados.

## **2. MATERIALES**

Cemento Portland IP-30, es un Cemento Portland con Puzolana, Tipo IP, Categoría resistente Media, con resistencia a la compresión de 30MPa a 28 días en mortero normalizado de cemento.

Se caracteriza por su menor calor de hidratación, menor fisuración y retracción térmica, mejor trabajabilidad, mayor resistencia a ataques químicos, menor reacción álcali/agregado, mayor impermeabilidad, mayor durabilidad.

Recomendado para hormigón armado estructural, prefabricados, hormigones en masa, hormigones con áridos reactivos, hormigones en ambientes agresivos, hormigón compactado a rodillo, obras hidráulicas, cimentaciones, y en general en todo tipo de construcciones.

El pavimento asfáltico reciclado o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).

### **CARACTERÍSTICAS**

Sus características físico-mecánicas le permiten brindar el mejor rendimiento en dosificaciones de cualquier tipo de hormigón y mortero para diferentes aplicaciones.

El cemento Tipo IP-30 debe contar con:

- Sello de certificación de la calidad IBNORCA.
- Modernos laboratorios.
- Equipo de Asesores Comerciales que llegan hasta su obra,
- brindándole un servicio personalizado.

Aplicaciones:

- Elementos estructurales en general (vigas, losas, etc).
- Elementos prefabricados (pretensados, premoldeados, postensados).
- Pavimento rígido.
- Puentes y viaductos.
- Revestimientos o revoques.
- Morteros para tabiquería.
- Represas.

El pavimento asfáltico reciclado o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) es el término dado a materiales de pavimento conformados por cemento asfáltico y agregados pétreos, que son removidos y reprocesados nuevamente. La forma común de su utilización es incorporarlo al diseño de una nueva mezcla asfáltica.

El material RAP puede proceder del fresado de pavimento asfáltico, de trozos de demolición de pavimentos asfálticos y de excesos de producción. Sus propiedades dependen en gran parte de las propiedades de los materiales constituyentes y del tipo de mezcla asfáltica.

El RAP debe ser procesado en una planta de trituración o seleccionadora para poder separarlo al menos en dos fracciones, una gruesa y otra fina correspondientes. La cantidad de ensayos estará en función de los volúmenes procesados.

La clasificación del RAP debe ser homogénea como también acopiarse separadamente en patios habilitados especialmente para tal fin. Se debe considerar su procedencia y tratarse en forma separada de manera que no produzca segregación de materiales ni contaminación.

Estas son las ventajas de utilizar pavimento asfáltico reciclado RAP :

- Reutilización de material
- Disminución del volumen de botaderos
- Reducción de costos en pavimentación
- Ahorro en importación y extracción de materia prima
- Conservación de suministro de material virgen
- Disminución en los tiempos de intervención en el camino
- Disminución en las importaciones de los productos asociados a la obra
- Reducción de costos de construcción asociados con materiales y acarreo

Utilizar el material de mezcla asfáltica recuperado en nuevas capas asfálticas es la única manera de recuperar el asfalto. Teniendo en cuenta que las plantas asfálticas no necesitan grandes cambios. No deben incorporar tambor o tolva especial. La inversión está relacionada con un procesamiento para el RAP. Las condiciones de fabricación son las normales para cualquier tipo de mezcla en caliente.

La base estabilizada será ejecutada con materiales que cumplan los siguientes requisitos:

- a) Poseer una composición granulométrica encuadrada en una de las columnas de la tabla recomendadas AASHTO M-147 de 1990.

### Gradaciones para materiales de capa base

Porcentajes por peso del material que pasa por tamices con malla cuadrada según AASHTO T-11 y T-27:

Tipo de gradación				
Tamiz	A	B	C	D
2"	100	100		
1"	-	75 - 95	100	100
3/8"	30 - 65	40- 75	50- 85	50 - 80
No. 4	25- 55	30 - 60	35 - 65	35 - 65
No. 10	15- 40	20- 45	25 - 50	25 - 30
No. 40	8 - 20	15 -30	15 - 30	10 - 30
No. 200	2 - 8	5- 15	5 - 15	0 - 15

- b) La fracción que pasa el tamiz No., 40 deberá tener un límite líquido inferior o igual a 25% y un índice de plasticidad inferior o igual a 6%. Pasando de este límite, hasta 8 como máximo, el equivalente de arena deberá ser mayor que 30%.
- c) La fracción fina de la capa base será arena triturada o natural. La fracción que pasa el tamiz No. 200 de la serie U.S. Standart no debe ser mayor que los dos tercios de la fracción pasa el tamiz No. 40 de la misma serie.
- d) El índice de Soporte de California no deberá ser inferior a 80% para pavimentos flexibles y la expansión máxima será de 0,5%, cuando sean determinados con la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180-D.
- e) El agregado retenido en el tamiz No. 10 debe estar constituido de partículas duras y durables, exentas de fragmentos blandos, alargados o laminados y exentas de materia vegetal, terrones de arcilla u otra sustancia perjudicial. Los agregados gruesos deberán tener un desgaste no superior a 40% a 500 revoluciones según lo determine el ensayo AASHTO T-96.

- f) El 50% de las partículas retenidas en el tamiz N°4, de la serie U.S. Standard, para los agregados utilizados para capa base en pavimentos flexibles deben tener al menos una cara fracturada por trituración.

Los materiales serán explotados de las fuentes mencionadas en el diseño. La SUPERVISION podrá indicar o aprobar otras fuentes, de acuerdo a su criterio.

### **3. EQUIPO**

Se requiere el siguiente equipo, en excelentes condiciones de operación, para la ejecución de la base:

- a) Equipo de extracción, carga y transporte.
- b) Motoniveladora pesada con escarificador.
- c) Camión tanque distribuidor de agua.
- d) Rodillos compactadores tipo liso-vibratorio y neumático.
- f) Azadas rotativas, si es necesario.

Además del equipo indicado, podrá utilizarse otro tipo de equipo aceptado por la supervisión.

### **4. EJECUCIÓN**

En general, la ejecución de la capa base estabilizada granulométricamente, comprende las operaciones de producción, distribución sobre plataforma, mezcla y pulverización, humedecimiento o desecación, compactación y acabado, de los materiales transportados del yacimiento o planta, colocados sobre una superficie debidamente preparada, conformada monolíticamente y aprobada por el supervisor en el ancho establecido, en cantidades que permitan llegar al espesor diseñado luego de la compactación.

El transporte del material se realizará en volquetas. El material será protegido con lona o algún material adecuado que apruebe la supervisión.

Antes de iniciar las operaciones construcción

El espesor mínimo de cualquier capa de base será de 0.10 m después de su compactación.

Las densidades de la capa acabada deberán ser como mínimo de 100% de la densidad máxima determinada según el ensayo AASHTO T-180 y el contenido de humedad deberá variar como máximo entre  $\pm 2\%$  de la humedad óptima obtenida en el ensayo anterior.

El material será distribuido uniformemente sobre la capa inferior aprobada de modo que se evite la segregación y en cantidad tal que permita obtener el espesor programado después de la compactación.

Después de la obtención del contenido de humedad se iniciarán las operaciones de compactación. Los rodillos recorrerán la capa que está siendo compactada, en trayectorias equidistantes del eje, a modo de sobreponer, en cada recorrido, a mitad del rastro debajo en el recorrido anterior. En los alineamientos rectos se realizará en los bordes hacia el eje, en los tramos con curva del borde más bajo al borde más alto, repetidamente, hasta obtener el grado de compactación especificado en los planos. En las primeras pasadas se utilizará rodillo vibratorio.

Las pasadas sucesivas de un mismo rodillo compactador serán ejecutadas de modo de evitar que el retorno no sea en la misma sección. No será permitida ninguna maniobra de los rodillos compactadores sobre la base que está siendo compactada, los cambios de dirección debiendo hacerse fuera del sector en curso de compactación.

En las partes adyacentes al inicio y al final de la capa base en construcción, la compactación será ejecutada transversalmente al eje. En las partes inaccesibles a los rodillos compactadores, así como las partes en que su uso no fuera deseable (cabeceras de obras de arte especiales), la compactación se ejecutará con compactadores vibratorios manuales o con saltarín mecánico. Las operaciones de compactación deberán proseguir, hasta que, en todo el espesor y en toda la superficie de la capa base en construcción, el grado de compactación iguale o exceda el grado de compactación especificado. Entonces, se iniciará el acabado de la superficie.

La conformación de la superficie final de la capa base será ejecutada simultáneamente con la compactación de la última capa. El acabado de la superficie será ejecutado con rodillos lisos y de neumáticos, admitiendo cortes cuando sea necesario, pero no rellenos. Si hubiera necesidad de relleno, la última capa deberá ser escarificada homogeneizada y compactada

nuevamente. Las operaciones de acabado comprenden el retiro del material suelto, proveniente de los cortes para alcanzar las cotas previstas.

Si la superficie requiere correcciones geométricas y si se nota visiblemente segregada, la última capa será escarificada, homogeneizada y compactada nuevamente de acuerdo a estas especificaciones.

Los materiales de las canteras deberán ser triturados totalmente, cuando no se trate de materiales granulares naturales determinados por la supervisión.

No se autorizará la colocación del material de la capa base, cuando la humedad sea superior o inferior a la admisible para la compactación.

Los lugares en que las condiciones de compactación no cumplan con esta especificación serán totalmente retiradas y nuevamente configuradas, de acuerdo a estas especificaciones.

Durante todo el tiempo de la construcción de la capa base hasta la recepción de la capa, los materiales serán protegidos contra la acción destructiva de las aguas pluviales, del tránsito y de otros agentes que puedan dañarla.

La capa base no será sometida a la acción directa de cargas y de la abrasión que produce el tránsito, para lo cual el contratista deberá mantener adecuadamente los caminos de servicio. el supervisor autorizará, el tráfico en situaciones excepcionales y en áreas limitadas, cuando los daños que puedan ser provocados en la superficie acabada no perjudiquen la calidad de la capa base o al pavimento que será construido sobre la capa base. en caso que se produzca tráfico de vehículos sobre la capa base antes de la colocación de la siguiente capa (que forme parte de la base) o de la capa de rodadura, el supervisor verificará que la superficie de la capa base mantenga y cumpla con los requerimientos de compactación y conformación geométrica antes de la colocación del material de la siguiente capa.

## **LABORES PRELIMINARES**

### **RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA MEZCLA SUELO-RAP-CEMENTO**

La humedad óptima determinada en el ensayo Proctor para el suelo solo, será la empleada para la mezcla de suelo-RAP-cemento, sobre entendiendo que se empleará 7 % de contenido en peso de cemento. Se moldearán 3 cilindros (ASTM D1 632) y se los someterá a rotura para verificar su resistencia a compresión simple a los siete (7) días (ASTM D1 633), el valor de resistencia obtenida servirá para el control de calidad en obra. La resistencia mínima obtenida no deberá ser menor a 2.5 MPa.

### **PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE EXISTENTE**

Antes de construir la capa de suelo-RAP-cemento se comprobará que la superficie que va a servir de apoyo tenga la densidad y planicidad apropiadas, así como las cotas indicadas en los planos o definidas por el Supervisor. Todas las cotas se deberán corregir de acuerdo a lo establecido por el Supervisor.

### **TRANSPORTE**

El cemento y el RAP se transportará en vehículos apropiados protegidos con lonas u otros cobertores adecuados, asegurándolos a la carrocería, de manera de impedir que parte del material caiga sobre las vías por las cuales transitan los vehículos.

### **EXTENDIDO DEL SUELO**

Se depositará y distribuirá el suelo seleccionado conformándolo de manera que se obtengan aproximadamente las secciones longitudinales y transversales indicadas en los planos. El suelo no deberá presentar aglomeración de partículas, si se diera el caso, se deberá disgregar las mismas. La capa a tratar no deberá ser menor a 10 cm ni superior a 20 cm, si el espesor de suelo a tratar es superior a 20 cm, la conformación deberá realizarse por capas hasta de 20 cm.

### **APLICACIÓN DEL CEMENTO Y RAP**

El cemento se aplicará en bolsas, estas son colocadas y espaciadas en la plataforma para la distribución requerida de 81.9 kilos por metro cubico. Después de que las bolsas se

colocan correctamente, se cortan con un cuchillo o pala, y el cemento y el rap se vierte en montones o en camellones transversales a la calzada.

Después, se nivelará el cemento y el rap utilizando una motoniveladora para asegurar la extensión adecuada del material, generalmente, se requieren dos pasadas para que el cemento cubra con una película uniforme toda la superficie del suelo a mejorar.

Conformación de la mezcla suelo-RAP-cemento:

Se procederá a la mezcla del suelo-RAP-cemento con la motoniveladora a dar unas 6 pasadas hasta homogeneizar la mezcla en una capa sola.

### **APLICACIÓN DEL AGUA**

Tan pronto como se haya terminado el proceso de mezclado de suelo y cemento, se procederá a agregar la cantidad necesaria de agua, fijada en base al ensayo de compactación Proctor Standard. Se comenzará aplicando agua, con riesgos parciales y paralelos, evitándose la concentración de la misma en la superficie. Terminada la aplicación del agua, se continuará con el mezclado hasta obtener una distribución homogénea de la humedad de toda la mezcla.

### **EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN**

Una vez humedecida la mezcla, se conformará la capa de forma que satisfaga el perfil, con los pendientes indicados en los planos y se dará comienzo de inmediato a la compactación con rodillos hasta que la mezcla quede totalmente compactada en todo su ancho y espesor, hasta obtener una superficie lisa y de textura cerrada. Los trabajos se desarrollarán en forma tal que, desde la colocación del cemento hasta la terminación de la compactación, no transcurra un tiempo mayor a tres (3) horas.

### **CURADO**

El proceso de curado descrito a continuación, mismo que de ser utilizado será cancelado con el ítem correspondiente, es el recomendado para preparar la capa de suelo-rap-cemento para el posterior colocado de una capa de cemento asfáltico

Para evitar la rápida evaporación del agua contenida en la masa de suelo-RAP-cemento compactada, se cubrirá la superficie inmediatamente, regándola con emulsión bituminosa.

Para que el riego bituminoso sea eficaz, no debe penetrar en la masa del suelo-RAP-cemento, a cuyo fin se tomará la siguiente precaución: en el momento de distribuir el material bituminoso, la humedad superficial deberá estar comprendida entre la óptima y la correspondiente a su superficie saturada; la cantidad mínima de emulsión para el curado será de un (1) litro por metro cuadrado de base.

Si la aplicación del riego de curado no se hace inmediatamente después de terminada la compactación, deberá mantenerse la humedad de la superficie mediante riego frecuente de agua por aspersion. En ningún caso el riego podrá efectuarse después de veinticuatro (24) horas de terminada la compactación.

### **APERTURA AL TRÁNSITO**

La capa de suelo-RAP-cemento no podrá habilitarse al tránsito público y de los equipos de construcción antes de los siete (7) días de su compactación. La apertura inicialmente será durante un tiempo corto para verificar el comportamiento de la capa y localizar las áreas que deban ser objeto de corrección. De acuerdo al comportamiento de la capa estabilizada, el supervisor definirá la apertura definitiva de la misma al tránsito.

### **LIMITACIONES**

En invierno o en días excesivamente fríos, se distribuirá el cemento, solo cuando la temperatura sea como mínimo igual a cinco (5) grados centígrados y con tendencia a aumentar. Hasta que la mezcla haya endurecido suficientemente no será liberada al tránsito, excepto para aquellos implementos necesarios para la construcción, los mismos que estarán previstos de rodados neumáticos.

### **CONTROLES**

Para el control en obra se aceptará el tramo de vía ejecutado, mismo que no será de longitud mayor a 100 metros lineales, en el que la resistencia promedio a la compresión a los siete días, determinada sobre tres (3) probetas, no deberá ser inferior al 95 % de la resistencia a la compresión obtenida en Laboratorio. Las probetas se moldearán en el

Laboratorio con la mezcla extraída de obra y en el momento en que se considere que el suelo-cemento tiene humedad óptima de compactación. La densidad de moldeo de estas probetas será la correspondiente al 100 % del Proctor Standard del suelo estabilizado o corregido.

## **5. CONTROL POR LA SUPERVISIÓN**

### **5.1 CONTROL DEL MATERIAL**

Para los materiales se exigirá el cumplimiento de normas y la realización de los siguientes ensayos.

- a) Ensayos de granulometría, de límite líquido y límite plástico según los métodos AASHTO T-27, AASHTO T-89 y AASHTO T-90 respectivamente, con espaciamiento máximo de 300 m. lineales.
- b) Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según el método AASHTOT-180-D, cada 300 m. como máximo con las muestras recogidas en puntos que, en principio, obedezcan el orden: derecho, eje, borde izquierdo, eje, borde derecho, etc. A 60 cm. del borde.
- c) Un ensayo del índice de Soporte de California (CBR) conforme el método AASHTO T-193, con la energía de compactación del ensayo AASHTOT-180-Determinado con la energía de compactación AASHTO T-180-D, con un espaciamiento máximo de 300 m. lineales.
- d) Un ensayo de desgaste de los ángeles de cada yacimiento y si existe variación natural del material.
- e) Un ensayo de índice de forma de cada yacimiento o cuando se presente variación natural del material.

El número de los ensayos mencionados en los ítems "a", "d" y "e", podrán ser reducidos, siempre que, a exclusivo criterio de LA SUPERVISIÓN, se verifique una homogeneidad del material en el lugar de aplicación y que la ejecución sea uniformizada y controlada.

La SUPERVISION podrá definir, en base a observación visual de la plataforma terminada, el punto de ejecución de los ensayos de densidad.

Para la aceptación serán considerados los valores individuales de los resultados de los ensayos.

## 5.2 CONTROL DE LA EJECUCIÓN

- a) Determinación de contenido de humedad del material cada 100 m. antes del proceso de compactación. Las tolerancias admitidas para la humedad de compactación en la superficie serán de (+/-) 2 % respecto a la humedad óptima.
- b) Determinación de la densidad “in situ” del material compactado con un espaciamiento de cada 100 m, en principio, en puntos ubicados al tres bolillo: borde izquierdo, eje, borde derecho, eje, borde izquierdo, etc. De acuerdo a procedimientos estándar T- 191 y T 224, este último para el ajuste de la densidad máxima por variación en el contenido de partículas gruesas.
- c) Determinación del grado de compactación (GC), con la utilización de los valores de densidad sea máxima determinados en el laboratorio y de la densidad seca ”in situ” obtenidos en la superficie. El GC de la capa ejecutada tendrá un valor mínimo de 100%.

La supervisión podrá definir, en base a observación visual de la plataforma terminada, el punto de ejecución de los ensayos de densidad.

## 5.3 CONTROL GEOMÉTRICO

Después de la ejecución de la capa de base, se procederá a la nivelación del eje y los bordes, permitiéndose las siguientes tolerancias:

- a) Variación máxima en el ancho de más 10 cm., no admitiéndose variación en menos
- b) Variación máxima en el bombeo establecido de más 5%, no admitiéndose variación en menos
- c) Variación máxima de cotas para el eje y para los bordes de menos (+/-) 1 cm. con relación a las cotas de diseño.
- d) Variación máxima de más (-) 1 cm., no admitiéndose variación en menos (-), en el espesor de la capa con relación al espesor indicado en el diseño y/u Ordenes de Trabajo, medido como mínimo en un punto cada 100 m.

## **6. MEDICIÓN**

La cantidad de capa base de material granular ejecutada y aceptada y aprobada será medida en metros cúbicos(m<sup>3</sup>) ejecutadas conforme a las secciones transversales del proyecto.

Para el cálculo de los volúmenes, tomando en cuenta las tolerancias especificadas, se consideran los espesores individuales medidos en borde, eje, borde. Si el espesor individual (E.I.) es inferior al espesor del diseño ((E.D), se considerara para el cálculo de la sección el valor de (E.I) en caso contrario se tomara (E.D.).

El transporte del material e la capa base, será medido por metro cúbico por kilómetro como resultado del producto del volumen colocado de este material por la distancia del menor recorrido indicado en el proyecto o a criterio de la supervisión.

## **7. PAGO**

Los trabajos de construcción de la capa base, medidos en conformidad al inciso 6, serán pagados a los precios unitarios contractuales correspondientes a los ítems de Pago definidos y presentados en los formularios de propuesta.

Dichos precios constituyen la compensación total por el servicio efectuado e incluyen operaciones de desbroce y limpieza del yacimiento, extracción, trituración, dosificación o selección caso sea necesario, excavación, carga, distribución, mezcla, pulverización, humedecimiento o desecación, compactación y acabado.

Así mismo incluirá la construcción y mantenimiento de los caminos de servicio y toda la mano de obra, equipo, herramientas e Imprevistos necesarios para ejecutar los trabajos descritos en esta Especificación.

### 3.9 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

#### 3.9.1 Análisis estadísticos de resistencia

Tabla 3.57 Datos de CBR

N °	CBR (X)
1	93.6
2	82.1
3	76.8

Fuente: Elaboración propia

#### Media aritmética

$$X = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

Donde:

$X_1 + X_2 + \dots =$  Sumatoria de X.

n = Numero de datos.

$$x = 84.2$$

#### Mediana

$$Me = X_{\frac{n+1}{2}}$$

Donde:

$X_{n+1} =$  Valor de posición.

$$Me = 82.1$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de y el otro 50% están por debajo.

## Medidas de dispersión

### Rango

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

Donde:

$X_{\max}$  = Valor máximo en X.

$X_{\min}$  = Valor mínimo en X.

$$R = 16.8$$

Se puede observar que existe dispersión entre los datos, para que los datos sean más homogéneos los valores extremos deben ser más cercanos entre ellos.

### Desviación media

$$DM = \frac{\sum |X_j - X_m|}{n}$$

Donde:

$X_m$  = Media aritmética de los datos.

$X_j$  = Variable X.

$n$  = Número de datos.

$$DM = 6.28$$

El valor de 6.28 es un error promedio, este se refiere a la distancia promedio de dato a dato de toda la serie.

**Varianza poblacional**

$$S^2 = \frac{\sum (X_j - X_m)^2}{n}$$

Donde:

$X_m$  = Media aritmética de los datos.

$X_j$  = Variable X.

$n$  = Número de datos.

$$s^2 = 49.17$$

**Varianza muestral**

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_j - X_m)^2}{n-1}$$

Donde:

$X_m$  = Media aritmética de los datos.

$X_j$  = Variable X.

$n-1$  = Valor de posición.

$$\sigma^2 = 73.76$$

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos del CBR.

**Desviación estándar**

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Donde:

$\sigma^2$  = Varianza muestra.

$$\sigma = 7.1$$

Por tanto, el error estándar es de 8.39, este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

### **Coefficiente de variación**

$$CV = \frac{\sigma}{X_m} \times 100$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar.

$X_m$  = Valor media.

$$CV = (8.39 / 84.3) \times 100$$

$$CV = 9.9\%$$

Un coeficiente de variación elevado nos indica que hay una alta dispersión de datos de toda la serie de estudio.

### 3.9.2 Análisis estadístico % contenido de fino

Medidas de tendencia central

Tabla 3.58 % Que pasa N ° 200

N °	%Que pasa 200
1	19.8
2	33.4
3	30.2
4	29.6
5	29.9
6	37.4
7	44.6
8	40.3
9	66.7
10	30.1
11	29.5
12	36.3
13	22.4
14	32.7
15	14.9
16	31.4
17	22.1
18	35.1
19	39.6
20	35.6
21	38.2
22	38.5
23	38.2
24	27.7
25	11.5
26	18.3
27	30.3
28	41.2
29	28.8
30	38.6
31	16.8
32	38.3
33	16.5
34	19.0
35	9.5

Fuente: Elaboración propia

**Media aritmética**

$$X = \frac{x_1 + x_2 \dots + x_n}{n}$$

Donde:

$x_1 + x_2 \dots =$  Sumatoria de X.

n = Numero de datos.

$$x = 30,65$$

**Mediana**

$$Me = X_{\frac{n+1}{2}}$$

Donde:

$X_{n+1} =$  Valor de posición.

$$Me = 30.3$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de y el otro 50% están por debajo.

**Medidas de dispersión****Rango**

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

Donde:

$X_{\max} =$  Valor máximo en X.

$X_{\min} =$  Valor mínimo en X.

$$R = 57.2$$

Se puede observar que existe dispersión entre los datos, para que los datos sean más homogéneos los valores extremos deben ser más cercanos entre ellos.

**Desviación media**

$$DM = \frac{\sum |X_j - X_m|}{n}$$

Donde:

$X_m$  = Media aritmética de los datos.

$X_j$  = Variable X.

$n$  = Número de datos.

$$DM = 10.99$$

El valor de 10.99 es un error promedio, este se refiere a la distancia promedio de dato a dato de toda la serie.

**Varianza poblacional**

$$S^2 = \frac{\sum (X_j - X_m)^2}{n}$$

Donde:

$X_m$  = Media aritmética de los datos.

$X_j$  = Variable X.

$n$  = Número de datos.

$$s^2 = 120.8$$

**Varianza muestral**

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_j - X_m)^2}{n-1}$$

Donde:

$X_m$  = Media aritmética de los datos.

$X_j$  = Variable X.

$n-1$  = Valor de posición.

$$\sigma^2 = 124.3$$

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos del CBR.

### **Desviación estándar**

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Donde:

$\sigma^2$  = Varianza muestra.

$$\sigma = \sqrt{(124.33)}$$

$$\sigma = 10.98$$

Por tanto, el error estándar es de 11.15, este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

### **Coefficiente de variación**

$$CV = \frac{\sigma}{X_m} \times 100$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar.

$X_m$  = Valor media.

$$CV = 36.4\%$$

Un coeficiente de variación elevado nos indica que hay una alta dispersión de datos de toda la serie de estudio.

### 3.9.3 Análisis estadístico índice de plasticidad

#### Medidas de tendencia central

Tabla 3.59 Índice de plasticidad

N °	IP
M1	2.5
M2	1.3
M3	1.3
M4	2.4
M5	3.2
M6	4.5
M7	1.0
M8	1.5
M9	3.6
M10	6.9
M11	2.2
M12	2.8
M13	2.2
M14	4.9
M15	1.4
M16	4.6
M17	1.9
M18	1.9
M19	3.2
M20	5.4
M21	5.9
M22	1.2
M23	8.6
M24	1.0
M25	1.2
M26	0.0
M27	8.9
M28	7.2
M29	4.2
M30	1.4
M31	2.8
M32	3.8
M33	14.6
M34	7.1
M35	7.5

Fuente: Elaboración propia

**Media aritmética**

$$X = \frac{X_1 + X_2 \dots + X_n}{n}$$

Donde:

$X_1 + X_2 \dots =$  Sumatoria de X.

n = Numero de datos.

$$x = 3.83$$

**Mediana**

$$Me = \frac{X_{n+1}}{2}$$

Donde:

$X_{n+1} =$  Valor de posición.

$$Me = 2.8$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de y el otro 50% están por debajo.

**Medidas de dispersión****Rango**

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

Donde:

$X_{\max} =$  Valor máximo en X.

$X_{\min} =$  Valor mínimo en X.

$$R = 14.6$$

Se puede observar que existe dispersión entre los datos, para que los datos sean más homogéneos los valores extremos deben ser más cercanos entre ellos.

**Desviación media**

$$DM = \frac{\sum |X_j - X_m|}{n}$$

Donde:

$X_m =$  Media aritmética de los datos.

$X_j$  = Variable X.

n = Número de datos.

$$DM = 3.4$$

El valor de 3.37 es un error promedio, este se refiere a la distancia promedio de dato a dato de toda la serie.

### **Varianza poblacional**

$$s^2 = \frac{\sum (X_j - X_m)^2}{n}$$

Donde:

$X_m$  = Media aritmética de los datos.

$X_j$  = Variable X.

n = Número de datos.

$$s^2 = 11.3$$

### **Varianza muestral**

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_j - X_m)^2}{n-1}$$

Donde:

$X_m$  = Media aritmética de los datos.

$X_j$  = Variable X.

n-1 = Valor de posición.

$$\sigma^2 = 9.2$$

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos del CBR.

**Desviación estándar**

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Donde:

$\sigma^2$  = Varianza muestra.

$$\sigma = 3.0$$

Por tanto, el error estándar es de 3.42, este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

**Coefficiente de variación**

$$CV = \frac{\sigma}{X_m} \times 100$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar.

$X_m$  = Valor media.

$$CV = 79.9\%$$

Un coeficiente de variación elevado nos indica que hay una alta dispersión de datos de toda la serie de estudio.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

- En la presente investigación se han cumplido los objetivos planteados debido a que se logró obtener el porcentaje óptimo de cemento y del material desechable (RAP), demostrando que la mezcla de suelo -RAP -cemento, es una opción que permita la reutilización de pavimento asfáltico reciclado dando como resultado propiedades para la capa base.
- Es importante resaltar que las dos dosificaciones de suelo cemento que se realizó, que mejoró las características de CBR se optó por tomar un 7 % por que cumplía con las especificaciones técnicas para una capa base.
- El autor realizo tres mezclas diferentes en la adicción de RAP en porcentajes de 10 ,20 ,30 % intentando agregar el material desecho y observar si varia en la resistencia del CBR, donde si mejoro en 2 mezclas con CBR de 93.6 % a un 10 % y 82.1 % a un 20 % del material desechado.
- En este estudio se pudo determinar el porcentaje óptimo de material descartado (RAP) en un 25% del material desechado y con la adición de 7% de cemento, cumpliendo con las especificaciones técnicas para una capa base.
- Es notable resaltar que los porcentajes agregados de material de desecho de RAP no deben ser superiores al 30% si queremos utilizar como capa base
- Es conveniente decir que la caracterización del suelo del tramo estudiado, como también los del cemento y del material desechado (RAP), son fundamentales ya que su cumplimiento nos da la garantía de la que la mezcla tenga buenas características.
- En el análisis de la mezcla se realizaron algunas evaluaciones donde lo que más se destacó fue la granulometría donde cambió su banda granulométrica y en el desgaste dando mayor resistencia.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- En lo posterior se recomienda hacer un estudio con porcentajes de material desechado (RAP), para capa sub -rasantes.
- Se recomienda tener en cuenta las características mínimas de limite liquido como índice de plasticidad para análisis de mezclas suelo – cemento.
- Se recomienda para las lecturas en la prensa del CBR ,utilizar dos personas para el lecturamiento