

## **1.1.INTRODUCCIÓN.**

Existen diferentes factores que inciden en la degradación de agregados pétreos durante la vida útil de los pavimentos y conllevan a cambios en los parámetros de respuesta mecánica como deformabilidad, rigidez (módulo resiliente) y permeabilidad. Estos factores pueden ser geológicos los cuales están relacionados con el proceso de formación de las rocas que dan origen a los agregados; asociados al proceso de producción ya que actividades como voladura, extracción y trituración pueden generar un debilitamiento de los materiales; y relacionados, entre otros, con procesos de intemperismo que conducen a la reducción de fricción interna entre las partículas del material y aumento del contenido de finos.

Adicionalmente, mediante procesos de compactación donde se aumenta mecánicamente, por presión estática, amasado, impacto, y/o vibración, la densidad de los materiales mediante la reducción del volumen de aire existente entre sus partículas los materiales compactados pueden soportar altos esfuerzos sin sufrir deformación excesiva (flexión y/o desplazamiento). Sin embargo, en la compactación se aplican altos niveles de esfuerzo que pueden causar producción de finos, rotura de las partículas de agregado, pulimento de asperezas, entre otros y los efectos se agudizan al repetirse el proceso (recompactación), lo cual puede conducir a disminuciones significativas de desempeño en los materiales. No obstante, a la fecha se reporta un número limitado de estudios relacionados con la cuantificación de la pérdida de respuesta mecánica de los materiales granulares de pavimentación sometidos a procesos de compactación y de recompactación.

La rotura de partículas de agregado y el consecuente cambio en la granulometría de los materiales granulares puede conllevar a la falla prematura de las estructuras de pavimento. El fenómeno de la degradación de los agregados empleados en construcción vial ha sido estudiado, pero se han reportado pocos adelantos. En evaluaciones realizadas en materiales empleados en estructuras de pavimentos en servicio, se ha reportado degradación de los materiales granulares (trituración), aunque no se encontraron efectos severos. En este contexto, es importante la realización de

estudios que permitan seguir indagando sobre la susceptibilidad de los materiales granulares a procesos de degradación por compactación y carga repetida y como se afecta la respuesta mecánica de los mismos, ya que estos cambios influyen en el diseño estructural de los pavimentos. El presente documento pretende mostrar los efectos que tiene la recompactación de materiales granulares, tipo sub-base, utilizados en estructuras de pavimento. Para tal fin, se analiza cómo incide la recompactación tanto en las características físicas (granulometría del material) como en la respuesta mecánica (CBR).

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

En el medio que vivimos las carreteras en un bien necesario, un bien de los que conciben, proyectan construyen, conservan y explotan cuya satisfacción un trabajo bien realizado, es por eso que cada vez se tienden a mejorar sus características.

Por esta situación se generó la necesidad de hacer un estudio que contemple todos los ensayos de granulometría, compactación y la respuesta mecánica establecidos de la recompactación y no se mide nada, solo el proceso de recompactación es un proceso de ejecución de obra porque en laboratorio no se procede hacer recompactación solo se hace en un proceso de ejecución de la obra.

Hoy en día seguimos con la problemática; que nuestro material suelto puesto en obra designado para las ultimas capas como la sub-base y base nadie sea puesto analizar qué efectos tendrá la recompactación ya no se hace ensayos después de realizar la recompactación, todos los ensayos que se hacen están pensados para la compactación se saca la densidad se comprueba y se determina el grado de compactación.

Es impredecible que el avance de la ingeniería civil ha ido desarrollando métodos que nos permiten analizar primero si las partículas en la curva granulométrica de entrada que ha tenido un efecto por la recompactación y segundo que las propiedades mecánicas en las capas granulares debe ser el esqueleto de cualquier suelo si va a resistir las cargas de las propiedades mecánicas.

Es por esto que en este trabajo se realizara comparaciones con ensayos establecidos en el diseño teórico metodológico de la investigación, de tal manera prevenir los problemas presente para obtener buenas explicaciones basado en lo técnico y económico porque como ingenieros estamos comprometidos minimizar costos y optimizar tiempos sin perder la calidad.

### **1.3. DISEÑO TEORICO**

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

##### **1.3.1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

Estos problemas se presentan ya que durante el diseño del pavimento no se toma mucho en cuenta el análisis de los factores que intervienen en el diseño del pavimentos es la recompactación sobre la granulometría de la sub-base, ya que estos actúan en el comportamiento mecánico de dicha estructura.

La recompactación produce un cambio estructural que los hace inadecuados. La sobre compactación rompen los fragmentos porosos, produciendo una granulometría mucho más variada y abundante deformación de las partículas, todo lo cual puede hacer llegar al material frecuentemente compactado a peso volumétrico más alto que los cualquier material convencional que se hubiera usado, haciendo perder por completo la ventaja de su utilización.

El material de la sub-base si se compactan con un contenido de agua apropiado y solo hasta un límite justo, las expansiones se podrán reducir al mínimo; para tal fin, el requisito de compactación en general no tendrá nada que ver con el peso volumétrico seco máximo o la humedad óptima de cualquier prueba de laboratorio que se use como prueba de control.

Uno de los problemas es el paso de cargas de movimientos este efecto, que conduce a la destrucción rápida de un pavimento, es más notable cuando el suelo es compactado más allá de lo limite.

La compactación representa uno de los aspectos cruciales para cualquier pavimento flexible y en el caso de pavimentos de adoquines prefabricados de hormigón, una

compactación inadecuada es causa del fallo del pavimento. Por esta razón, la compactación se continuará hasta que la densidad sea como mínimo mayor o igual a la que corresponda al 95% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado. La superficie acabada no deberá rebasar a la establecida teóricamente en ningún punto, ni diferir de ella en más de 1/5 del espesor previsto en los planos, para la sub base granular.

La sobre compactación inciden en la resistencia a la degradación de los materiales granulares que se ven afectados y la durabilidad de los agregados empleados en estructuras de pavimentos. En este contexto, es importante la realización de estudios que permitan seguir indagando sobre la susceptibilidad de los materiales granulares a procesos de degradación por compactación y carga repetida y como se afecta la respuesta mecánica de los mismos, ya que estos cambios influyen en el diseño estructural de los pavimentos.

Bajo estas perspectivas se planteó realizar un análisis de recompactación sobre la granulometría de la sub-base se hará una evaluación cómo incide la recompactación tanto en las características físicas (granulometría del material) como en la respuesta mecánica (C.B.R).

### **1.3.1.2. PROBLEMA**

¿Será que a partir de los ensayos tanto como granulometría y C.B.R. puedo evaluar el efecto que tiene la recompactación en los materiales de la sub-base de la capas granulares de un pavimento?

## **1.3.2. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

### **1.3.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar los efectos que tiene la recompactación de materiales granulares, tipo sub-base, utilizados en estructuras de pavimento, analizando cómo incide tanto en las características físicas como en la respuesta mecánica.

### **1.3.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

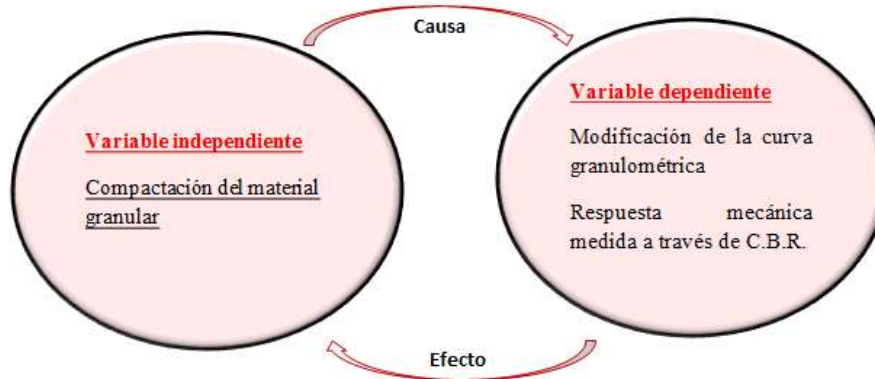
- Desarrollar las características y propiedades de los materiales granulares de la capa sub-base del pavimento.
- Tomar muestras de bancos de material sub-base granular.
- Evaluar las curvas granulométricas de los materiales recompactados de las muestras de estudio.
- Evaluar las condiciones mecánicas a través del ensayo de C.B.R. de los materiales recompactados y su granulometría.
- Analizar los resultados obtenidos del estudio de las curvas granulométricas, C.B.R en la evaluación de la calidad de sub- bases granulares.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones a partir del análisis de resultado.

### **1.3.3. HIPÓTESIS**

Si los materiales de la capa de sub-base de los pavimentos son sometidos a recompactación entonces el material tendrá un efecto en su granulometría que puede modificar su respuesta mecánica y sus propiedades.

### **1.3.4. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES**

La selección de las variables independientes y dependientes, producto de acuerdo a la hipótesis y el objetivo planteado realizado en el trabajo de investigación llegando a ser las siguientes:



### 1.3.5. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance general del proyecto de investigación que propone analizar un análisis mecánico del material de la sub base, haciéndose la granulometría y compactación e identificación y caracterización abocándose a un proceso físico- mecánico con el fin de obtener una metodología para realizar una respuesta mecánica de la sub base granular requerida por la especificaciones técnicas de la carretera.

Se planteara la problemática que motiva el inicio de esta investigación de la re compactación, proponiendo el objetivo y su alcance, así como el análisis estadístico , se conocerá todos los problemas que es generado por la mala compactación del material que pasa en el tiempo transcurrido y aun en la actualidad se sigue dando este problema. Por lo cual se planteara un estudio a un punto en conclusión seguido por respaldo que ayuden con la investigación del estudio.

Se definirá los conceptos que se usaran en el transcurso de la investigación para así crear cimientos de conocimiento facilitando a proseguir con el estudio ya planteado. El marco conceptual, estará solamente basado en aquellos que tienen relación con el objeto de estudio y de que alguna manera produce variables importantes para esta investigación.

Se realizará trabajos de verificación mecánica con respectivos ensayos de C.B.R., compresión simple y granulometría de cada de los diferentes tipos de sub base granular, para así llegar a una evaluación a la conclusión de la investigación.

Este trabajo, debe estar enfocado a la comprobación neta experimental, comenzado desde la caracterización de los materiales hasta la verificación mecánica mediante los ensayos de C.B.R., Compresión Simple y granulometría que proporcionen los resultados buscados.

Es importante resaltar que el resultado del análisis será válido mediante un tratamiento estadístico, que brinde la confiabilidad de los mismos. Además se tendrá en cuenta la relación que existe entre los estudios de los materiales y la producción en gran escala de las obras.

#### **1.4. DISEÑO METODOLÓGICO**

La metodología que se usara para realizar el proyecto “ Evaluación del efecto de los procesos de recompactación sobre la granulometría y la respuesta mecánica ” será realizado por el método estandarizado Proctor modificado ASTM D-422 AASHTO T-180 y C.B.R. ASTM D-1883 AASHTO T-193 cumpliendo de esta forma las recomendaciones, especificaciones técnicas, y normas que establecen estos métodos en la ABC, de esta forma nos referimos a los parámetro y/o condiciones para dar respuesta al uso del tamaño del agregado de la sub-base a utilizar para la caracterización y posteriormente solo aremos variar la energía en la compactación y el C.B.R.

##### **1.4.1. UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MAESTRAL.**

###### **1.4.1.1. UNIDAD DE ESTUDIO.**

- Los materiales granulares de la capa sub-base.

#### **1.4.1.2. POBLACIÓN.**

- Materiales granulares que tiene las especificaciones de la sub-base en la región de Tarija.

#### **1.4.1.3. MUESTRA.**

- Materiales de la capa sub base granular.

#### **1.4.1.4. MUESTREO**

Es un suelo Aluvial de la sub-base granular.

Los materiales “capa sub- base” extraídas de los caminos en pavimentación de estudio de la región de Tarija serán muestras representativas, y mediante cuarteo se obtendrá la cantidad de material especificada por cada ensayo de laboratorio. Se extraerá 3 tipos de material de capa sub base granular de la región de Tarija que son:

- Empresa Erica.
- Alcaldía municipal.
- Sedeca.

Para la evaluación de la respuesta mecánica se realizara en laboratorio la medición de CBR, granulometría.

#### **1.4.1.5. PROCESO Y MEDIOS**

Los datos para la recompactación de la sub-base se realizaran de acuerdo a las normas ASTM, AASHTO y ABC.

La información se tomara de los ensayos realizados en laboratorios para:

##### **1.4.1.5.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL**

- **S0302.** Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 AASHTO T88).
- **A0511.** Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM E 131 AASHTON T96-99).
- **S0304.** Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89).



- **S0305.** Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D 4318 AASHTO T89).
- **S0308.** Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D2419).

#### **1.4.1.5.2. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA MECÁNICA**

- **S0403.** Relación del peso unitario-humedad en los suelos-método modificado (ASTM D422 AASHT T-180).
- **S0404.** Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio (C.B.R de laboratorio) (ASTM D1883 AASTHTO T-193).

#### **1.4.4. PREPARACIÓN PREVIA.**

Dentro de la preparación previa a los ensayos, es necesario contar con tablas que permitan la tabulación de datos, donde especifique el lugar de obtención, el tipo de muestra, el ensayo a realizar, la numeración respectiva y los datos que se van a necesitar para cada tipo de ensayo.

Junto con lo anterior debe ir un cronograma de actividades para que permita el fácil desarrollo de las actividades.

## **CAPÍTULO II CARACTERIZACIÓN DE LA SUB-BASE EN PAVIMENTO FLEXIBLE**

### **2.1. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO**

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas producidas por el tránsito y las transmiten a los extractos inferiores de manera distribuida, proporcionando una superficie de rodamiento que debe trabajar eficazmente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazado horizontal y vertical, resistencia que controle las cargas para evitar el agrietamiento, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los efectos abrasivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

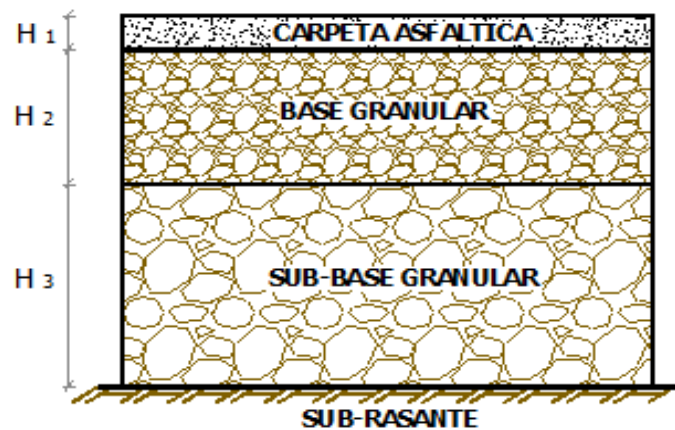
Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberá colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías; además, que son los materiales que más comúnmente se encuentra en la naturaleza y consecuentemente más económicos. La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, cuando se determina el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas dependerá del material que la constituya y el procedimiento constructivo; dos factores importantes son la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas de tráfico, produciendo deformaciones permanentes.

Un pavimento, se define como una estructura vial, formada por una o varias capas de material seleccionado, el cual se construye sobre la sub rasante, y se debe caracterizar por:

- Resistir las cargas impuestas por el tránsito vehicular.

- soportar la acción del medio ambiente.
- Transmitir al suelo de fundación, esfuerzos y deformaciones tolerables.
- Proporcionar la circulación de los vehículos con rapidez, comodidad, economía y seguridad; lo cual conlleva a que sea una estructura durable y además, que presente una textura adecuada para el tráfico.

**Figura 1. Capas que componen un pavimento flexible.**



*Fuente:* Urbanismo/Pavimento flexible.

- **Capa sub-rasante.-** Es una capa que tiene mayor capacidad portante que el suelo de fundación. Esta se coloca con la finalidad de reducir los espesores de las capas del pavimento.
- **Capa Sub-base.-** Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento de tal manera que la capa de la sub-rasante la puede soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puede afectar a la sub-base.  
El material de la sub-base deberá seleccionado y tener mayor valor soporte (C.B.R) que el material de sub-rasante y su espesor será variable por tramos, dependiendo de las condiciones y características de los suelos existentes en la sub-rasante.
- **Capa base.-** Son las capas de espesor establecido, diseñado sobre la sub-base o sub-rasante mejorada para sostener la superficie o carpeta de rodadura.

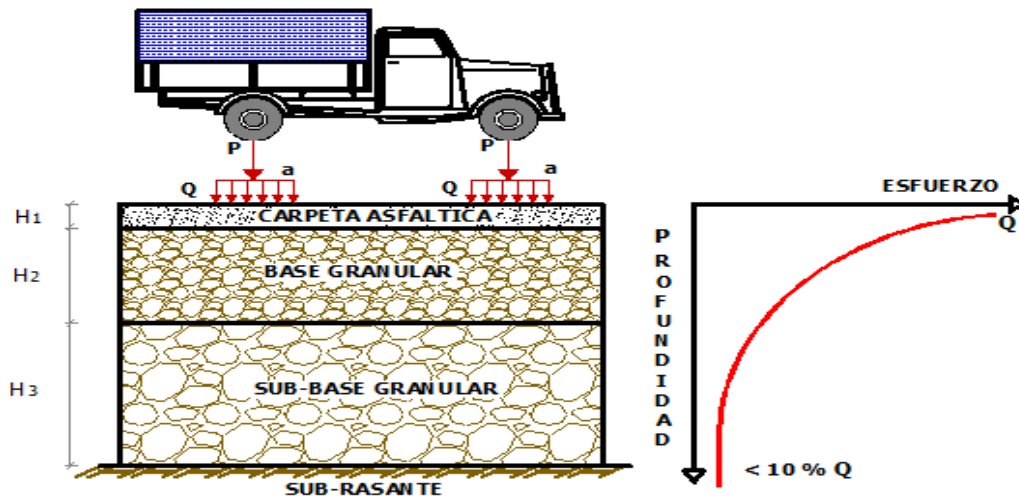
### **2.1.1. PAVIMENTO FLEXIBLE**

El pavimento flexible resulta más económico en su construcción inicial, pero tiene la desventaja de requerir mantenimiento constante. Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base

Caracterizado por tener en la parte superior, una capa bituminosa, apoyada sobre una o varias capas de gran flexibilidad (base granular y sub base granular), las cuales transmiten los esfuerzos al terreno de soporte, mediante un mecanismo de dispersión de tensiones, presiones que va disminuyendo en su magnitud, con la profundidad. Este tipo de pavimento, presenta las siguientes particularidades:

- Las capas granulares, se colocan para disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.
- Se considera que los esfuerzos se han disipado, cuando el esfuerzo en un punto cualquiera, es menor que el 10% de la presión de contacto.
- En pavimentos flexibles, apoyados sobre sub- rasante fina, por ningún motivo, se debe omitir la sub-base granular.
- Las magnitudes normales de los módulos de las capas de esta clase de estructura, están alrededor de :
  - Carpeta asfáltica: 25000 kg/cm<sup>2</sup>
  - Base granular: 2000 kg/cm<sup>2</sup> a 5000 kg/cm<sup>2</sup>
  - Sub-base granular: 1000 kg/cm<sup>2</sup> a 3000 kg/cm<sup>2</sup>

***Figura2. Mecanismo de disipación de tensiones en Pavimentos Flexibles***



Fuente: Urbanismo/Pavimento flexible.

## 2.1.2. FUNCIONES DE LAS CAPAS DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

### Sub-base granular

- Economía con respecto a la base y al concreto asfáltico.
- Transición entre materiales de distinta calidad.
- Control de deformaciones, absorbiendo los cambios volumétricos de la sub-rasante.
- Debido a su distribución granulométrica, sirve para romper la capilaridad ayudando a mantener un buen drenaje en la estructura.
- Presenta muy poco aporte estructural, debido a las características de forma, textura y gradación de sus partículas.

### Base granular

- Es de gran aporte estructural, debido a las características de gradación y trituración de sus partículas (finos no plásticos).
- Economía con respecto a la carpeta asfáltica.
- Buen drenaje, debido a que presenta pocos finos.
- Sirve como rodadura provisional.

### Riego de imprimación

- Adherir la base granular a la carpeta asfáltica.
- Impermeabilizar la interface entre la carpeta asfáltica y la base granular.

### Carpeta asfáltica

- Da la resistencia a la tracción en la estructura.
- Al ser “impermeable”, evita que el agua ingrese a la estructura del pavimento, junto con el bombeo y el peralte de la calzada.
- Proporciona una superficie uniforme, estable y segura al tránsito (concepción del usuario); se controla con el I.R.I.

### **2.1.3. CAPA SUB-BASE**

La sub base puede tener un espesor compactado variable por tramos, según las condiciones y características de los suelos existentes en la sub rasante, pero en ningún caso dicho espesor debe ser menor de 10 centímetros ni mayor de 70 centímetros.

Es una capa de material seleccionado en la estructura del pavimento que se coloca sobre la sub- rasante o nivel de cimentación de la estructura vial. La necesidad de colocar una sub-base está orientada por las siguientes reglas:

- Disminuir el espesor de la capa sub-base que se requiera un diseño, remplazando parte del material de base por uno de inferiores características, el cual viene a formar la capa de la sub-base con un menor costo.
- Servir de esfuerzo o defensa a la sub-rasante impidiendo su deterioro, especialmente cuando esta vaya a estar sometida a la acción del tráfico por un periodo más o menos largo. Puede emplearse además, para mejorar las condiciones de drenaje de la sub-base y también para impedir que la base sea afectada por la plasticidad, elasticidad y cambios volumétricos de los suelos de la sub- rasante.
- El material de la sub-base, debe ser seleccionado y tener mayor capacidad soporte que el terreno de fundación compactado; este material puede ser: arena, grava, granzón, escoria de los altos hornos, o estériles de la explotación de las canteras, en algunos casos, es posible emplear para sub-base el material de la sub-rasante mezclado con granzón, cemento, etc.
- El material ha de tener las características de un suelo A1 o A2 aproximadamente. Por lo general se exige compactaciones del 95% del Proctor modificado. Su límite líquida debe ser inferior al 35 y su índice plástico no mayor a 8. El CBR no podrá bajar del 40%.

- Si la función principal de la sub-base es de servir de capa de drenaje, el material a emplearse debe ser granular y la cantidad de material fino que pase No 200 no deberá ser mayor al 8%.

## **2.2. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA SUB BASE**

En la construcción de las vías terrestres es indispensable la aplicación de los principios de la mecánica de suelos ya que en la investigación de las propiedades y características de los suelos, no puede ser ajena a ninguna de las etapas de su proyecto.

En la construcción de carreteras para economizar los recursos es esencial proyectar basándose en el conocimiento y las propiedades y características de los suelos encontrados en el lugar donde esta se construirá. Las propiedades de los suelos, determinaran en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta. La condición física de un suelo, determina la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la capacidad de drenaje, absorción de agua y la resistencia mecánica que está relacionado con algunas propiedades de los áridos que lo caracteriza.

### **2.2.1. TAMAÑO DE SUS PARTÍCULAS**

El tamaño de sus partículas depende de la clase de minerales que tiene un suelo. Como el tamaño de las partículas es a primera característica que se observa a la menos difícil de medir, la mayor parte de las nomenclaturas de suelos se basa en ellos.

**GRAVA.-** Son partículas rocosas con diámetro mayor a 2mm los granos no se apelmazan aunque estén húmedos, debido a las pequeñas tensiones capilares; cuando el gradiente hidráulico es menor a 1, entonces se produce en ellas el flujo turbulento sus partículas son visibles en general no son plásticas.

**ARENAS.-** Partículas rocosas con diámetro en 2 y 0,06 mm son granos se apelmazan si están húmedos en este tipo de material no se produce el flujo turbulento. Cuando estas secos tienen una ligera cohesión pero se reduce a polvo fácilmente entre los dedos y son fácilmente erosiónales por el viento.

**LIMOS.-** Con tamaño de partículas en 0,06 y 0.02 mm son partículas invisibles y algo plásticas, los terrones secos tienen cohesión apreciable pero se reducen a polvo con los dedos, son difícilmente erosionados por el viento, no tienen propiedades coloidales, su tacto es áspero secándose con relativa rapidez y no se pegan en los dedos.

**ARCILLAS.-** con tamaños de partículas menores a 0,002 estos suelos finos tienen propiedades coloidales en su mayor parte son de minerales arcillosos, su tacto es suave secándose lentamente y se pegan a los dedos, presentan una alta resistencia cuando secos pero no se pueden reducir a polvo con los dedos.

Clasificación de los suelos, A-1-a (0) AASHTO; GM (SUCS)

## **2.2.2. MÉTODO GRANULOMETRICO**

### **2.2.2.1. CLASIFICACIÓN DE SUELOS**

El sistema de clasificación AASHTO (American Association of State, Highway and Transportation Officials) (Designación ASTM D-3282; método AASHTO M145) es uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos, desarrollado por Terzaghi y Hogentogler en 1928. Este sistema pasó por varias revisiones y actualmente es usado para propósitos ingenieriles enfocados más en el campo de las carreteras como la construcción de los terraplenes, subrasantes, sub-bases y bases de las carreteras. Sin embargo es necesario recordar que un suelo que es bueno para el uso de subrasantes de carreteras puede ser muy pobre para otros propósitos. Este sistema de clasificación está basado en los resultados de la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el límite plástico.

La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un índice de grupo, que es un valor calculado a partir de una ecuación empírica. El comportamiento geotécnico de un suelo varía inversamente con su índice de grupo, es decir que un suelo con índice de grupo igual a cero indica que es material “bueno” para la construcción de carreteras, y un índice de grupo igual a 20 o mayor, indica un material “muy malo” para la construcción de carreteras.

Esta clasificación diferencia a los suelos desde un suelo tipo A-1 y uno A-7, considerando que un suelos A-1 será un material granular, es decir de grano grueso en un mayor porcentaje y con poco material fino, esta desigualdad se ira igualando hasta llegar a un suelo A-7, es decir, que a medida que un suelo disminuya su material granular y aumente su material fino, este bajara su clasificación a ser un suelo A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7 respectivamente.



### 2.2.2.2. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO

De acuerdo con éste sistema de clasificación, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7.

Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la malla No. 200.

Los suelos de los que más del 35% pasan por la criba No. 200 son clasificados en los grupos A4, A-5, A-6 Y A-7. La mayoría están formados por materiales tipo limo y arcilla.

El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

#### Tamaño del grano:

**Grava:** fracción que pasa la malla de 75 mm y es retenida en la malla No. 10 (2 mm)

**Arena:** fracción que pasa la malla No. 10 (2 mm) y es retenida en la malla No. 200 (0.075 mm)

**Limo y arcilla:** fracción que pasa la malla No. 200

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

Si cantos rodados y *boleas* (tamaños mayores que 75 mm) están presentes, éstos se excluyen de la porción de la muestra de suelo que se está clasificando. Sin embargo, el porcentaje de tal material se registra.

**Tabla 1. Clasificación para suelos granulares mediante el sistema AASHTO.**

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra que pasa la malla No. 200)						
	A-1		A-3	A-2			
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por cribado (porcentaje que pasa las mallas)							
No. 10	50 máx.		51 mín.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
No. 40	30 máx.	50 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
No. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción que pasa la malla No. 40							
Límite líquido			40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos							
	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Tasa general de los subrasantes			De excelente a bueno				

Fuente: AASHTO.

**Tabla 2. Clasificación para suelos finos mediante el sistema AASHTO.**

Clasificación general	Materiales limo-arcilla (más del 35% de la muestra que pasa la malla No. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†
Clasificación de grupo				
Análisis por cribado (porcentaje que pasa por las mallas)				
No. 10				
No. 40				
No. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción que pasa por la malla No. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Tasa general de los sobrantes	De mediano a pobre			
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$				
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$				

Fuente: AASHTO.

Para clasificar un suelo de acuerdo con las anteriores tablas, los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por un proceso de eliminación, el primer grupo desde la izquierda en el que los datos de prueba se ajusten, es la clasificación correcta.

**ÍNDICE DE GRUPO.-** Para la evaluación de la calidad de un suelo como material para subrasante de carreteras, se incorpora también un número llamado *índice de grupo (GI)* junto con los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe en paréntesis después de la designación de grupo o de sub grupo.

El índice de grupo está dado por la ecuación:

$$GI = (F - 35) [0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01 (F - 15) (PI - 10)$$

Donde:

$F$  = por ciento que pasa la malla No. 200

$LL$  = límite líquido

$P$  = índice de plasticidad

El primer término de la ecuación anterior, es decir,  $(F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)]$ , es el índice de grupo parcial determinado a partir del límite líquido.

El segundo término, es decir  $0, 01(F - 15)* (PI - 10)$ , es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad.

**A continuación se dan algunas reglas para determinar el índice de grupo:**

1. Si la ecuación (2.30) da un valor negativo para  $GI$ , éste se toma igual a 0.

2. El índice de grupo calculado se redondea al número entero más cercano  
(Por ejemplo,  $GI = 3.4$  se redondea a 3;  $GI = 3.5$  se redondea a 4).
3. No hay un límite superior para el índice de grupo.
4. El índice de grupo de suelos que pertenecen a los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, Y A-3 siempre es 0.
5. Al calcular el índice de grupo para suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, use el índice de grupo parcial para  $PI$ , o  $GI = 0.01 (F - 15) (PI - 10)$

En general, la calidad del comportamiento de un suelo como material para subrasantes es inversamente proporcional al índice de grupo.

### 2.2.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS CLASIFICADOS SEGÚN EL SISTEMA AASHTO

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

#### ➤ GRUPO A-1

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

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

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

#### ➤ GRUPO A-2:

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

**Subgrupo A-2-4 y A-2-5:** El contenido de material fino es menor o igual al 35%, la fracción que pasa el tamiz N°40, se comporta igual a los grupos A-4 y A-5 respectivamente.

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

**Subgrupo A-2-6 y A-2-7:** La única diferencia de los anteriores, es que la fracción que pasa el tamiz N°40, se comporta en plasticidad igual a los grupos A-5 y A-7.

#### ➤ GRUPO A-3

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

➤ **GRUPO A-4**

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

➤ **GRUPO A-5**

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

➤ **GRUPO A-6**

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

➤ **GRUPO A-7**

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

**Subgrupo A-7-5** Sus índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

**Subgrupo A-7-6** Sus índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos, además presentan grandes cambios de volumen entre sus estados seco y húmedo

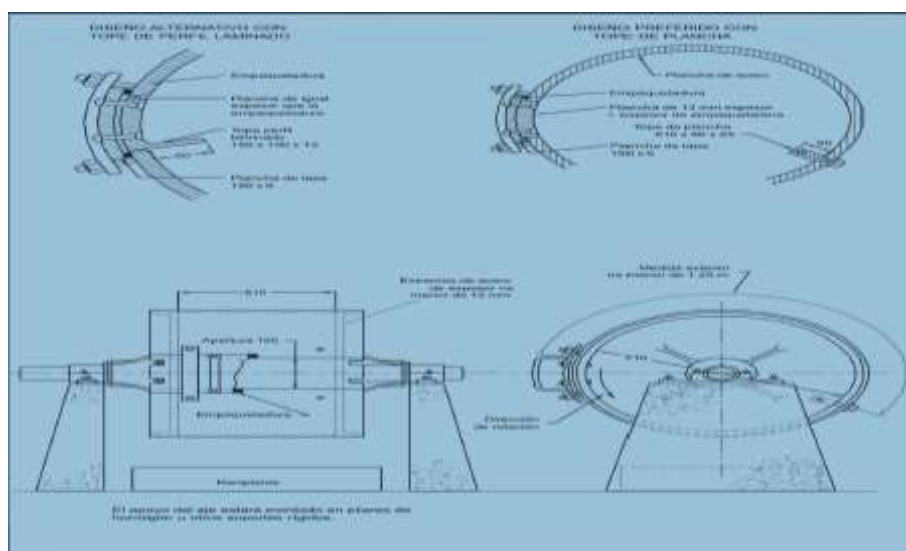
### **2.2.3. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA MECANICA DE LOS ARIDOS**

Es un aspecto fundamental a la hora de evaluar la validez de un árido para su empleo en pavimentos, es determinar su comportamiento mecánico en las condiciones reales de funcionamiento de la vía. Para evaluar dicho comportamiento, así como la degradación de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo, existen una serie de ensayos que, si bien logran determinar las propiedades mecánicas de dicho árido de forma aislada en el conjunto del pavimento. Los ensayos más empleados en carreteras son el de descaste de los Ángeles

Este ensayo trata de medir la pérdida de masa que sufre un árido al someterse a un proceso continuado de desgaste. Se fundamenta en someter una determinada cantidad de muestras- previa mente lavada y convenientemente separada en granulometrías

indistintas a la acción de la máquina de los ángeles compuesta por un cilindro hueco de acero atravesado longitudinalmente por un eje en su parte central que posibilita su giro. En ella se introduce tanto la muestra de áridos como una carga abrasiva, compuesta por un número variable de esferas de acero macizo en función de la granulometría ensayada. Dando entre 500 vueltas, según la granulometría del árido.

**Figura 3. Máquina de los Ángeles**



*Fuente:* Norma Administración Boliviana de Carretera (ABC)

Estandarizado por la ASTM C-131

Su objetivo es analizar el desgaste del agregado grueso menor a 1 ½ pulg. (37,5mm). El ensayo mide la degradación de los agregados resultante de la combinación de varias acciones como ser abrasión, impacto y fricción de las esferas dentro de la máquina de los ángeles el número de esferas varía según la gradación del material a ser ensayado. Nos brinda un indicador de calidad de los agregados.

El coeficiente de desgaste de los ángeles vendrá dado por la relación entre la masa perdida – diferencia entre inicial y final – y el peso inicial de la muestra de árido, expresado por lo tanto por cien.

#### **2.2.4. ESTADO DE CONSISTENCIA**

Como se dijo en la presentación, el comportamiento de un suelo está muy influenciado por la presencia de agua en su seno. Este hecho se acentúa cuanto menor es el tamaño de las partículas que componen dicho suelo, siendo especialmente relevante en aquellos

donde predomine el componente arcilloso, ya que en ellos los fenómenos de interacción superficial se imponen a los de tipo gravitatorio.

Por ello, resulta muy útil estudiar los límites entre los diversos estados de consistencia que pueden darse en los suelos coherentes en función de un grado de humedad: límite líquido, límite plástico, semisólidos y sólidos.

**Límite líquido.-** Es la humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y debida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya entre en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

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

**Semisólidos y sólidos.-** Es el contenido de humedad (%), cuando alcanza su volumen mínimo teórico al secarse viniendo de la saturación.

#### **2.2.4.1. MÉTODOS DE ENSAYO DE ATTERBERG**

Atterberg fue el primero que relacionó el grado de plasticidad de los suelos con su contenido en agua o humedad, expresado en función del peso seco de la muestra.

También fue el que definió los cuatro estados de consistencia de los suelos vistos anteriormente y determinó los límites entre ellos, observando, la variación de diferentes propiedades físicas y mecánicas.

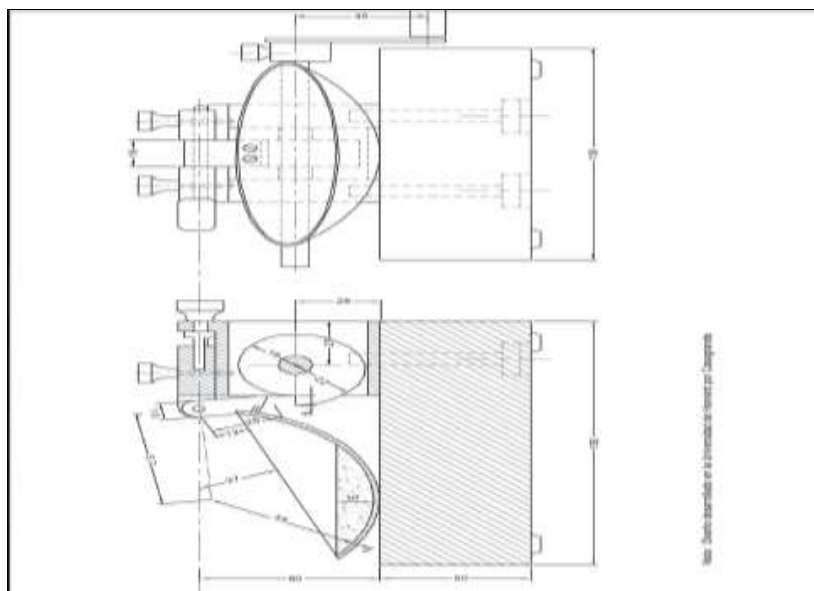
De los límites anteriormente mencionados, interesa especialmente la determinación de los umbrales de los estados líquidos (límite líquido) y plástico (límite plástico) ya que estos presentan una alta deformabilidad del suelo y una drástica reducción de su capacidad portante. Afinando más todavía, el interés se centra en determinar el intervalo de la humedad para el cual el suelo se comporte de manera plástica, es decir, su plasticidad.

#### **El límite líquido se determina mediante el método de la cuchara de Casagrande**

El ensayo se basa en determinar de la cantidad de agua mínima que puede contener una muestra formada por 100 gr. de suelo seco que haya pasado por el tamiz No 40. Para ello, se

coloca sobre el mencionado artefacto y se acciona el mecanismo de este, contándose el número de golpes necesario para cerrar un surco realizado previamente con una espátula normalizada en una longitud de 13mm. el ensayo se dará por valido cuando se obtenga dos determinaciones, una de 15 y 25 golpes, y otra de entre 25 y 35 golpes. La humedad correspondiente al límite líquido será la correspondiente a 25 golpes y se determinara interpolando en la gráfica normalizada las dos determinaciones obtenidas experimentalmente.

**Figura 4. Aparato de límite líquido**



*Fuente:* Norma Administradora Boliviana de Carretera (ABC)

### **Límite plástico**

Se define como la menor humedad de un suelo que permite realizar con el cilindro de 3 mm de diámetro sin que se desmoronen, realizándose dos determinaciones y hallando la media. Este ensayo se realiza con 200 g. de muestra seca y filtrada a través del tamiz 40, como en el caso anterior.

A la diferencia entre ambos límites se denomina índice de plasticidad (IP), y da una idea del grado de plasticidad que presenta el suelo; un suelo muy plástico tendrá un alto índice de plasticidad

$$IP = LL - LP$$

### **2.2.5. ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA**

El ensayo de equivalente de arena permite una rápida determinación del contenido en finos de un suelo, dándonos además una idea de su plasticidad.

Para realizarlo, se separa la fricción arenosa del suelo mediante el tamiz de 5 mm de la serie UNE (# 4 de la serie ASTM) y se introduce un volumen 90 cm<sup>3</sup> de la misma en una probeta cilíndrica de 32 mm, de diámetro y 430 mm de longitud, graduada de 2 en 2 mm. A continuación se introducirá una espesa disolución de trabajo formada por cloruro de cálcico, glicerina y formaldehído diluido en agua destilada, dejando reposar la mezcla durante 10 minutos. Seguidamente, el conjunto se agitará de forma normalizada -90 ciclos en 30 segundos, con un recorrido de unos 20 cm, para conseguir la mezcla íntima. Posteriormente, se dejará reposar durante un tiempo de 20 minutos.

Una vez transcurrido este tiempo, se podría observar mediante simple contacto visual la existencia de dos horizontes, uno de ellos correspondientes a la fricción arenosa del suelo y otro por encima del anterior, relativo a la proporción de finos existentes en la muestra.

El equivalente de arena del suelo vendrá dado por la siguiente expresión:

$$EA = \frac{A}{A + B} * 100$$

Donde:

A: la lectura sobre la probeta del horizonte de arena.

B: la lectura referente al horizonte de finos.

Este ensayo tiene la ventaja de que es más rápido que el anterior y ofrece resultados similares aunque incomprensiblemente menos precisos, por lo menos a tenor del subjetivo procedimiento de ensayo empleado en aquel.



### 2.2.6. CARACTERISTICAS DE LA SUB-BASE

- Valor soporte. El material debe tener un CBR, AASHTO T193, mínimo de 40 según la norma ABC, efectuando sobre la muestra saturada a 100% de compactación, AASHTO T180.
- Los áridos gruesos, retenidos sobre el tamiz 4.75. (No 4), deben ser partículas resistentes, durables, constituidas de fragmentos de roca, grava o escorias. El tamaño máximo de piedras que contenga el material de la sub base, no deberá exceder de 7 centímetros (tamiz de 2").
- La fracción gruesa del material deberá tener una resistencia al desgaste, medida por el ensayo de los ángeles de no más del 40%.
- El material de la sub-base no deberá tener más del 50% en peso, de partículas que pasen el tamiz No. 40 (0.425 mm), ni más del 25% en peso, de partículas que pasen el tamiz No. 200 (0.0075 mm.) la granulometría debe cumplir con los rangos (TM50a) de la norma ABC.

**Tabla 3. Rango granulométrico para sub-base fuente norma ABC.**

Tamiz		TM-50a
(mm)	Alternativo	
50	2''	100
37,5	1 1/2''	-
25	1''	55 - 100
19	3/4''	-
9,5	3/8''	30 - 75
4,75	No 4	20 - 65
2,36	No 8	-
2	No 10	10 - 50
0,425	No 40	5 - 30

0,075	No 200	0 - 20
-------	--------	--------

*Fuente:* Norma Administradora Boliviana de Carretera (ABC)

- **Plasticidad.** La porción que pasa el tamiz No. 40 (0.425 mm), no debe de tener un índice de plasticidad AASHTO T90, mayor de 8 ni un límite líquido, AASHTO T89, mayor de 35, determinados ambos, sobre muestras preparada en húmedo, según norma ABC.
- **Impurezas.** El material de la sub- base debe estar razonablemente exento de materiales vegetales, basura, terrones de arcilla o sustancias que incorporadas dentro de la capa de la sub-base pueden causar, a criterio profesional, fallas en el pavimento.
- **Selección del material.** Seleccionar los bancos de materiales, que llenen los requisitos de calidad establecidos y acompañando los resultados de los ensayos que haya efectuado.
- **Tendido.** El material de sub-base debe ser tendido en capas no mayores de 30 centímetros ni menores a 10 centímetros. Si el espesor de sub-base requerida, es mayor a 30 centímetros en material debe ser colocado en dos o más capas nunca menores a 10 centímetros, perdiéndose la colocación de la capa siguiente antes de comprobar la compactación de la inmediata anterior.
- El material suelto de la sub-base colocado debe corresponder en cantidad, el espesor de la capa a tender el ancho total establecido en la sección típica de pavimentación tomando en cuenta su reducción de volumen por la compactación. La distancia máxima a que se puede ser colocado el material de sub-base, medida desde el extremo anterior cubierto con la base, no debe ser mayor de 4 kilómetros.
- **Mescla.** Después de haberse colocado y tendido el material, cuando no se use maquina especial esparcidora y conformadora debe procederse a su homogenización, mezclado del material en todo su espesor mediante la utilización de equipos apropiados, pudiéndose efectuar con moto niveladora, escarificadora, estabilizadora, arado de disco o por otro método que produzca una mescla homogénea.
- **Valor del CBR.** Se debe efectuar un ensayo de 500 metros cúbicos producidos, al iniciar la explotación de cada banco, hasta llegar a 3,00 metros cúbicos.

- Granulometría. Se debe efectuar un ensayo de granulometría, por cada 500 metros cúbicos de los primeros 3,00 metros cúbicos producidos al iniciar la explotación de cada banco.

## **2.3. COMPACTACIÓN DE LA CAPA SUB BASE EN LABORATORIO**

### **2.3.1. DEFINICIÓN**

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

#### **Finalidad de la compactación**

Una compactación puede seguir muchos objetivos, como ser que el suelo compactado adquiera una resistencia suficiente para resistir con seguridad el propio peso de alguna estructura civil o las cargas que transmiten las ruedas al suelo en una construcción vial.

También el suelo compactado no debe deformarse tanto, por efecto de las cargas que resiste, de manera que no se dañe dicho suelo ni la estructura que soporta, es decir, no debe retraerse ni expenderse excesivamente.

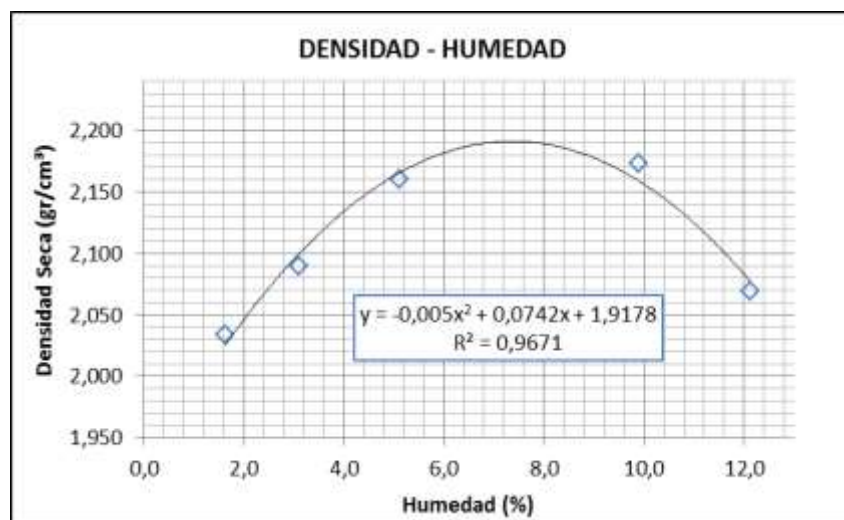
#### **Grado de compactación**

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

#### **Curva de compactación**

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

**Gráfica 1. Curva de compactación.**



*Fuente:* Informes de mecánica de suelos- U.J.M.S.

### **Humedad óptima**

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

### **Densidad seca máxima**

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

### **Procedimientos para encontrar los valores máximos de la curva de compactación**

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

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

### **2.3.1.1. FACTORES IMPORTANTES QUE DETERMINAN LA COMPACTACIÓN**

Los más importantes factores que determinan la compactación o sus resultados son:

- Naturaleza de los suelos
- Contenido de agua (humedad)
- Método de compactación y energía aplicada

#### **a) Naturaleza del suelos**

Es claro que la clase del suelo con que se trabaja influye de manera decisiva en el proceso de compactación, de hecho habrán de diferenciarse notoria mente las técnicas que se emplean y los resultados que se obtengan precisamente con base en un mismo tipo de suelo.

Prevalece aun la distinción usual entre suelos finos, gruesos, arcillosos y fricciantes pero en el análisis de los procesos de compactación es muy común que tal distinción se detalla bastante más, tipificando los suelos de acuerdo con las normas establecidas.

#### **b) método de compactación**

Se entiende por energía específica de compactación la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico de que se trate.

En el laboratorio resulta bastante fácil clasificar los métodos de compactación en uso de tres tipos bien diferentes: la compactación por impacto, por amasado y por aplicación de cargas elásticas.

A reserva de detallar algo más estos métodos, hasta por el momento la afirmación de siempre producen resultados muy diferentes tanto la estructura que adquiere el suelo como, en consecuencia, en las propiedades del material que se compacta.

Además ya se comienza a realizar algunos dispositivos de laboratorio para compactar por vibración, si bien su uso está menos extendido que el de los otros tres métodos. Resulta más fácil diferenciar de un método analógico los métodos de compactación del campo.

Es común describir éstos con base en el equipo mecánico que se emplee en el proceso y así se habla de la compactación con rodillo liso, con rodillo neumático y con equipo de vibración.

Se supone que los métodos de laboratorio producen las condiciones del proceso de campo, pero en muchos casos no es fácil establecer una correspondencia clara entre el trabajo de campo y las pruebas de laboratorio, en el sentido de contar con que estas últimas reproduzcan en forma suficientemente representativa todas las condiciones del suelo compactado en el campo.

### **c) contenido del agua del suelo**

Ya en los primeros estudios de Proctor se puso de manifiesto que el contenido de agua del suelo que se compacta es otra variable fundamental del proceso. Proctor observando que con contenidos crecientes de agua, a partir de valores bajos, se obtenían más altos pesos específicos secos para el material compactado, si se usa la misma energía de compactación; pero observo que también esta tendencia no se mantenía indefinidamente, ya que cuando la humedad pasa de cierto valor, disminuye los pesos específicos secos logrados.

Es decir Proctor puso de manifiesto que para un suelo dado y usando determinado procedimiento de compactación, llamado el óptimo, que produce el máximo peso volumétrico seco es importante obtener ese procedimiento de compactación. En relación a un proceso de compactación de campo, dicho contenido de agua es el óptimo para el equipo y la energía correspondiente.

## **2.3.2. PRUEBAS DE COMPACTACIÓN**

### **2.3.2.1. PRUEBA PROCTOR ESTANDAR MODIFICADO**

El ensayo de Proctor modificado se crea al crearse también equipos compactadores más pesados que se usan en la pavimentación de carreteras y aeropuertos. Se usa para suelos granulares.

**Tabla 4. Especificaciones para el ensayo Proctor Modificado (basadas en la norma 1557-91 de la ASTM)**

CONCEPTO	METODO			
	A	B	C	D
Diámetro del molde (cm)	10.16	15.24	10.16	15.24
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	943.3	2124.0	943.3	2124.0
Peso del martillo o pisón (Kg)	4.54	4.54	4.54	4.54
Altura de caída del martillo (cm)	45.7	45.7	45.7	45.7
Numero de golpes del pisón por cada capa	25	56	25	56
Numero de capas de compactación	5	5	5	5
Energía de compactación (Kg-cm/cm <sup>3</sup> )	16.49	16.42	16.49	16.42
Suelo por usarse Pasa por	100% tamiz No.4	100% tamiz 3/8"	El 20% retiene No.4	Pasa 100 tamiz 1/4"

*Fuente:* Norma 1557-91 de la ASTM

El Proctor Modificado (ASTM D422 AASHTO T180) radica en la energía de compactación utilizada. Por lo tanto, cuando se solicita un suelo compactado al 95% Proctor o Proctor modificado significa que la compactación debe tener una densidad seca da al menos el 95% de la densidad seca máxima obtenida con los correspondientes ensayos. En el ensayo de compactación Proctor Modificado se realiza en cinco capas y cada capa con 56 golpes donde se usa molde de 6'' de diámetro y 5'' de altura con un pistón de 10 lb y una altura de caída de 18 pulg.

#### **Figura 5. Equipo Usado Para La Prueba Proctor Modificado**



*Fuente:* Informes de mecánica de suelos- U.J.M.S.

### **2.3.3. VENTAJAS DE LA COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS**

Las ventajas de la compactación son:

- Aumentar la capacidad de soporte del suelo
- Reduce los asentamientos del terreno
- Reduce la permeabilidad del suelo, el escurrimiento y la penetración del agua. El agua fluye y el drenaje puede regularse.
- Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo ya que si hay vacíos el agua penetra y habrá un esponjamiento en época de lluvia y contracción en época seca o invierno.

- Impide los daños por las heladas puesto que el agua se expande y aumenta el volumen al congelarse haciendo que los pavimentos se hinchen y las losas y otras estructuras se agrieten.

## **2.4. RESPUESTA MECÁNICA DE LA CAPA SUB BASE**

### **2.4.1. CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.)**

El ensayo CBR (la ASTM denominada dicho ensayo solamente como una relación de soporte) mide la resistencia del corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado sino que se aplica solo en estado en el cual se encuentre el suelo durante el ensayo.

El C.B.R. (California Bearing Ratio) mide la resistencia al corte de los suelos granulares utilizados como base y sub base de los caminos y consiste en un aparato de ensayo que tiene un pistón consistente en una varilla cilíndrica de un determinado diámetro, que desciende a una determinada velocidad (muy pequeña) y empieza a comprimir la muestra del suelo.

El número de CBR se obtiene como la relación de carga unitaria (en libras por pulgadas cuadrada) necesaria para lograr en cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (con área de 19,4 cm<sup>2</sup>) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto al de la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma penetración de profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. En forma de ecuación es:

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} * 100(\%)$$

De esta ecuación se puede ver que el número CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón, el símbolo porcentaje se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero. Los valores de la carga unitaria patrón que deben utilizarse en la ecuación son los siguientes:

### **Penetración Y Cargas Unitarias**

**Tabla 5. Valores de carga unitaria para hallar el CBR ASTM D 1883-73**



PENETRACION			CARGA UNITARIA PATRON		
Milímetros (mm)	Centímetros (cm)	Pulgadas (pulg.)	Kilogramos/cm <sup>2</sup> (Kg/cm <sup>2</sup> )	MPa	PSI
2.5	0.25	0.10	70.31	6.9	1,000
5.0	0.50	0.20	105.46	10.3	1,500
7.5	0.75	0.30	133.58	13.0	1,900
10.0	0.10	0.40	161.71	16.0	2,300
12.7	1.27	0.50	182.80	18.0	2,600

*Fuente:* Informes de mecánica de suelos- U.J.M.S.

El número de CBR usual mente se basa en relación de carga para una penetración de 2,5mm. Sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5,0 mm, de penetración es mayor, el ensayo produce nuevamente un valor de CBR mayor de 5,0 mm de penetración; dicho valor debe aceptarse como valor final del ensayo.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para un suelo determinado utilizado el ensayo de compactación estándar. El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

- 1.- Dar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura.
- 2.- Dar inclinación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en campo.

El valor de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de suelos principalmente con fines de utilización con base y sub-rasante bajo pavimentos de carreteras y aeropuertos.

### **Clasificación típica muestra los rangos del CBR**

*Tabla 6. Valores de CBR, clasificación de los suelos y uso.*

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso

2 - 5	Muy mala	Sub-rasante
5 - 8	Mala	Sub-rasante
8 - 20	Regular - Buena	Sub-rasante
20 - 30	Excelente	Sub-rasante
30 - 60	Buena	Sub-base
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente: Norma Administradora Boliviana de Carretera (ABC)

**Tabla 7. Valores soporte según el tipo de suelo**

CBR	CLASIFICACIÓN GENERAL	USO	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN	
			UNIFICADO	AASHTO
0 - 3	muy pobre	sub-rasante	OH,CH,MH,OL,	A5,A6,A7
3 - 7	pobre a regular	sub-rasante	OH,CH,MH,OL,	A4,A5,A6,A7
7 - 20	regular	sub-base	OL,CL,ML,SC,SM,SP	A2,A4,A6,A7
20 - 50	bueno	base, sub-base	GM,GC,W,SM,SP,GP,	A1b,A2-5,A3,A2-6
Mayor 50	excelente	base	GW,GM,	A1a,A2-4,A3

Fuente: Sistema de clasificación AASHO

#### 2.4.1.1. DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

- a) Una vez determinado la densidad y la humedad de la muestra se colocará un papel filtro de 6'' de diámetro sobre la superficie enrasada; se montará encima de esta superficie el plato metálico perforado y se volteará el molde.
- b) Sobre la superficie libre de la muestra se colocará un papel filtro de 6'' de diámetro y se montará el plato con el vástago graduable; luego sobre el plato se colocará varias pesas de plomo. La sobre carga que se aplique mediante las pesas de plomo, debe ser prácticamente igual a la correspondiente al pavimento a

construirse la sobre carga mínima a emplearse será de 10 libras (4,54 kg) equivalente a un pavimento de concreto de 5'' de espesor (12,5cm).

- c) Una vez colocado el vástago y las pesas de la forma indicada se colocará cuidadosamente el molde dentro de un tanque o depósito lleno de agua. Para permitir el libre acceso por debajo de la muestra, se recomienda colocar el molde sobre bloques metálicos y no directamente sobre la superficie del tanque o depósito. Así mismo para que la muestra se sature fácilmente por la parte superior, se recomienda verter agua dentro del molde hasta el nivel superior de las pesas, los niveles de agua dentro y fuera del molde deben ser iguales.
- d) Colocando el molde dentro del tanque con agua, se monta el trípode con un extensómetro, y se registra la lectura inicial.
- e) Cada 24 horas y por un periodo de 96 horas (4días), se toman y se registran las lecturas del extensómetro.
- f) Al acabo de 96 horas, o antes, si el material es arenoso, se toma y anota la lectura final, para calcular el hinchamiento o expansión del material. La expansión progresiva diaria, así como la expansión total registrada al cabo de 4 días, es referida, en por ciento, a la altura inicial que tenía la muestra antes de ser sumergida en agua. Los suelos orgánicos y algunos suelos cohesivos tienen expansiones muy grandes generalmente mayores al 10%. Las especificaciones establecer generalmente que los materiales de préstamo para sub-base deben tener expansiones menores de 2% al cabo de 4 días se recomienda que los materiales para sub-base tengan expansiones menores al 1%.

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

Donde:

Lf = Lectura final del extensómetro (cm)

Li = Lectura inicial del extensómetro (cm)

H = Altura total del espécimen.

#### **2.4.1.2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE PENETRACIÓN**

Después de entrar la muestra durante 4 días, se saca el cilindro y cuidadosamente se drena durante 15 minutos, el agua libre que queda. Como para drenar bien el agua se debe voltear el cilindro, sujetar bien los discos y las pesas metálicas al hacer esta operación.

Luego remuévase el disco, las pesas y el papel filtro y pésese la muestra:

- a) Si es necesario sumergir la muestra en agua, se colocara sobre ella la pesa anular y se montara las pesas de plomo equivalente a 10 lb, de tal modo que se obtenga una sobre carga semejante al pavimento a construirse.
- b) Si la muestra ha sido sumergida en agua para medir la expansión, y después que haya sido drenada se colocara la pesa anular y encima de la pesa de plomo que tenía la muestra cuando estaba sumergida en agua; o sea que la sobrecarga para la prueba de penetración deberá ser prácticamente igual ala sobre carga colocada durante el ensayo de hinchamiento.
- c) El molde con la muestra y la sobre carga se colocan debajo de la prensa y se asienta el pistón sobre la primera, aplicando una carga de 10 lb (4,5 kg).
- d) Una vez asentado el pistón, se coloca en cero el extensómetro que mide la deformación. Si para la aplicación de la carga se emplea un aparato con anillo calibrado, el extensómetro del anillo deberá también colocarse en cero.
- e) Se hincan el pistón manteniendo una velocidad de 0,05 pulgadas por minuto, y se leen las cargas totales necesarias para hincar el pistón en incrementos de 0,025'', hasta alcanzar ½''.
- f) Hincado el pistón hasta ½'' (1,27cm), se suelta la carga lentamente; se retira el molde de la prensa, y se quita las pesas de la base metálica perforada.
- g) Finalmente se determina el contenido de humedad de la muestra.

## **2.5. PROCESO DE CONFORMACIÓN DE CAPA SUB BASE**

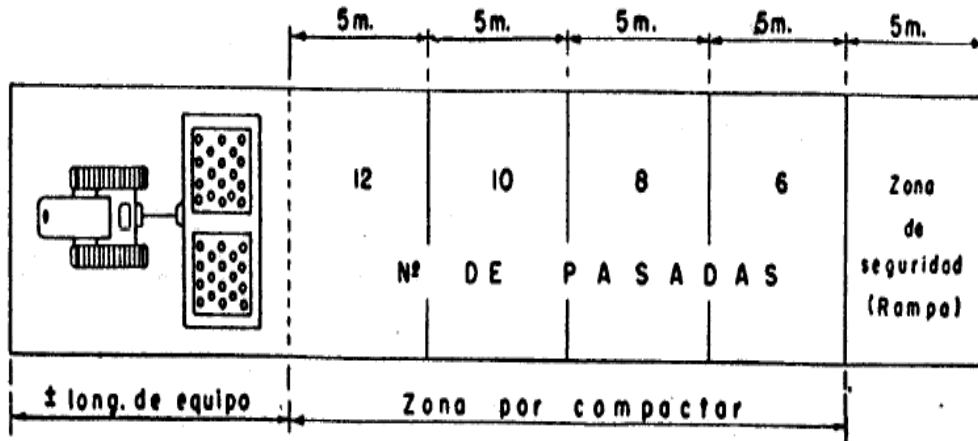
**Espesor de la Capa a Compactar y Número de Pasadas:** De acuerdo con (Escuela de Ingenieros Militares, 1994) el espesor de la capa de material suelto no puede exceder a 6 pulgadas (15.24 cm) y normalmente de 6 a 11 pasadas son suficientes para obtener la compactación deseada.

### **2.5.1. COMPACTACIÓN DE PRUEBA**

Se aconseja en obras de cierta importancia.

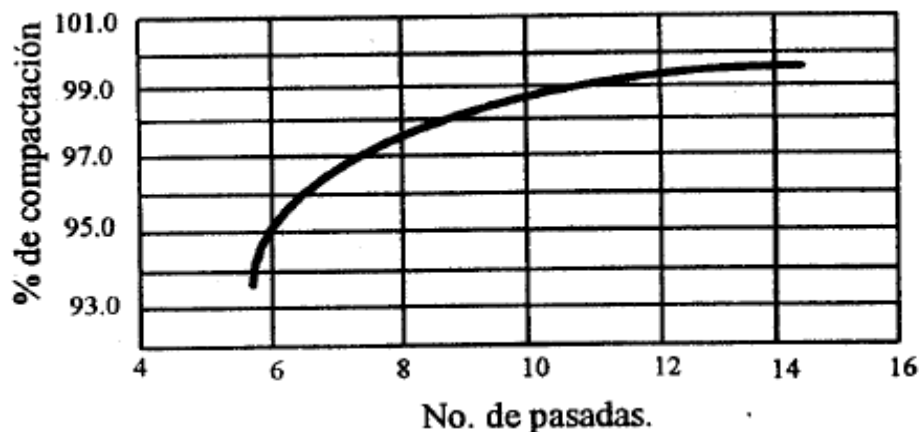
Permite Determinar el nº de pasadas y humedad más convenientes a la exigencia de la obra y a la economía de la empresa.

***Figura 6. Elección y cálculo de número de pasadas para compactar un suelo de manera efectiva.***



*Fuente:* SATUARDE, Juan Fran. Ilustración elección y cálculo de número de pasadas para compactar un suelo de manera efectiva. Madrid (España). Tesis de maestría. Magíster en Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Madrid, 2007. p. 20.

**Gráfica 2. Figura de elección óptima de número de pasadas en relación al % compactación del Proctor.**



*Fuente:* SATUARDE, Juan Fran. Ilustración elección y cálculo de número de pasadas para compactar un suelo de manera efectiva. Madrid (España). Tesis de maestría. Magíster en Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Madrid, 2007. p. 22.

**Rodillo neumático:** los rodillos neumáticos son muy eficientes y a menudo esenciales de los rodillos neumáticos, pero el área de contacto permanece constante por lo que no se produce el efecto de reducción del bulbo. Por otra parte, el efecto de puenteo del rodillo neumático, en zonas suaves, se elimina con llantas de suspensión independiente.

Estos compactadores pueden ser jalados o autopulsados. Se pueden dividir conforme al tamaño de sus llantas en:

- A) De llantas pequeñas
- B) De llantas grandes

**Figura 7. Compactador neumático**



*Fuente:* Prueba de compactación.

Este tipo de compactadores tiene una presión de contacto semejante a la de equipos de mayor peso, tienen una excelente maniobrabilidad, tienen poca profundidad de acción y poca flotación en materiales sueltos. Tienen una buena acción de secado y cierran la textura del material en la capa compactada.

**Compactador de rodillo liso en Tandem, 8 toneladas.-** Los compactadores rodillo liso de tambor simple es capaz de compactar grava, piedras machacadas, mezcla de arena-asfalto, el suelo de arena y roca de llenado, y otros materiales no cohesivos en el curso base, sub-base y terraplén, etc.

**Figura 8. Compactador de rodillo liso**



*Fuente:* prueba de compactación.

Son aplicables a la construcción de carreteras, ferrocarriles, aeropuertos, puertos, represas y suelo industrial a gran escala de clase alta.

En campo se usó un compactador de rodillo liso en Tander, de 8 toneladas para un ancho efectivo de trabajo de 1,20 metros, una velocidad promedio de 5 kph y una eficiencia de 50 minutos por hora, para un número de pases de 6 del material sub-base.

El proceso de conformación de la capa sub base es:

### **2.5.2. COLOCACIÓN DEL MATERIAL DE SUB-BASE GRANULAR**

Esta partida consiste en colocar, extender, batir y compactar las capas de material compuestos por grava o piedra fracturada (en forma natural o artificial) y finos, sobre la sub-base debidamente preparada, en conformidad con los alineamientos, niveles y secciones transversales típicas indicadas en los planos.

***Figura 9. Colocación Del Material De Sub-Base Granular***



*Fuente:* Proceso Constructivo de Sub-Base Granular en Carreteras

### 2.5.3. EXTENDIDO DE MATERIAL DE LA SUB-BASE

La colocación y extendido del material de la sub-base será colocado sobre la capa de la sub rasante debidamente preparada y será compactada en capas no mayores a 35 cm y será extendido en una capa uniforme por medio de una motoniveladora, de tal forma que forme una capa suelta, de mayor espesor que el que debe tener la capa compactada.

**Figura 10. Extendido De Material De La Sub-Base**



*Fuente:* Proceso Constructivo de Sub-Base Granular en Carreteras

### 2.5.4. BATIDO DE MATERIAL DE LA SUB-BASE GRANULAR

La mezcla para la conformación de la sub base, se batirá todo el material por medio de la cuchilla de la motoniveladora en toda la profundidad de la capa, llevando en forma alternada hacia el centro y los bordes de la calzada.

**Figura 11. Batido De Material De La Sub-base Granular**



*Fuente:* Proceso Constructivo de Sub-Base Granular en Carreteras



### **2.5.5. ESCARIFICACIÓN DE MATERIAL DE LA SUB-BASE GRANULAR**

El escarificado del material se deberá de realizar para poder uniformizar con el riego de agua que se aplicará y poder tener una humedad homogénea todo el material colocado en la calzada.

***Figura 12. Escarificación De Material De La Sub-Base Granular***



*Fuente:* Proceso Constructivo de Sub-Base Granular en Carreteras

### **2.5.6. CONFORMACIÓN DE MATERIAL DE LA SUB- BASE**

Una vez concluida la distribución y el emparejamiento del material, cada capa de la sub-base deberá ser compactada en su ancho total por medio de rodillos lisos vibratorios con un peso mínimo de 10 toneladas.

***Figura 13. Conformación De Material De La Sub- Base***



*Fuente:* Proceso Constructivo de Sub-Base Granular en Carreteras

### **2.5.7. COMPACTACIÓN DE LOS MATERIALES DE LA SUB-BASE GRANULAR**

La compactación una vez concluida la distribución y el emparejamiento del material, cada capa de la sub-base deberá ser compactada en un ancho total por medio de rodillos lisos vibratorios con un peso mínimo de 10 toneladas. Dicho rodillo deberá progresar en forma gradual desde los bordes hacia el centro, en sentido paralelo al eje de la vía y continuara de este modo hasta que toda la superficie haya recibido este tratamiento.

**Figura 14. Compactación De Los Materiales De La Sub-Base Granular**



*Fuente:* Proceso Constructivo de Sub-Base Granular en Carreteras

### **2.5.8. TERMINACIÓN DEL MATERIAL DE LA SUB- BASE GRANULAR**

El material será tratado con motoniveladora y rodillo hasta que se haya obtenido una superficie lisa y uniforme. La cantidad de cilindrado y apisonado arriba indicada se considerará la mínima necesaria para obtener una compactación adecuada. En caso de no alcanzar el porcentaje de compactación exigido, deberá completar un cilindrado o apisonado adicional en la cantidad que fuese necesaria para obtener la densidad.

**Figura 15. Terminación Del Material De La Sub- Base Granular**



*Fuente:* Proceso Constructivo de Sub-Base Granular en Carreteras

## **2.6. RECOMPACTACIÓN**

### **2.6.1. DEFINICIÓN**

La evaluación se llevará a cabo a partir de los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio sobre material compactado en laboratorio y campo. Posteriormente se determinará la conveniencia de realizar recompactación de materiales granulares y cómo se consideraría esta variable en el diseño de estructuras de pavimento. El producto de la excesiva recompactación se sufre cambios de granulometría baja de la respuesta mecánica asimismo alteración de la estructura interna de los materiales.

**Espesor.-** Sobre la base del lote escogido para el control de la compactación y en los mismos puntos de verificación, se determinará el espesor promedio de la capa compactada ( $e_m$ ), el cual no podrá ser inferior al espesor de diseño ( $e_d$ ).

$$e_m \geq e_d$$

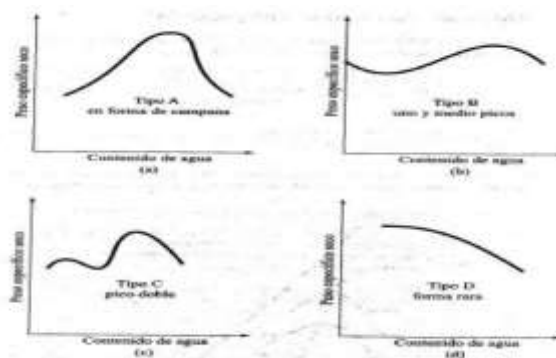
Además, el valor obtenido en cada determinación individual ( $e_i$ ) deberá ser, como mínimo, igual al cien por ciento (100%) del espesor de diseño, admitiéndose un (1) solo valor por debajo de dicho límite, siempre que este último valor sea igual o mayor al noventa y cinco por ciento (95%) del espesor de diseño. Si la exigencia incluida en este párrafo no se cumple, el Constructor deberá escarificar la capa en un espesor mínimo de cien milímetros (100 mm), añadir el material necesario de las mismas características y recomprimir y terminar la capa conforme.

Si el espesor medio resulta inferior al espesor de diseño, pero ningún valor individual es inferior al noventa y cinco por ciento (95%) del espesor de diseño, el Interventor podrá admitir el espesor construido.

### **2.6.2. FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE LA COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS.**

**Tipo de Suelo.-** Tiene influencia la granulometría del suelo, forma de sus partículas, contenido de finos, cantidad y tipo de minerales arcillosos, gravedad específica, entre otros. De acuerdo a la naturaleza del suelo se aplicarán técnicas adecuadas en el proceso de compactación. En laboratorio, un suelo grueso alcanzará densidades secas altas para contenidos óptimos de humedad bajos, en cambio los suelos finos presentan valores bajos de densidades secas máximas y altos contenidos óptimos de humedad.

#### ***Gráfica 3. Curvas de compactación para distintos suelos***



Fuente: Mecánica de Suelos- Juárez Badillo Alfonso rico Rodríguez. México 1977.

**Energía Específica.-** La energía específica es la presión aplicada al suelo por unidad de volumen, durante cualquier proceso de compactación. En laboratorio, la compactación por impacto queda definida por:

$$E_c = \frac{NnWh}{V}$$

Donde:

E: Energía Específica

N: Número de golpes del pisón por capas

n: Número de capas

W: Peso del pisón compactador

h: Altura de caída del pisón

V: Volumen total del molde de compactación.

Ensayo Próctor Modificado:  $E_e = 27.2 \text{ kg-cm/cm}$

Ensayo Próctor Estándar:  $E_e = 6.1 \text{ kg-cm/cm}$

El empleo de una mayor energía de compactación permite alcanzar densidades secas mayores y óptimos contenidos de humedad menores, esto se comprueba al analizar los resultados obtenidos con las pruebas Proctor Estándar y Proctor Modificado.

**Método de compactación.-** En el campo y laboratorio existen diferentes métodos de compactación. La elección de unos de ellos influirá en los resultados a obtenerse.

**La recompactación.-** En laboratorio, a veces se acostumbra a utilizar un mismo espécimen para obtener todos los puntos de la curva, esto causa una deformación volumétrica de tipo plástico que causan las sucesivas compactaciones. La compactación

muy intensa puede producir un fragmento de las partículas y originar un material susceptible al agrietamiento.

**Contenido de humedad.-** El Ingeniero R. Proctor demostró que para contenidos de humedad creciente y una determinada energía de compactación la densidad aumenta ya que el agua actúa como lubricante entre las partículas del suelo, incrementándose la densidad hasta un cierto punto en el cual al seguir añadiendo agua, la densidad empieza a desplazar las partículas de suelo, incrementando el volumen y disminuyendo la densidad. Para cada suelo existe un contenido en humedad que proporciona la máxima densidad seca. Éste es el contenido de humedad óptima que es el que se debe utilizar en obra cuando se va a compactar un suelo.

**Sentido de recorrido de la escala de humedad.-** En las pruebas de laboratorio, tiene influencia también el sentido en que se recorre la escala de humedades al efectuar la compactación, se obtienen curvas diferentes si se compacta comenzando con el suelo húmedo y luego se va agregando agua, o si se empieza con un suelo húmedo y luego se va secando.

En el primer caso se obtienen densidades secas mayores ya que al agregar el agua, ésta tendera a quedar en la periferia de los grumos, penetrando en ellos después de un tiempo, por lo tanto la presión capilar entra los grumos es pequeña favoreciendo la compactación. En segundo caso se obtienen densidades secas menores, ya que al evaporarse el agua e irse secando el suelo, la humedad superficial de los grumos se hace menor que la interna, aumentando la presión capilar haciendo más difícil la compactación.

**Temperaturas y presencia de otras sustancias.-** Dependiendo de la temperatura puede producirse la evaporación o condensación del agua la presencia de sustancias extrañas, puede también producir variación del resultado en la obtención de la densidad seca.

## **CAPÍTULO III RECOMPACTACIÓN SOBRE LA GRANULOMETRIA Y LA RESPUESTA MECANICA DE LA SUB-BASE GRANULAR**

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

Lo que se pretende con el presente proyecto es determinar los efectos que tiene la recompactación de materiales granulares, tipo sub-base, utilizados en estructuras de pavimento, analizando cómo incide tanto en las características físicas como en la respuesta mecánica, en base a diversos ensayos a realizar en laboratorios debidamente normalizados.

#### **3.1.1. SELECCIÓN DE MATERIALES**

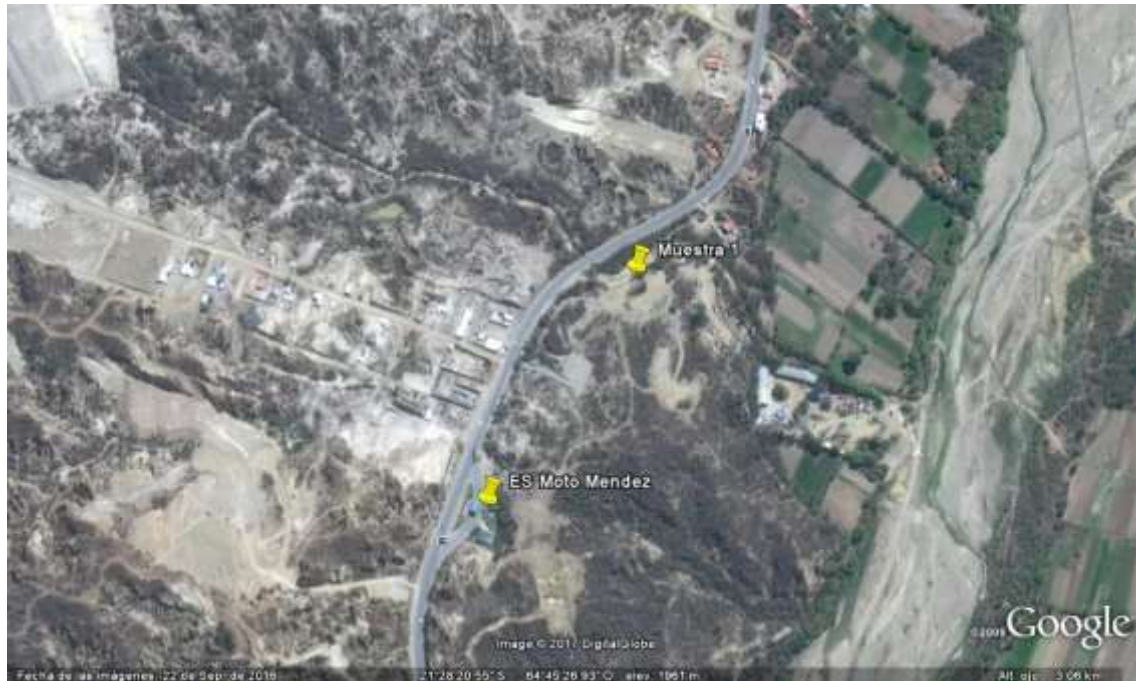
#### **3.1.2. CAPA SUB-BASE GRANULAR**

Los materiales “capa sub-base” extraídas de los caminos en pavimentación de estudio de la región de Tarija serán muestras representativas, y mediante cuarteo se obtendrá la cantidad de material especificada por cada ensayo de laboratorio.

Se hizo levantamiento de las muestras de tres empresas constructoras que tienen materiales en bancos, en distintas fechas, como se muestra a continuación:

<b>MUESTRA</b>	<b>UBICACIÓN</b>	<b>FECHA DE EXTRACCIÓN</b>
SBG-1	Empresa constructora Erika. S.R.L.	16 de Agosto del 2016
SBG-2	Servicio de caminos (SEDECA).	31 de Agosto del 2016
SBG-3	Alcaldía municipal de Tarija.	13 de Octubre del 2016

**Figura 16. Muestra1, Empresa constructora Erika. S.R.L.**



*Fuente:* Google Earth.



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 17. Muestra2, Alcaldía municipal de Tarija.**



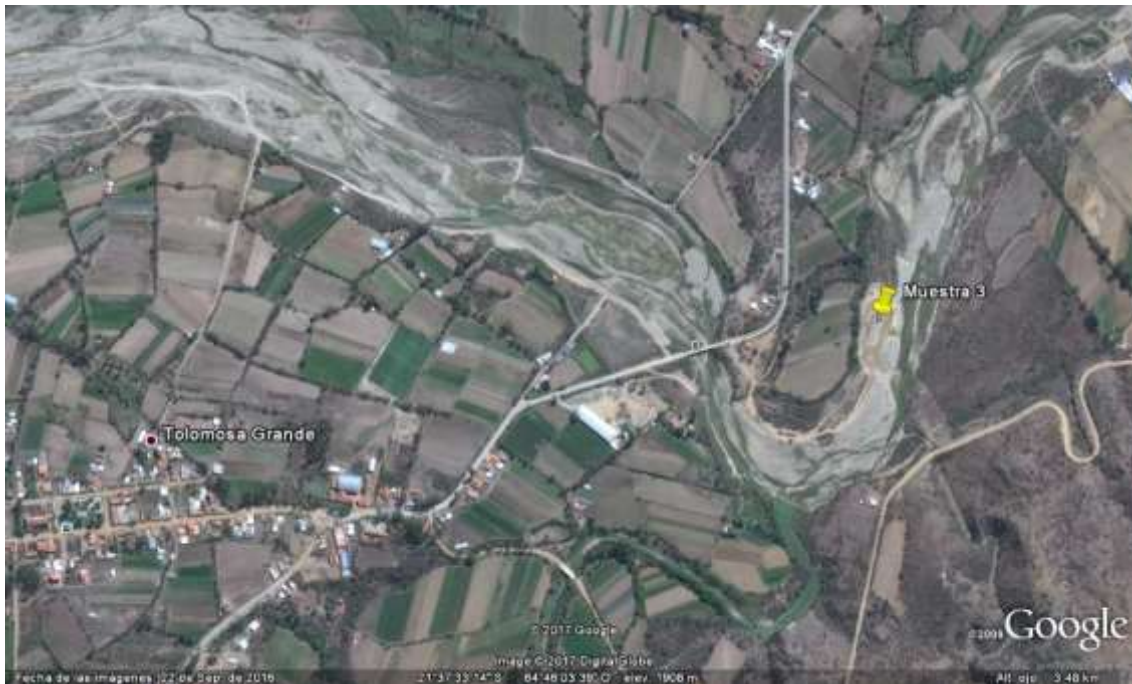
*Fuente:* Google Earth.



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 18. Muestra3, Servicio de caminos (SEDECA).**





*Fuente:* Google Earth.



*Fuente:* Elaboración Propia

## **3.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES**

### **3.2.1. MATERIAL SUB-BASE**

Posteriormente terminando el reconocimiento del material de la capa sub-base y la recolección de los materiales se continuará con la caracterización de los mismos.

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

### 3.2.1.1 GRANULOMETRÍA

La obtención de la granulometría del material se logrará por medio de un análisis por cribado, que consiste en sacudir una determinada muestra de sub-base de tamaño máximo de 2'' a través de un conjunto de mallas o tamices que tienen aberturas progresivamente más pequeñas, es decir, van disminuyendo de tamaño.

Este método describe el procedimiento para determinar la distribución de tamaños de las partículas de áridos gruesos y finos extraídos de la muestra sub-base. Sirve para verificar el cumplimiento de la granulometría de trabajo y además entrega antecedentes para el control de calidad de la sub-base granular.

#### PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

**Tabla 8. Rango granulométrico para sub-base fuente norma ABC.**

Tamiz		TM-50a
(mm)	Alternativo	
50	2''	100
37,5	1 1/2''	-
25	1''	55 - 100
19	3/4''	-
9,5	3/8''	30 - 75
4,75	No 4	20 - 65
2,36	No 8	-
2	No 10	10 - 50
0,425	No 40	5 - 30
0,075	No 200	0 - 20

*Fuente:* Norma Administradora Boliviana de Carretera (ABC).

**Figura 19. Muestra para la granulometría.**



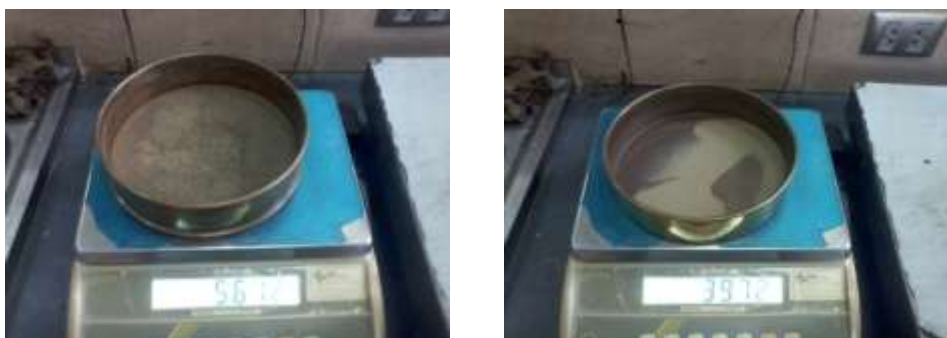
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 20. Juego de tamices para la granulometría.**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 21. Obtención de pesos retenidos en cada tamiz.**



Fuente: Elaboración Propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Muestra (SBG-1).

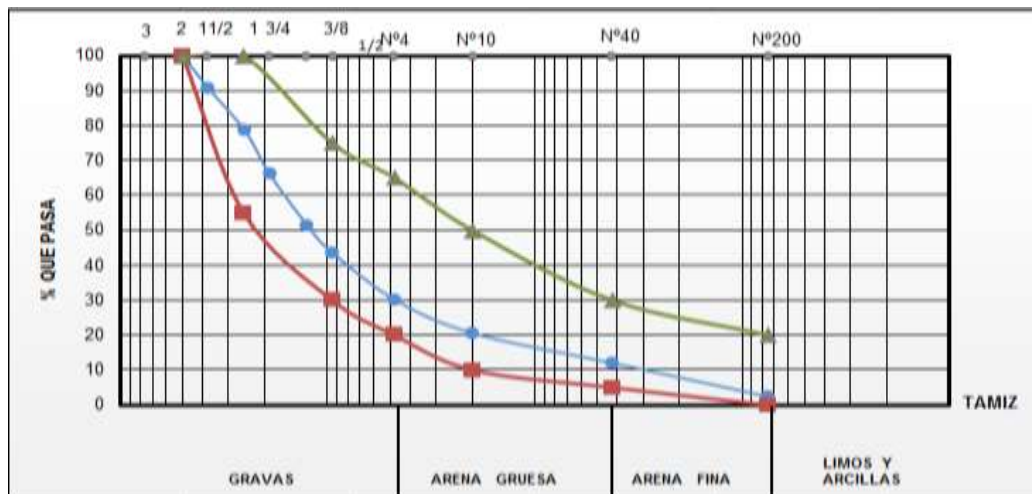
**Tabla 9. Granulométrica del % que pasa de la muestra 1 comparado con la norma ABC.**

Peso Total (gr.)			5000			
Tamices $\varnothing$	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	
3"	75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>	
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>	
1 1/2"	37,5	468,00	468,00	9,37	<b>90,63</b>	
1"	25,00	609,50	1077,50	21,57	<b>78,43</b>	
3/4"	19,00	617,90	1695,40	33,94	<b>66,06</b>	
1/2"	12,50	736,60	2432,00	48,69	<b>51,31</b>	
3/8"	9,50	384,80	2816,80	56,39	<b>43,61</b>	
Nº4	4,75	673,80	3490,60	69,88	<b>30,12</b>	

N°10	2,00	480,10	3970,70	79,49	<b>20,51</b>
N°40	0,43	427,10	4397,80	88,04	<b>11,96</b>
N°200	0,075	481,80	4879,60	97,69	<b>2,31</b>
BASE	-	115,60	4995,20	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 4. Distribución granulométrica de los materiales SBG-1.**



Fuente: Elaboración Propia

**Muestra (SBG-2).**

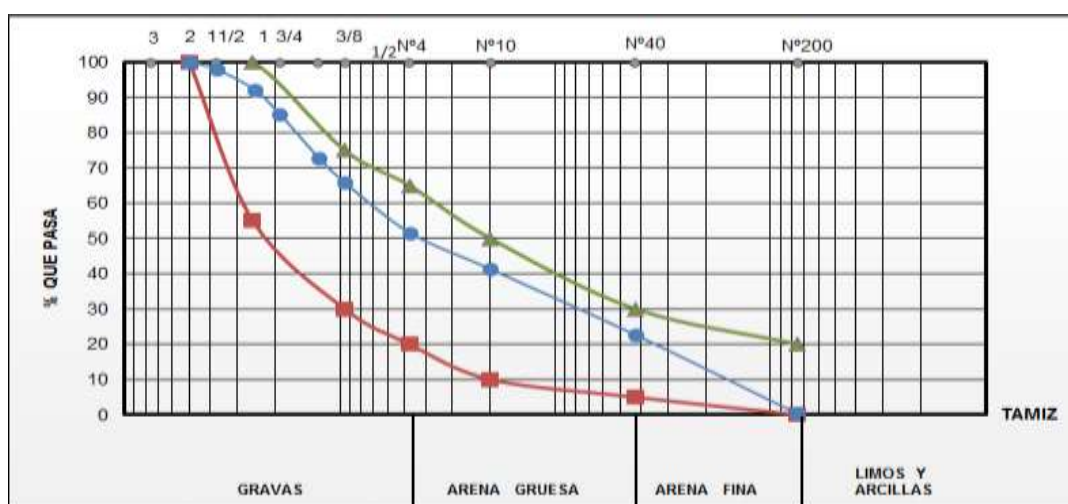
**Tabla 10. Granulométrica del % que pasa de la muestra 2 comparado con la norma ABC.**

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1 1/2"	37,5	103,40	103,40	2,07	<b>97,93</b>

1"	25,00	285,40	388,80	7,78	<b>92,22</b>
3/4"	19,00	350,70	739,50	14,80	<b>85,20</b>
1/2"	12,50	623,30	1362,80	27,27	<b>72,73</b>
3/8"	9,50	342,30	1705,10	34,12	<b>65,88</b>
Nº4	4,75	711,60	2416,70	48,35	<b>51,65</b>
Nº10	2,00	518,30	2935,00	58,72	<b>41,28</b>
Nº40	0,43	929,90	3864,90	77,33	<b>22,67</b>
Nº200	0,075	1119,00	4983,90	99,72	<b>0,28</b>
BASE	-	14,00	4997,90	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 5. Distribución granulométrica de los materiales SBG-2.**



Fuente: Elaboración Propia

**Muestra (SBG-3).**

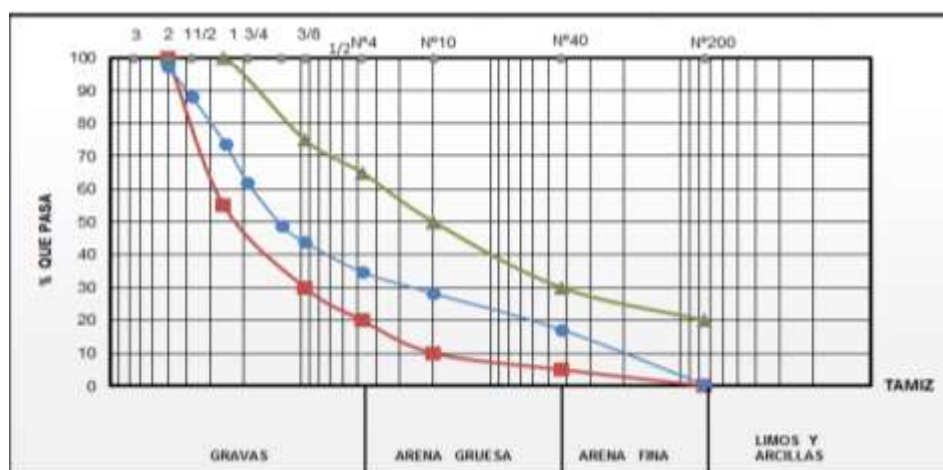
**Tabla 11. Granulométrica del % que pasa de la muestra SBG-3 comparado con la norma ABC.**

Peso Total (gr.)		5000			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	135,40	135,40	2,71	<b>97,29</b>
1 1/2"	37,5	457,60	593,00	11,86	<b>88,14</b>
1"	25,00	711,20	1304,20	26,09	<b>73,91</b>
3/4"	19,00	599,80	1904,00	38,10	<b>61,90</b>
1/2"	12,50	654,50	2558,50	51,19	<b>48,81</b>
3/8"	9,50	249,90	2808,40	56,19	<b>43,81</b>
Nº4	4,75	453,80	3262,20	65,27	<b>34,73</b>

Nº10	2,00	326,20	3588,40	71,80	<b>28,20</b>
Nº40	0,43	550,90	4139,30	82,82	<b>17,18</b>
Nº200	0,075	839,70	4979,00	99,62	<b>0,38</b>
BASE	-	18,90	4997,90	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 6. Distribución granulométrica de los materiales SBG-3.**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.1.2. PLASTICIDAD DE LOS SUELOS

La obtención de los límite plástico se usó el material sub-base que pasa por el tamiz No. 40 en una base de vidrio no se pudo realizar los rollitos cilíndricos porque las tres sub-base presentan una característica granular un porcentaje menor de fino, al no tener plasticidad el suelo no tiene límite líquido. Según la norma la Plasticidad de la sub-base de la porción que pasa el tamiz No. 40 (0.425 mm), no debe de tener un índice de plasticidad AASHTO T90, mayor de 8 ni un límite líquido, AASHTO T89, mayor de 35, determinados ambos, sobre muestras preparada en húmedo, según norma ABC.

### PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

**Figura 22. Determinación del límite plástico**



*Fuente:* Elaboración Propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

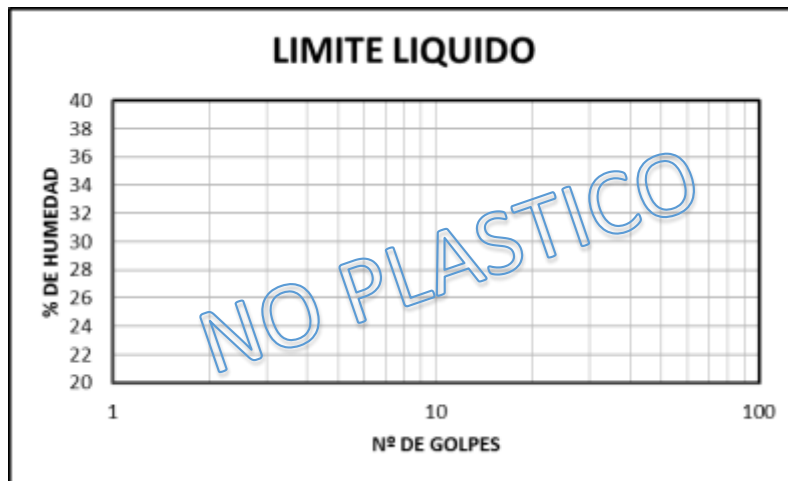
**Límite líquido de la SBG-1, SBG-2, SBG-3.**

**Tabla 12. Límite líquido.**

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes				
Suelo Húmedo + Cápsula				
Suelo Seco + Cápsula				
Peso del agua				
Peso de la Cápsula				
Peso Suelo seco				
Porcentaje de Humedad				

*Fuente:* Elaboración Propia

**Gráfica 7. Límite líquido No de golpes Vs % de humedad.**



*Fuente:* Elaboración Propia

### Limite plástico SBG-1, SBG-2, SBG-3.

*Tabla 13. Limite Plástico.*

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula			
Peso de suelo seco + Cápsula			
Peso de cápsula			
Peso de suelo seco	NO PLASTICO		
Peso del agua			
Contenido de humedad			

*Fuente:* Elaboración Propia

Los limite líquido y plástico de la capa sub-base no tienen plasticidad por lo tanto los valores resultan cero.

#### 3.2.1.3. DESGASTE DE LOS ÁNGELES

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.



Debido a las condiciones de esfuerzo deformación, la carga de la rueda es transmitida del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

Por esta razón los agregados que están en, o cerca de la superficie, como son los materiales de base y carpeta asfáltica, deben ser los más resistentes que los agregados usados en capas inferiores, como la sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM C-131 (para agregados menores de 1 ½”), mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión. Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”), por medio de la máquina de los ángeles.

#### PROCEDIMIENTO DE ENSAYO:

**Tabla14:** Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas para el Desgaste de los Ángeles.

GRADACIÓN		A	B	C	D
DIÁMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
<b>PESO TOTAL</b>		<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N° DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACIÓN		30	15	15	15

*Fuente:* Norma ASTM, C131.

### PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

***Figura 23.*** Colocado de la muestra en la máquina de los ángeles con el N° de esferas correspondiente.



*Fuente:* Elaboración Propia

***Figura 24.*** Muestra después del ensayo en la máquina de los ángeles.



*Fuente:* Elaboración Propia

***Figura 25.*** Pesaje de la muestra retenida en el tamiz N°12, después del lavado y secado en el horno.



*Fuente:* Elaboración Propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

### Muestra SBG-1

**Tabla 15:** Tabla de resultado del Desgaste de los Ángulos de SBG-1

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ABC
A	3754,6	2698,4	28,13	40% MAX
B	-	-	-	40% MAX
C	-	-	-	40% MAX
D	-	-	-	40% MAX

*Fuente:* Elaboración Propia

### Muestra SBG-2

**Tabla 16:** Tabla de resultado del Desgaste de los Ángulos de SBG-2

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	-	-	-	40% MAX
B	-	-	-	40% MAX
C	2501,5	1898,6	24,10	40% MAX
D	-	-	-	40% MAX

*Fuente:* Elaboración Propia

### Muestra SBG-3

**Tabla 17:** Tabla de resultados del Desgaste de los Ángulos de SBG-3

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ABC
A	3753,5	2697,2	28,16	40% MAX
B	-	-	-	40% MAX
C	-	-	-	40% MAX
D	-	-	-	40% MAX

*Fuente:* Elaboración Propia

**Tabla 18: Resultados del Desgaste de los Ángeles comparado con la ABC.**

MATERIAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ABC
SBG-1	28,13	40% MAX
SBG-2	24,10	40% MAX
SBG-3	28,16	40% MAX

*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.2.1.4. EQUIVALENTE DE ARENA

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm). El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos. Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

#### PROCEDIMIENTO DE ENSAYO:

**Figura 26: Pesaje de la muestra sin lavar y vertido de la solución.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 27: Colocado de la muestra dentro de la probeta.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 28:** Agitado de la muestra con la solución.



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 29:** Muestra en reposo por 20 min.



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 30:** Obtención de las lecturas  $H_1$  y  $H_2$



*Fuente:* Elaboración Propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

**Figura 19:** Tabla de datos y resultados de Equivalente de Arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,9	10,60	51,71
2	11,3	12,15	51,81
3	10,8	11,70	52,00

Equivalente de Arena (%)	NORMA
<b>51,71</b>	> 25%
<b>51,81</b>	> 25%
<b>52,00</b>	> 25%

*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.2.1.5. COMPACTACIÓN

La compactación de la sub-base granular es un proceso mecánico al cual se somete un determinado suelo para mejorar algunas características, como la resistencia, compresibilidad, y disminuir la deformación de dichos suelos provocados a causa de las cargas que puede llegar a soportar, esta compactación se la realiza expulsando el aire que se encuentra en el suelo y de esta manera reducir la cantidad de vacíos y lograr un reacomodamiento de todas las partículas que conforman el suelo, aumentando su densidad, al realizar la compactación se elimina los vacíos del suelo y generalmente no el agua que contiene el suelo. La compactación para la sub-base es de 95% del Proctor modificado.

**PROCEDIMIENTO DE ENSAYO:**

Como en la tabla 13 corresponde realizar el método D de la Norma 1557-91 de la ASTM su tipo de granulometría del porcentaje que pasa el tamiz  $\frac{3}{4}$ '' para la realización de la compactación.

**PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:**

**Figura 31. Porcentaje que pasa el tamiz  $\frac{3}{4}$ ''.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 32. Compactación del material en el Molde T-180.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 33: Pesaje de la muestra extraídas de cada compactación con diferentes % de agua y secado en el horno.**



*Fuente:* Elaboración Propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Muestra (SBG-1).

**Tabla 20. Ensayo de compactación AASTHO T-180.**

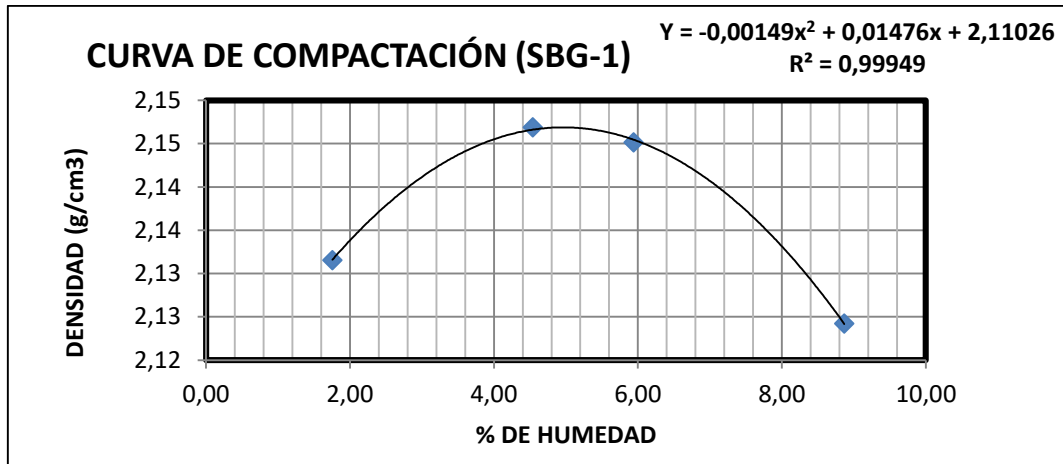
**SBG-1: A-1-a(0)**

Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	10390	10550	10610	10695
Peso del molde	5783	5783	5783	5783
Peso suelo húmedo	4607	4767	4827	4912
Volumén de la muestra	2124,0	2124,0	2124,0	2124,0
Densidad suelo húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	2,17	2,24	2,27	2,31
Cápsula Nº	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula	70,2	154	125,6	129,4
Peso suelo seco + cápsula	69,3	148,1	119,6	120,7
Peso del agua	0,9	5,9	6	8,70
Peso de la cápsula	18,1	18,1	18,6	22,6
Peso suelo seco	51,2	130	101,00	98,10
Contenido de humedad (%h)	1,76	4,54	5,94	8,87
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	2,13	2,15	2,15	2,12

*Fuente:* Elaboración Propia

**Gráfica 8. Curva de Compactación del material en el Molde T-180.**





Fuente: Elaboración Propia

Densidad Máxima	2,15 gr/cm <sup>3</sup>
Humedad Óptima	4,95 %

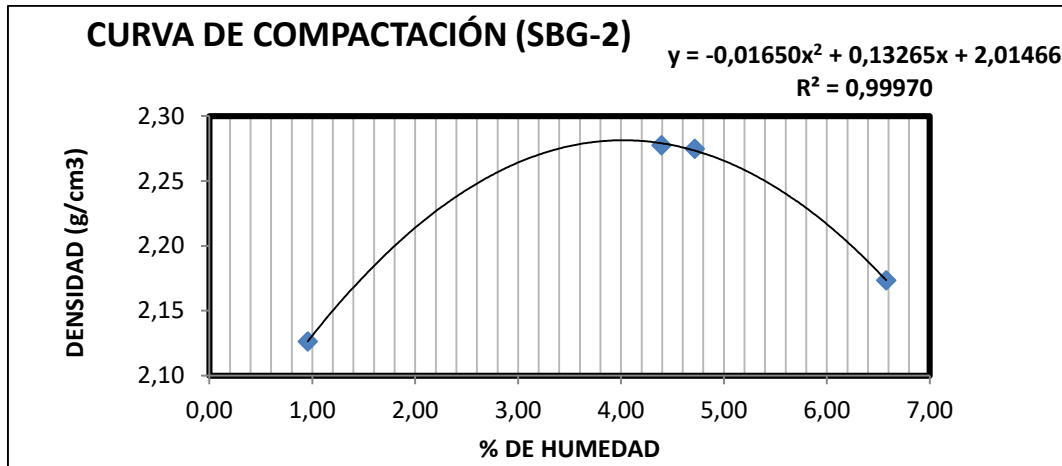
Muestra (SBG-2).

Tabla 21. Ensayo de compactación AASTHO T-180.

SBG-2: A-1-b(0)				
Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11010	11500	11510	11370
Peso del molde	6450	6450	6450	6450
Peso suelo húmedo	4560	5050	5060	4920
Volumén de la muestra	2124,0	2124,0	2124,0	2124,0
Densidad suelo húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	2,15	2,38	2,38	2,32
Cápsula Nº	119	132	134	125
Peso suelo húmedo + capsula	123,6	105,4	117,3	175,3
Peso suelo seco + cápsula	122,6	101,7	112,8	165,6
Peso del agua	1	3,7	4,5	9,7
Peso de la cápsula	18,1	17,5	17,4	18,1
Peso suelo seco	104,5	84,2	95,4	147,5
Contenido de humedad (%h)	0,96	4,39	4,72	6,58
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	2,13	2,28	2,27	2,17

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 9. Curva de Compactación del material en el Molde T-180.



Fuente: Elaboración Propia

Densidad Máxima	2,28 gr/cm <sup>3</sup>
Humedad Optima	4,02 %

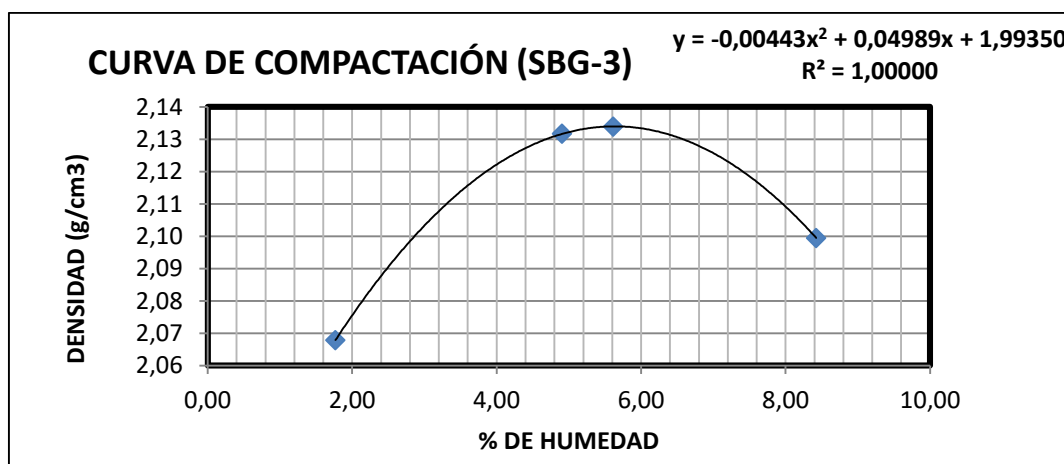
Muestra (SBG-3).

Tabla 22. Ensayo de compactación AASTHO T-180.

SBG-3: A-1-a(0)				
Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	10925	11205	11242	11290
Peso del molde	6455	6455	6455	6455
Peso suelo húmedo	4470	4750	4787	4835
Volumén de la muestra	2124,0	2124,0	2124,0	2124,0
Densidad suelo húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	2,10	2,24	2,25	2,28
Cápsula Nº	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula	54,8	66	99,7	148,7
Peso suelo seco + cápsula	54,2	63,9	95,6	138,6
Peso del agua	0,6	2,1	4,1	10,10
Peso de la cápsula	20,3	21,1	22,6	18,7
Peso suelo seco	33,9	42,8	73,00	119,90
Contenido de humedad (%h)	1,77	4,91	5,62	8,42
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	2,07	2,13	2,13	2,10

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 10. Curva de Compactación del material en el Molde T-180.



Fuente: Elaboración Propia

Densidad Máxima	2,13 gr/cm <sup>3</sup>
Humedad Óptima	5,63 %

Tabla 23. Tabla de resultados de la compactación

SUB-BASE	CLASIFICACIÓN	COMPACTACIÓN	
		Dmax	HOC
1	A-1-a (0)	2,15	4,95
2	A-1-b(0)	2,28	4,02
3	A-1-a(0)	2,13	5,63

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.1.6. RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)

Este ensayo tiene como finalidad conocer cuál es la relación entre la penetración que se realiza a un suelo y la capacidad de soporte del mismo, considerando como material de la capa sub-base.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación modificada.

#### Compensación del material.

Antes de proceder a la compactación de la muestra en los respectivos moldes por el método Proctor Modificado T-180, se realiza la compensación del material; se procede a cuartear aproximadamente 25 Kg., de muestra de suelo, de esta muestra cuarteadas se

tamizan en los tamices  $\frac{3}{4}$ ", del material retenido en dicho tamiz se pesan en las mismas proporciones, de tal forma que se obtenga un peso total de 21 Kg. aproximadamente y luego se mezcla en forma uniforme para luego utilizar esta muestra de suelo en la compactación.

#### **PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:**

**Figura 34. Porcentaje que pasa el tamiz  $\frac{3}{4}$ ".**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 35. Compactado y pesado de la muestra.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 36. Medición de la expansión y escurrimiento de los moldes después de los cuatro días de saturación.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 37. Medición de la carga y expansión de la muestra.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 38. Extracción y peso de la muestra de cada C.B.R. después de la penetración.**



*Fuente:* Elaboración Propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

### Muestra (SBG-1).

**Tabla24. Contenido de humedad y peso unitario.**

Muestra	LL	IP	Clasific.	H. Opt.	D. M áx
1		0	A-1a(0)	4,95	2,15

Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12615	12925	12800	13075	12905	13060			
Peso Molde	8032,9	8032,9	7999,8	7999,8	7949,8	7949,8			
Peso muestra húmeda	4582,1	4892,1	4800,2	5075,2	4955,2	5110,2			
Volumen de la muestra	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9			
Peso Unit. Muestra Húm.	2,177	2,324	2,280	2,411	2,354	2,428			
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	108,9	111,6	142,5	82,9	74,8	70,1	82	77,5	81
Peso muestra seca + tara	102,1	104,3	131,4	77,5	70,2	66,4	78	72,1	76,4
Peso del agua	6,8	7,3	11,1	5,4	4,6	3,7	4	5,4	4,6
Peso de tara	17,2	17,5	17,4	20,2	21,2	20,9	20,8	20,4	20,1
Peso de la muestra seca	84,9	86,8	114	57,3	49	45,5	57,2	51,7	56,3
Contenido humedad %	8,009	8,4101	9,7368	9,4241	9,388	8,1319	6,993	10,44	8,1705
Promedio cont. Humedad	8,21	9,7368	9,41	8,1319	8,72	8,1705			
Peso Unit.muestra seca	2,012	2,1179	2,084	2,2298	2,165	2,2444			

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
4,95	2,15

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla25. Expansión de la muestra (SBG-1).**

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION	
			EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%
10-nov	18:20	1	23	2,3	0	14	1,4	0	10	1	0
11-nov	18:15	2	23	2,3	0	14	1,4	0	10	1	0
12-nov	18:30	3	23	2,3	0	14	1,4	0	10	1	0
13-nov	11:00	4	23	2,3	0	14	1,4	0	10	1	0

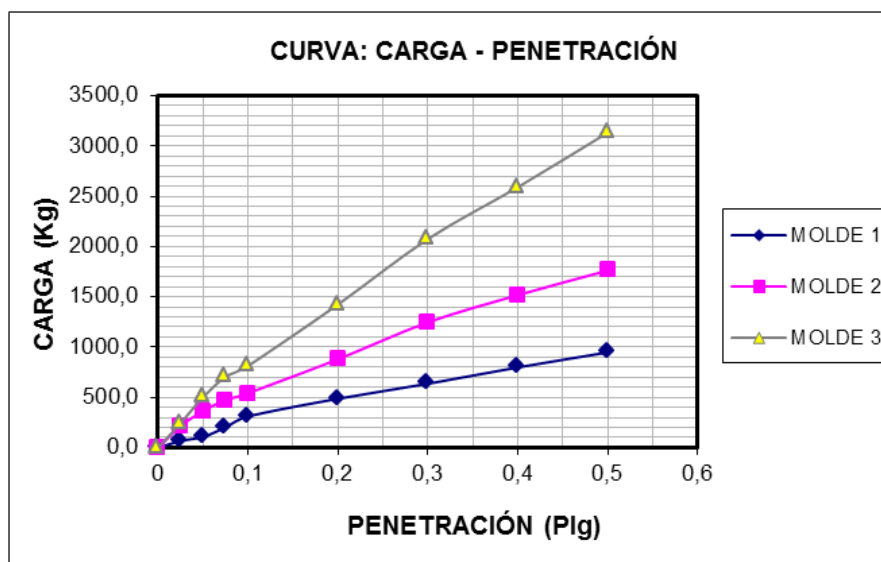
C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
22,9	2,012
39,8	2,084
59,9	2,165

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla26. California Bearing Ratio (C.B.R.)**

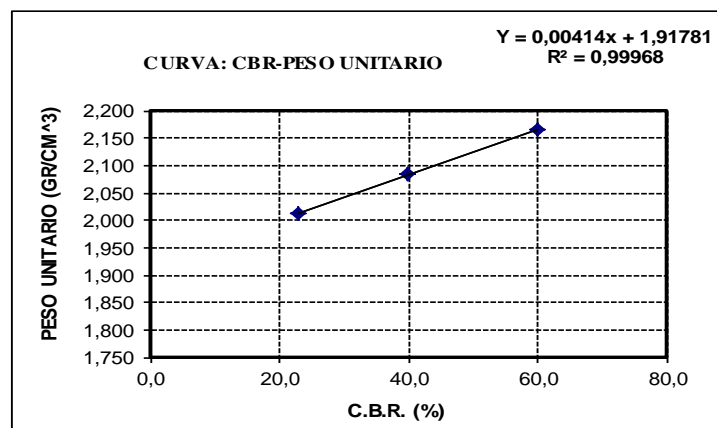
PENETRACION		CARGA NORMAL	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		66,9	3,5			216,2	11,2			245,2	12,7		
0,05	1,27		107,6	5,6			365,4	18,9			503,0	26,0		
0,075	1,9		202,6	10,5			474,0	24,5			706,5	36,5		
0,1	2,54	1360	311,2	16,1		<b>22,9</b>	541,8	28,0		<b>39,8</b>	815,1	42,1		<b>59,9</b>
0,2	5,08	2040	487,6	25,2		<b>23,9</b>	881,1	45,5		<b>43,2</b>	1425,7	73,7		<b>69,9</b>
0,3	7,62		636,8	32,9			1247,4	64,5			2077,0	107,3		
0,4	10,16		799,6	41,3			1518,8	78,5			2592,6	134,0		
0,5	12,7		948,9	49,0			1763,0	91,1			3135,4	162,0		

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica11. Curva de carga Vs Penetración**

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 12. C.B.R. Vs Peso Unitario.**



Fuente: Elaboración Propia

CBR 100% D.máx
<b>56 %</b>
CBR 95% D.Máx.
<b>30 %</b>

Muestra (SBG-2).

**Tabla27. Contenido de humedad y peso unitario.**

Muestra	LL	IP	Clasific.	H. Opt.	D. Máx
3	25	0	A-1+b(0)	4,02	2,28

Nº capas	5		5		5				
Nº golpes por capa	12		25		56				
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M			
Peso muestra húm.+molde	12780	12970	12100	12300	12500	12635			
Peso Molde	8062,2	8062,2	7181,3	7181,3	7251,1	7251,1			
Peso muestra húmeda	4717,8	4907,8	4918,7	5118,7	5248,9	5383,9			
Volumen de la muestra	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9			
Peso Unit. Muestra Húm.	2,241	2,332	2,337	2,432	2,494	2,558			
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	107,8	138,2	125,9	95,2	113	137,3	89,4	105,7	119,5
Peso muestra seca + tara	98,2	126,3	116,1	90,5	107,6	127,6	84,4	98,4	112,1
Peso del agua	9,6	11,9	9,8	4,7	5,4	9,7	5	7,3	7,4
Peso de tara	17,3	17,3	17,1	16,9	17,4	17,6	18,7	18,2	17,7
Peso de la muestra seca	80,9	109	99	73,6	90,2	110	65,7	80,2	94,4
Contenido humedad %	11,87	10,917	9,899	6,3859	5,987	8,8182	7,6104	9,102	7,839
Promedio cont. Humedad	11,39		9,899	6,19		8,8182	8,36		7,839
Peso Unit.muestra seca	2,012	2,1216	2,201	2,2347	2,301	2,3719			

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
4,02	2,28

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla28. Expansión de la muestra (SBG-2).**



FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE N°1			MOLDE N°2			MOLDE N°3			C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
			LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION			
			EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%		
04-abr	18:20	1	8	0,8	0	2,4	8	0	7	0,7	0	30,9	2,012
05-abr	18:15	2	8	0,8	0	2,47	8	0	7	0,7	0	46,8	2,201
06-abr	18:30	3	8	0,8	0	2,47	8	0	7	0,7	0	59,9	2,301
07-abr	11:00	4	8	0,8	0	2,47	8	0	7	0,7	0		

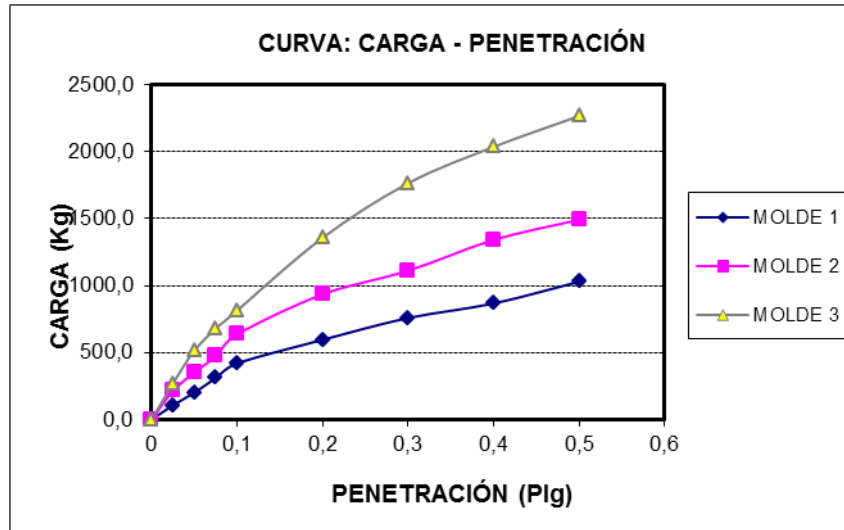
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla29. California Bearing Ratio (C.B.R.)**

PENETRACION		CARGA NORMAL	MOLDE N° 1				MOLDE N° 2				MOLDE N° 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		107,6	5,6			216,2	11,2			272,3	14,1		
0,05	1,27		202,6	10,5			351,9	18,2			516,6	26,7		
0,075	1,9		311,2	16,1			474,0	24,5			679,4	35,1		
0,1	2,54	1360	419,7	21,7		<b>30,9</b>	636,8	32,9		<b>46,8</b>	815,1	42,1		<b>59,9</b>
0,2	5,08	2040	596,1	30,8		<b>29,2</b>	935,3	48,3		<b>45,8</b>	1357,8	70,2		<b>66,6</b>
0,3	7,62		758,9	39,2			1111,7	57,4			1764,9	91,2		
0,4	10,16		867,5	44,8			1342,4	69,4			2036,3	105,2		
0,5	12,7		1030,3	53,2			1491,7	77,1			2267,0	117,1		

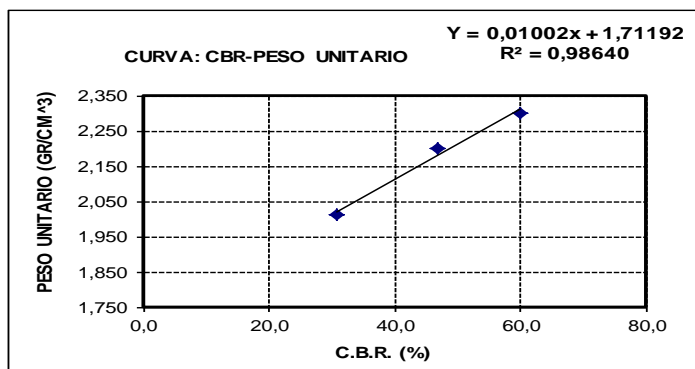
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 13. Curva de carga Vs Penetración**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 14. C.B.R. Vs Peso Unitario.**



Fuente: Elaboración Propia

CBR 100% D.máx	<b>57 %</b>
CBR 95% D.Máx.	<b>45 %</b>

Muestra (SBG-3).

**Tabla30. Contenido de humedad y peso unitario.**

Muestra	LL	IP	Clasific.	H. Opt.	D. Máx
3	33	0	A-1-a(0)	5,63	2,13

Nº capas	5		5			5						
Nº golpes por capa	12		25			56						
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse		D. de M		Antes de mojarse		D. de M		Antes de mojarse		D. de M	
Peso muestra húm.+molde	12530	12725	12010	12165	12200	12315						
Peso Molde	7945,9	7945,9	7235,6	7235,6	7276,6	7276,6						
Peso muestra húmeda	4584,1	4779,1	4774,4	4929,4	4923,4	5038,4						
Volumen de la muestra	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9						
Peso Unit. Muestra Húm.	2,178	2,270	2,268	2,342	2,339	2,394						
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2º sup.	Fondo	Superf.	2º sup.	Fondo	Superf.	2º sup.	Fondo	Superf.	2º sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
Peso muestra húm + tara	115,7	127,9	118	95,1	97,1	106,5	91,6	88,8	97,2			
Peso muestra seca + tara	108,4	118,8	111,2	89	90,6	100,1	87,8	83,7	93			
Peso del agua	7,3	9,1	6,8	6,1	6,5	6,4	3,8	5,1	4,2			
Peso de tara	17,7	18,1	18,6	17,2	17,4	17,4	17,8	17,7	17,5			
Peso de la muestra seca	90,7	100,7	92,6	71,8	73,2	82,7	70	66	75,5			
Contenido humedad %	8,049	9,0367	7,3434	8,4958	8,88	7,7388	5,4286	7,727	5,5629			
Promedio cont. Humedad	8,54		7,3434	8,69		7,7388	6,58		5,5629			
Peso Unit.muestra seca	2,006		2,1151	2,087		2,1737	2,195		2,2675			

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
5,63	2,13

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla31. Expansión de la muestra (SBG-3).**

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE N°1			MOLDE N°2			MOLDE N°3			C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
			LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION			
			EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%		
10-nov	18:20	1	24,9	2,49	0	23,54	2,354	0	24,8	2,48	0	24,9	2,006
11-nov	18:15	2	24,9	2,49	0	23,54	2,354	0	24,8	2,48	0	44,8	2,087
12-nov	18:30	3	24,9	2,49	0	23,54	2,354	0	24,8	2,48	0	61,9	2,195
13-nov	11:00	4	24,9	2,49	0	23,54	2,354	0	24,8	2,48	0		

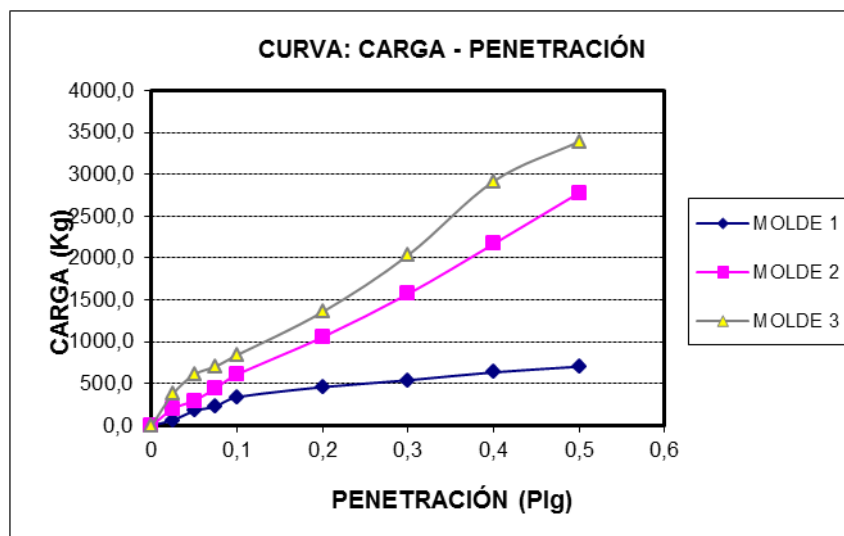
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla32. California Bearing Ratio (C.B.R.)**

PENETRACION		CARGA NORMAL	MOLDE N° 1				MOLDE N° 2				MOLDE N° 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		66,9	3,5			202,6	10,5			380,9	19,7		
0,05	1,27		175,5	9,1			297,6	15,4			611,5	31,6		
0,075	1,9		229,7	11,9			446,8	23,1			706,5	36,5		
0,1	2,54	1360	338,3	17,5		<b>24,9</b>	609,7	31,5		<b>44,8</b>	842,2	43,5		<b>61,9</b>
0,2	5,08	2040	460,4	23,8		<b>22,6</b>	1057,5	54,6		<b>51,8</b>	1357,8	70,2		<b>66,6</b>
0,3	7,62		541,8	28,0			1573,1	81,3			2036,3	105,2		
0,4	10,16		636,8	32,9			2170,1	112,1			2918,3	150,8		
0,5	12,7		704,7	36,4			2780,7	143,7			3393,2	175,3		

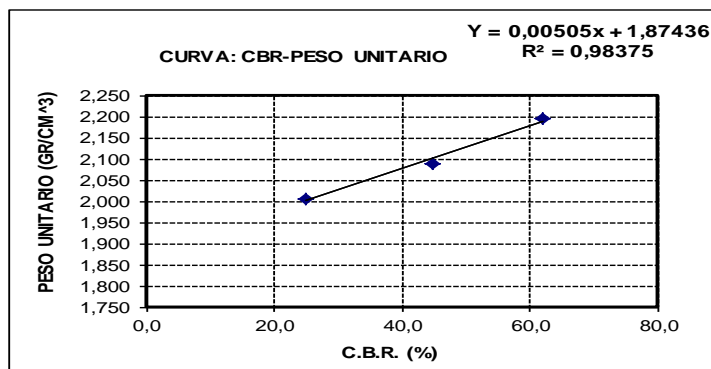
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 15. Curva de carga Vs Penetración**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 16. C.B.R. Vs Peso Unitario.**



Fuente: Elaboración Propia

CBR 100% D.máx	51 %
CBR 95% D.Máx.	30 %

**Tabla33. Tabla de resultados de California Bearing Ratio (C.B.R.)**

SUB-BASE	C.B.R.		CLASIFICACIÓN
	100%	95%	C.B.R. AASHTO T193 100%
1	56	30	30-60
2	57	45	30-60
3	51	30	30-60

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. RECOMPACTACIÓN DE LA SUB-BASE GRANULAR.

Se usó el mismo espécimen para obtener todos los puntos de la curva, esto causa una deformación volumétrica de tipo plástico que causo la compactación. La compactación muy intensa puede producir un fragmento de las partículas y originar un material susceptible al agrietamiento. En la recompactación de la sub-base se hizo variar la energía de compactación manteniendo la humedad óptima, para las tres sub-base granular.

#### 3.3.1. COMPACTACIÓN

En este ensayo se hace variar la energía y manteniendo la humedad óptima, se realizó la siguiente relación:

**Compactación de 7 pasadas de 66 golpes**

$$X = 100\% * \frac{7\text{pasadas}}{6\text{pasadas}} = 117\% \text{ El porcentaje de compactación}$$

$$Y = 56 \text{ golpes} * \frac{117\%}{100\%} = 66 \text{ golpes}$$

### Compactación de 8 pasadas de 75 golpes

$$X = 100\% * \frac{8\text{pasadas}}{6\text{pasadas}} = 134\% \text{ El porcentaje de compactación}$$

$$Y = 56 \text{ golpes} * \frac{134\%}{100\%} = 75 \text{ golpes}$$

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Muestra (SBG-1) 66 golpes.

**Tabla 34. Tabla de recompactación de la SBG-1 (66 golpes).**

Nº de capas	5	5	5
Nº de golpes por capa	66	66	66
Peso suelo húmedo + molde	11293	11258	11275
Peso del molde	6460	6460	6460
Peso suelo húmedo	4833	4798	4815
Volumén de la muestra	2124,0	2124,0	2124,0
Densidad suelo húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	2,28	2,26	2,27
Cápsula Nº	2	2	2
Peso suelo húmedo + capsula	86,1	123,6	105,6
Peso suelo seco + cápsula	82,9	118,7	101,5
Peso del agua	3,2	4,9	4,1
Peso de la cápsula	18,4	19,8	18,5
Peso suelo seco	64,5	98,9	83
Contenido de humedad (%h)	4,96	4,95	4,94
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	2,17	2,15	2,16

*Fuente:* Elaboración Propia

Muestra (SBG-1) 75 golpes.

**Tabla 35. Tabla de recompactación de la SBG-1 (75 golpes).**

Nº de capas	5	5	5
Nº de golpes por capa	75	75	75
Peso suelo húmedo + molde	11310	11285	11340
Peso del molde	6460	6460	6460
Peso suelo húmedo	4850	4825	4880

<b>Volumén de la muestra</b>	2124,0	2124,0	2124,0
<b>Densidad suelo húmedo (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,28	2,27	2,30
<b>Cápsula N°</b>	3	3	3
<b>Peso suelo húmedo + cápsula</b>	95,6	102	76,6
<b>Peso suelo seco + cápsula</b>	92	98	73,9
<b>Peso del agua</b>	3,6	4	2,7
<b>Peso de la cápsula</b>	19,3	18,6	18,1
<b>Peso suelo seco</b>	72,7	79,4	55,8
<b>Contenido de humedad (%h)</b>	4,95	5,04	4,84
<b>Densidad suelo seco (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,18	2,16	2,19

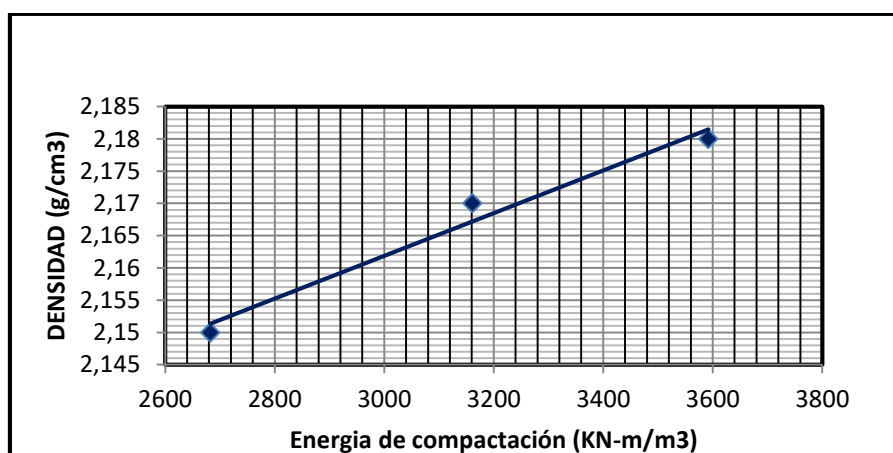
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 36. Tabla de resultados de la variación de densidad normal a densidad recompactación.**

<b>Muestra</b>	<b>Número de golpes por capa</b>	<b>Densidad Promedio (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Energía de compactación (KN-m/m<sup>3</sup>)</b>
SBG-1	56	2,15	2682,1
	66	2,17	3161
	75	2,18	3592,1

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 17. Relación densidad Vs Energía de compactación.**



Fuente: Elaboración Propia

**Muestra (SBG-2) 66 golpes.**

**Tabla 37. Tabla de recompactación de la SBG-2 (66 golpes).**

<b>Nº de capas</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>Nº de golpes por capa</b>	<b>66</b>	<b>66</b>	<b>66</b>
<b>Peso suelo húmedo + molde</b>	11515	11515	11515
<b>Peso del molde</b>	6450	6450	6450
<b>Peso suelo húmedo</b>	5065	5065	5065
<b>Volumen de la muestra</b>	2124,0	2124,0	2124,0
<b>Densidad suelo húmedo (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,38	2,38	2,38
<b>Cápsula Nº</b>	2	2	2
<b>Peso suelo húmedo + capsula</b>	105,4	101,2	137,1
<b>Peso suelo seco + cápsula</b>	100,7	98	132,5
<b>Peso del agua</b>	4,7	3,2	4,6
<b>Peso de la cápsula</b>	17,5	17,6	17,4
<b>Peso suelo seco</b>	83,2	80,4	115,1
<b>Contenido de humedad (%h)</b>	4,09	3,98	4,00
<b>Densidad suelo seco (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,29	2,29	2,29

*Fuente:* Elaboración Propia

**Muestra (SBG-2) 75 golpes.**

**Tabla 38. Tabla de recompactación de la SBG-2 (75 golpes).**

<b>Nº de capas</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>Nº de golpes por capa</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>75</b>
<b>Peso suelo húmedo + molde</b>	11530	11530	11530
<b>Peso del molde</b>	6450	6450	6450
<b>Peso suelo húmedo</b>	5080	5080	5080
<b>Volumén de la muestra</b>	2124,0	2124,0	2124,0
<b>Densidad suelo húmedo (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,39	2,39	2,39
<b>Cápsula Nº</b>	3	3	3
<b>Peso suelo húmedo + capsula</b>	111,7	109,8	118,9
<b>Peso suelo seco + cápsula</b>	106,5	106,3	115
<b>Peso del agua</b>	5,2	3,5	3,9
<b>Peso de la cápsula</b>	17,6	18,6	17,6
<b>Peso suelo seco</b>	88,9	87,7	97,4

<b>Contenido de humedad (%h)</b>	4,06	3,99	4,00
<b>Densidad suelo seco (gr/cm3)</b>	2,30	2,30	2,30

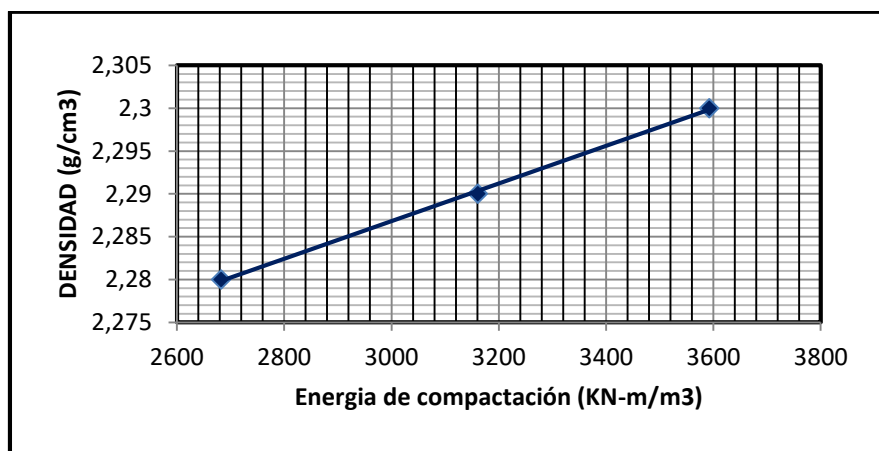
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 39. Tabla de resultados de la variación de densidad normal a densidad recompactación.**

<b>Muestra</b>	<b>Numero de golpes por capa</b>	<b>Densidad promedio (gr/cm3)</b>	<b>Energía de compactación (KN-m/m3)</b>
SBG-2	56	2,28	2682,1
	66	2,29	3161
	75	2,30	3592,1

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 18. Relación densidad Vs Energía de compactación.**



Fuente: Elaboración Propia

**Muestra (SBG-3) 66 golpes.**

**Tabla 40. Tabla de recompactación de la SBG-3 (66 golpes).**

<b>Nº de capas</b>	5	5	5
<b>Nº de golpes por capa</b>	66	66	66
<b>Peso suelo húmedo + molde</b>	11228	11230	11228
<b>Peso del molde</b>	6450	6450	6450
<b>Peso suelo húmedo</b>	4778	4780	4778



Volumén de la muestra	2124,0	2124,0	2124,0
Densidad suelo húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	2,25	2,25	2,25
Cápsula N°	2	2	2
Peso suelo húmedo + capsula	81,3	81,3	91,9
Peso suelo seco + cápsula	78,1	78,1	88,1
Peso del agua	3,2	3,2	3,8
Peso de la cápsula	21,4	21,2	20,7
Peso suelo seco	56,7	56,9	67,4
Contenido de humedad (%h)	5,64	5,62	5,64
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	2,13	2,13	2,13

*Fuente:* Elaboración Propia

Muestra (SBG-3) 75 golpes.

*Tabla 41.* Tabla de recompactación de la SBG-3 (75 golpes).

N° de capas	5	5	5
N° de golpes por capa	75	75	75
Peso suelo húmedo + molde	11249	11262	11249
Peso del molde	6450	6450	6450
Peso suelo húmedo	4799	4812	4799
Volumen de la muestra	2124,0	2124,0	2124,0
Densidad suelo húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	2,26	2,27	2,26
Cápsula N°	1	2	3
Peso suelo húmedo + capsula	87	87	101
Peso suelo seco + cápsula	83,5	83,5	96,7
Peso del agua	3,5	3,5	4,3
Peso de la cápsula	21,4	21,3	20,4
Peso suelo seco	62,1	62,2	76,3
Contenido de humedad (%h)	5,64	5,63	5,64
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	2,14	2,14	2,14

*Fuente:* Elaboración Propia

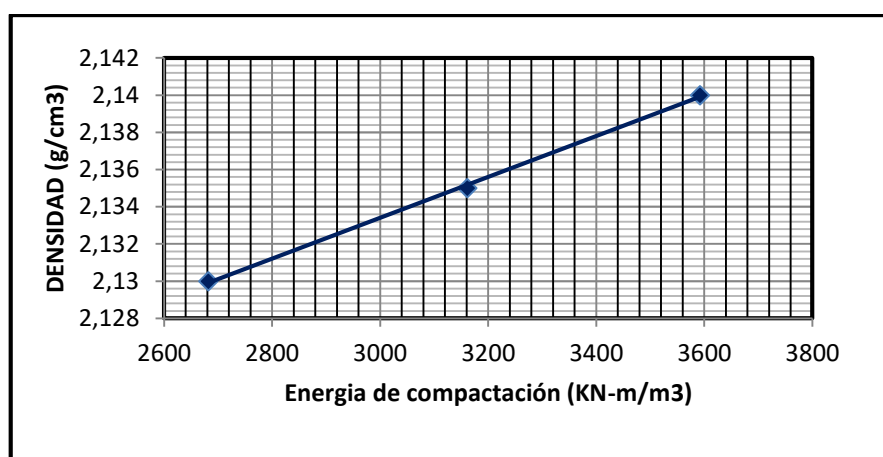
*Tabla 42.* Tabla de resultados de la variación de densidad normal a recompactada.

Muestra	Numero de golpes por capa	Densidad promedio (gr/cm <sup>3</sup> )	Energía de compactación (KN-m/m <sup>3</sup> )
---------	---------------------------	---	--

SBG-3	56	2,13	2682,1
	66	2,135	3161
	75	2,14	3592,1

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 19. Relación densidad Vs Energía de compactación.**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.1.1. GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS RECOMPACTADOS

#### RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

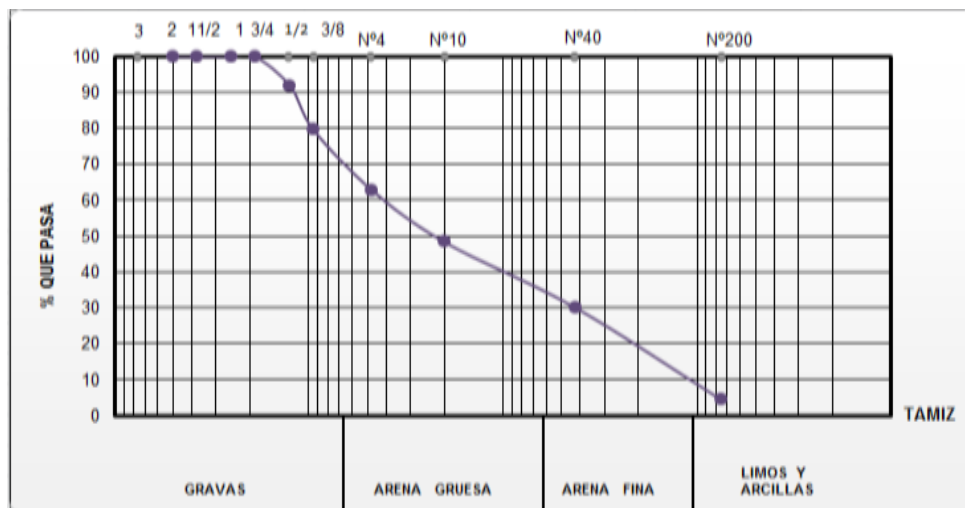
#### Granulometría Muestra (SBG-1) 66 golpes.

**Tabla 43. Granulométrica de la muestra SBG-1(66 golpes)**

Peso Total (gr.)			4000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2"	12,50	328,60	328,60	8,22	<b>91,78</b>
3/8"	9,50	484,80	813,40	20,34	<b>79,66</b>
Nº4	4,75	673,80	1487,20	37,19	<b>62,81</b>
Nº10	2,00	580,10	2067,30	51,70	<b>48,30</b>
Nº40	0,43	729,10	2796,40	69,93	<b>30,07</b>
Nº200	0,075	1027,20	3823,60	95,62	<b>4,38</b>
BASE	-	175,30	3998,90	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 20. Distribución granulométrica del material SBG-1 (66 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

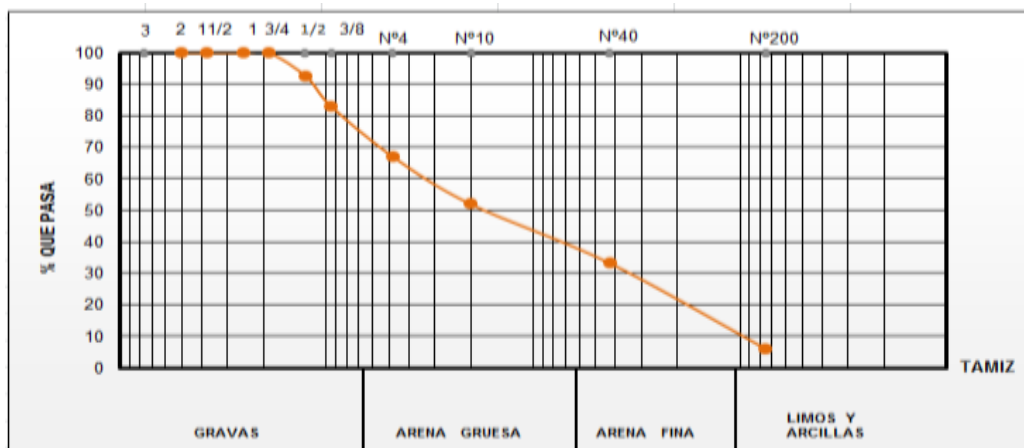
**Granulometría Muestra (SBG-1) 75 golpes.**

**Tabla 44. Granulométrica de la muestra SBG-1(75 golpes).**

Peso Total (gr.)		4000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	304,60	304,60	7,62	92,38
3/8"	9,50	374,80	679,40	16,99	83,01
N°4	4,75	643,80	1323,20	33,08	66,92
N°10	2,00	599,20	1922,40	48,06	51,94
N°40	0,43	749,10	2671,50	66,79	33,21
N°200	0,075	1087,20	3758,70	93,97	6,03
BASE	-	241,20	3999,90	100,00	0,00

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 21. Distribución granulométrica del material SBG-1 (75 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

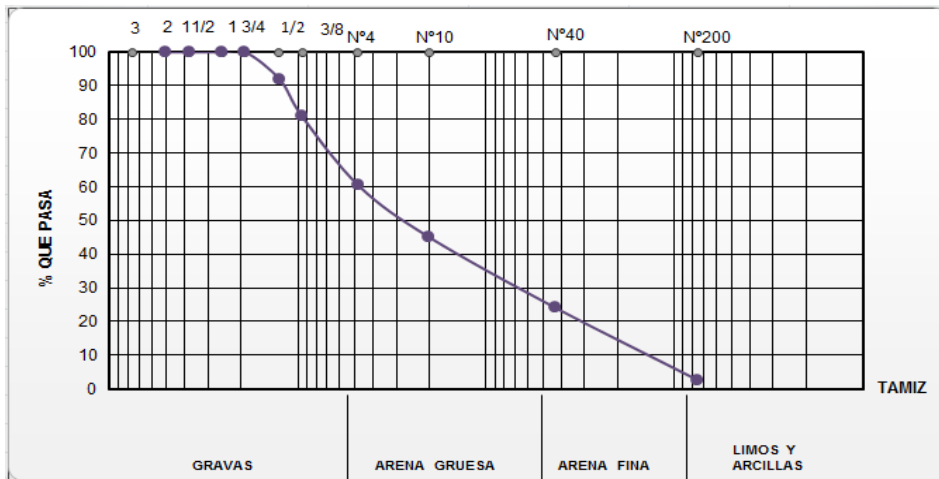
### Granulometría Muestra (SBG-2) 66 golpes.

Tabla 45. Granulométrica de la muestra SBG-2 (66 golpes).

Peso Total (gr.)			4000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75		0,00	0,00	100,00
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	324,50	324,50	8,12	91,88
3/8"	9,50	441,40	765,90	19,16	80,84
N°4	4,75	823,40	1589,30	39,75	60,25
N°10	2,00	611,50	2200,80	55,04	44,96
N°40	0,43	840,50	3041,30	76,06	23,94
N°200	0,075	855,90	3897,20	97,47	2,53
BASE	-	101,10	3998,30	100,00	0,00

Fuente: Elaboración Propia

### Gráfica 22. Distribución granulométrica del material SBG-2 (66 golpes).



Fuente: Elaboración Propia

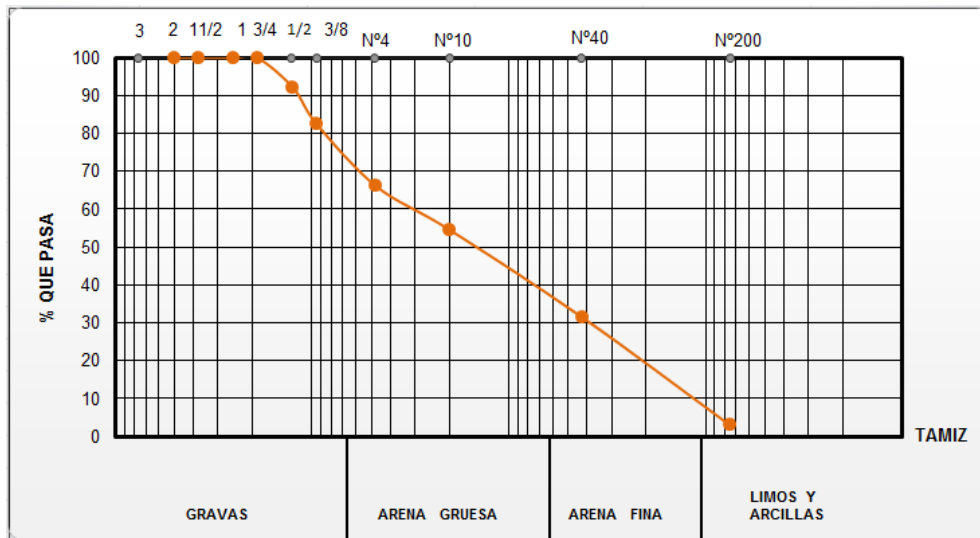
### Granulometría Muestra (SBG-2) 75 golpes.

Tabla 46. Granulométrica de la muestra SBG-2 (75 golpes).

Peso Total (gr.)		4000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	314,80	314,80	7,87	92,13
3/8"	9,50	381,70	696,50	17,42	82,58
N°4	4,75	655,40	1351,90	33,81	66,19
N°10	2,00	464,20	1816,10	45,43	54,57
N°40	0,43	921,50	2737,60	68,47	31,53
N°200	0,075	1141,50	3879,10	97,03	2,97
BASE	-	118,90	3998,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración Propia

### Gráfica 23. Distribución granulométrica del material SBG-2 (75 golpes).



*Fuente:* Elaboración Propia

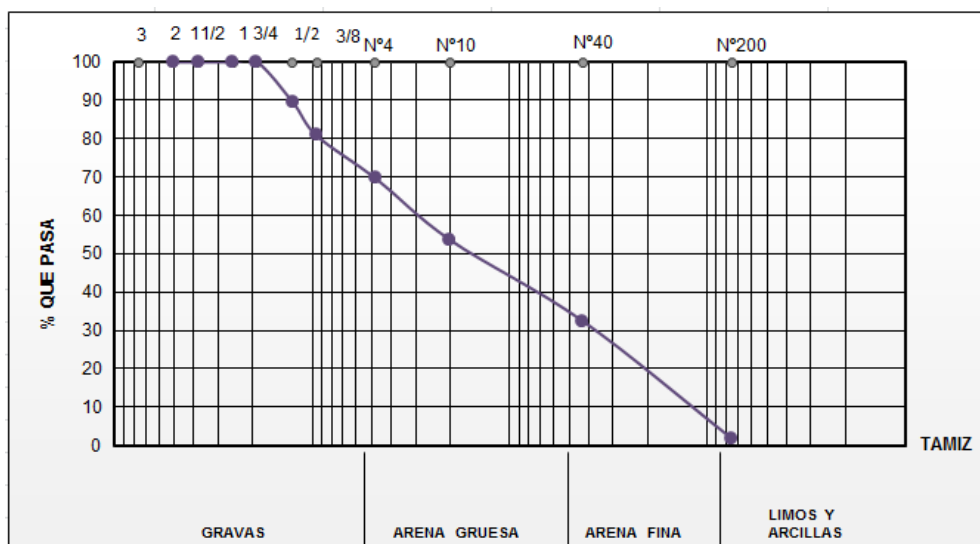
**Granulometría Muestra (SBG-3) 66 golpes.**

**Tabla 47. Granulométrica de la muestra SBG-3 (66 golpes)**

Peso Total (gr.)		4000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	426,20	426,20	10,66	89,34
3/8"	9,50	341,90	768,10	19,22	80,78
N°4	4,75	450,00	1218,10	30,47	69,53
N°10	2,00	639,40	1857,50	46,47	53,53
N°40	0,43	847,20	2704,70	67,66	32,34
N°200	0,075	1224,40	3929,10	98,29	1,71
BASE	-	68,20	3997,30	100,00	0,00

*Fuente:* Elaboración Propia

**Gráfica 24. Distribución granulométrica del material SBG-3 (66 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

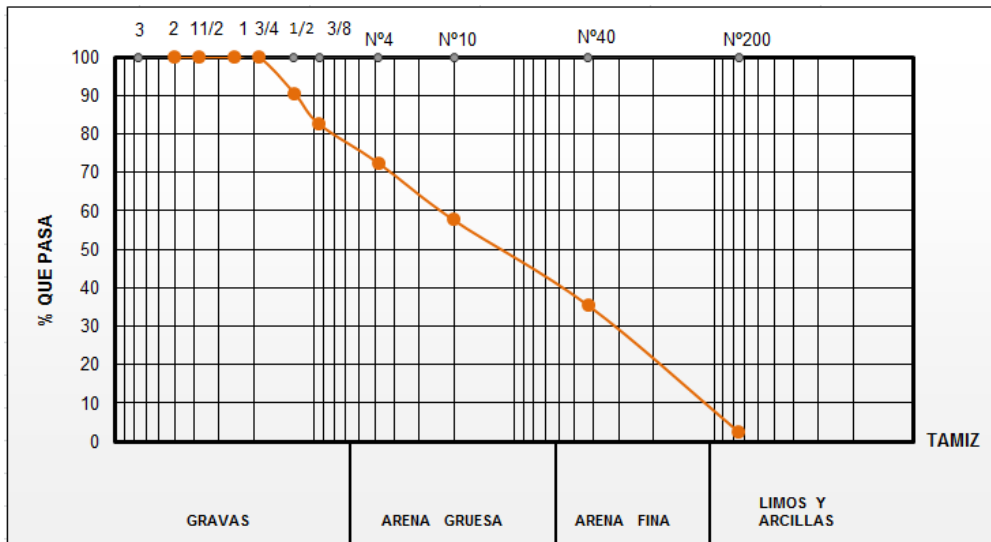
### Granulometría Muestra (SBG-3) 75 golpes.

**Tabla 48. Granulométrica de la muestra SBG-3(75 golpes).**

Peso Total (gr.)		4000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2"	12,50	386,20	386,20	9,66	<b>90,34</b>
3/8"	9,50	308,90	695,10	17,39	<b>82,61</b>
N°4	4,75	411,50	1106,60	27,68	<b>72,32</b>
N°10	2,00	590,40	1697,00	42,45	<b>57,55</b>
N°40	0,43	887,20	2584,20	64,65	<b>35,35</b>
N°200	0,075	1314,50	3898,70	97,53	<b>2,47</b>
BASE	-	98,70	3997,40	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

### Gráfica 25. Distribución granulométrica del material SBG-3 (75 golpes).



*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.3.2. RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (C.B.R.)

Después de la evaluación de calidad, un mismo espécimen fue compactado sucesivamente y después de cada compactación se evaluó su granulometría y su respuesta mecánica en términos de: (i) CBR. Por último, se analizó el comportamiento de los materiales de sub-base, al ser sometidos a estos procesos sucesivos de compactación, a partir de los resultados de estos ensayos.

El ensayo de CBR (según norma AASTHO) inició con la compactación y ensayo de muestras a humedad óptima de compactación y de saturación (luego del cuarto día de inmersión), secado y disgregación del material, para luego repetir el proceso dos veces más para generar las probetas de evaluación de recompactación 66 golpes, 75 golpes y se calcula con los porcentajes siguientes:

#### **Compactación del C.B.R de 7 pasadas de 66 golpes**

$$X = 56 * \frac{117\%}{100\%} = 66 \text{ golpes}$$

$$Y = 25 * \frac{117\%}{100\%} = 30 \text{ golpes}$$

$$Y = 12 * \frac{134\%}{100\%} = 14 \text{ golpes}$$

#### **Compactación del C.B.R de 7 pasadas de 75 golpes**

$$X = 56 * \frac{134\%}{100\%} = 75 \text{ golpes}$$



$$Y = 25 * \frac{134\%}{100\%} = 34 \text{ golpes}$$

$$Y = 12 * \frac{134\%}{100\%} = 16 \text{ golpes}$$

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Muestra (SBG-1) 66 golpes.

**Tabla49. Contenido de humedad y peso unitario SBG-1(66 golpes).**

Muestra	LL	IP	Clasific.	H. Opt.	D. Máx
1	0	0	A-1a(0)	4,95	2,16

Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	14			30			66		
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12625		12945	12860		13085	12955		13078
Peso Molde	8032,9		8032,9	7999,8		7999,8	7949,8		7949,8
Peso muestra húmeda	4592,1		4912,1	4860,2		5085,2	5005,2		5128,2
Volumen de la muestra	2104,9		2104,9	2104,9		2104,9	2104,9		2104,9
Peso Unit. Muestra Húm.	2,182		2,334	2,309		2,416	2,378		2,436
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	80	84,5	67,8	87	78,1	118,9	83,6	88,3	111
Peso muestra seca + tara	75,4	79,8	64,4	81,3	73,4	111,5	78,6	82,2	104,2
Peso del agua	4,6	4,7	3,4	5,7	4,7	7,4	5	6,1	6,8
Peso de tara	17,2	17,5	17,4	20,2	21,2	20,9	20,8	20,4	20,1
Peso de la muestra seca	58,2	62,3	47	61,1	52,2	90,6	57,8	61,8	84,1
Contenido humedad %	7,904	7,5441	7,234	9,329	9,004	8,1678	8,6505	9,871	8,0856
Promedio cont. Humedad	7,72		7,234	9,17		8,1678	9,26		8,0856
Peso Unit.muestra seca	2,025		2,1762	2,115		2,2335	2,176		2,2541

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
4,95	2,16

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla50. Expansión de la muestra SBG-1(66 golpes).**

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION	
			EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%
10-nov	18:20	1	24	2,4	0	16	1,6	0	13	1,3	0
11-nov	18:15	2	24	2,4	0	16	1,6	0	13	1,3	0
12-nov	18:30	3	24	2,4	0	16	1,6	0	13	1,3	0
13-nov	16:00	4	24	2,4	0	16	1,6	0	13	1,3	0

C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
21,9	2,025
37,8	2,115
53,9	2,176

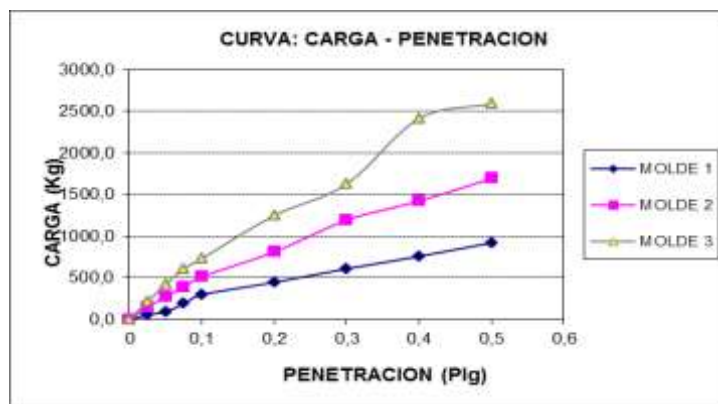
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 51. California Bearing Ratio (C.B.R.) de la muestra SBG-1(66 golpes).**

PENETRACION		CARGA NORMAL	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		53,3	2,8			148,3	7,7			218,0	11,3		
0,05	1,27		94,1	4,9			270,5	14,0			421,6	21,8		
0,075	1,9		189,0	9,8			392,6	20,3			611,5	31,6		
0,1	2,54	1360	297,6	15,4		21,9	514,7	26,6		37,8	733,7	37,9		53,9
0,2	5,08	2040	446,8	23,1		21,9	813,2	42,0		39,9	1249,3	64,5		61,2
0,3	7,62		609,7	31,5			1193,1	61,6			1629,2	84,2		
0,4	10,16		758,9	39,2			1423,8	73,6			2416,2	124,8		
0,5	12,7		921,8	47,6			1695,2	87,6			2592,6	134,0		

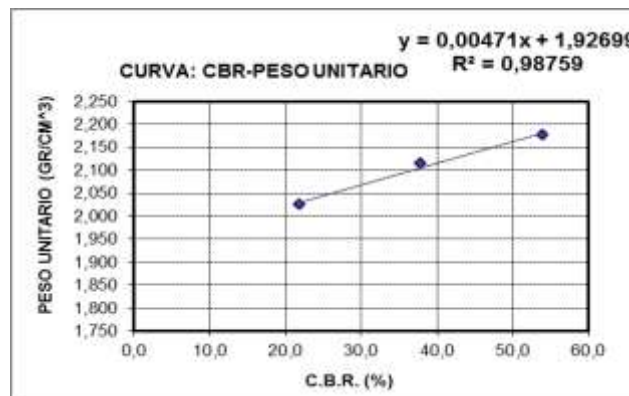
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 26. Curva de carga Vs Penetración SBG-1(66 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 27. Relación entre CBR y Peso unitario de la SBG-1 (66 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

CBR 100% D.máx
<b>49 %</b>
CBR 95% D.Máx.
<b>27 %</b>

### Muestra (SBG-1) 75golpes.

**Tabla52. Contenido de humedad y peso unitario SBG-1(75 golpes).**

Muestra	LL	IP	Clasific.	H. Opt.	D. Máx
1	0	0	A-1a(0)	4,95	2,17

Nº capas	5		5		5				
Nº golpes por capa	16		34		75				
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M			
Peso muestra húm.+molde	12625	12920	12028	12301	12890	12991			
Peso Molde	7945	7945	7230	7230	7950	7950			
Peso muestra húmeda	4680	4975	4798	5071	4940	5041			
Volumen de la muestra	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9			
Peso Unit. Muestra Húm.	2,223	2,364	2,279	2,409	2,347	2,395			
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	104,2	142,8	107,8	91,8	98,8	126	113,7	87,4	102,4
Peso muestra seca + tara	97,2	132,1	100,8	87,5	92,1	118,6	107,7	81,9	97,6
Peso del agua	7	10,7	7	4,3	6,7	7,4	6	5,5	4,8
Peso de tara	18,5	19,8	18,5	19,2	17,5	17,8	17,4	17,5	18,7
Peso de la muestra seca	78,7	112,3	82,3	68,3	74,6	100,8	90,3	64,4	78,9
Contenido humedad %	8,895	9,528	8,5055	6,2958	8,981	7,3413	6,6445	8,54	6,0837
Promedio cont. Humedad	9,21		8,5055	7,64		7,3413	7,59		6,0837
Peso Unit.muestra seca	2,036		2,1783	2,118		2,2444	2,181		2,2575

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
4,95	2,17

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 53. Expansión de la muestra SBG-1(75 golpes).**

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº1			MOLDE Nº2			MOLDE Nº3		
			LECT.		EXPANSION	LECT.		EXPANSION	LECT.		EXPANSION
			EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%
20-mar	16:20	1	18	1,8	0	10	1	0	13,6	1,36	0
21-mar	16:20	2	18	1,8	0	10	1	0	13,6	1,36	0
22-mar	16:50	3	18	1,8	0	10	1	0	13,6	1,36	0
23-mar	15:20	4	18	1,8	0	10	1	0	13,6	1,36	0

C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
17,9	2,036
29,9	2,118
47,0	2,181

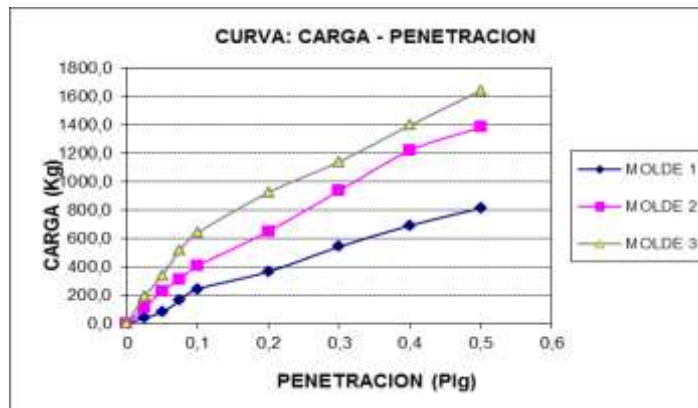
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 54. California Bearing Ratio (C.B.R.) de la muestra SBG-1(75 golpes).**

PENETRACION		CARGA NORMAL	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		39,8	2,1			107,6	5,6			190,9	9,9		
0,05	1,27		80,5	4,2			229,7	11,9			340,2	17,6		
0,075	1,9		161,9	8,4			311,2	16,1			516,6	26,7		
0,1	2,54	1360	243,3	12,6		17,9	406,1	21,0		29,9	638,7	33,0		47,0
0,2	5,08	2040	365,4	18,9		17,9	650,4	33,6		31,9	923,6	47,7		45,3
0,3	7,62		541,8	28,0			935,3	48,3			1140,7	58,9		
0,4	10,16		691,1	35,7			1220,3	63,0			1398,5	72,3		
0,5	12,7		813,2	42,0			1383,1	71,5			1642,8	84,9		

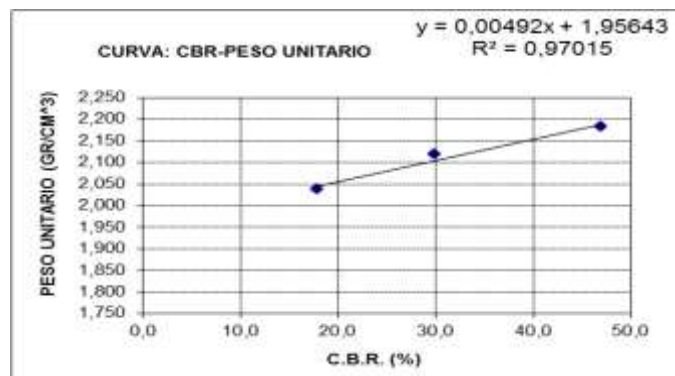
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 28. Curva de carga Vs Penetración SBG-1(75 golpes).



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 29. Relación entre CBR y Peso unitario de la SBG-1 (75 golpes).



Fuente: Elaboración Propia

CBR 100% D.máx
<b>43 %</b>
CBR 95% D.Máx.
<b>21 %</b>

### Muestra (SBG-2) 66 golpes

**Tabla 55. Contenido de humedad y peso unitario SBG-2(66 golpes).**

Muestra	LL	IP	Clasific.	H. Opt.	D. Máx
2	0	0	A+ta	4,02	2,29

Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	14			30			66		
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12630		12890	12997		13085	12430		12600
Peso Molde	8005		8005	8035		8035	7250		7250
Peso muestra húmeda	4625		4885	4962		5050	5180		5350
Volumen de la muestra	2104,9		2104,9	2104,9		2104,9	2104,9		2104,9
Peso Unit. Muestra Húm.	2,197		2,321	2,357		2,399	2,461		2,542
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	57,2	70,3	70,3	85,4	77,2	88,8	71,3	67	109
Peso muestra seca + tara	54,5	66,8	65,7	81,3	73,3	84,1	68,8	63,8	103,5
Peso del agua	2,7	3,5	4,6	4,1	3,9	4,7	2,5	3,2	5,5
Peso de tara	17,3	17,3	17,1	16,9	17,4	17,6	18,7	18,2	17,7
Peso de la muestra seca	37,2	49,5	48,6	64,4	55,9	66,5	50,1	45,6	85,8
Contenido humedad %	7,258	7,0707	9,465	6,3665	6,977	7,0677	4,99	7,018	6,4103
Promedio cont. Humedad	7,16		9,465	6,67		7,0677	6,00		6,4103
Peso Unit.muestra seca	2,050		2,1201	2,210		2,2408	2,322		2,3886

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
4,02	2,29

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 56. Expansión de la muestra SBG-2(66 golpes).**

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION	
			EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%
04-abr	18:20	1	6	0,6	0	2,4	9	0	5	0,5	0
05-abr	18:15	2	6	0,6	0	2,47	9	0	5	0,5	0
06-abr	18:30	3	6	0,6	0	2,47	9	0	5	0,5	0
07-abr	11:00	4	6	0,6	0	2,47	9	0	5	0,5	0

C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
26,9	2,050
41,8	2,210
55,9	2,322

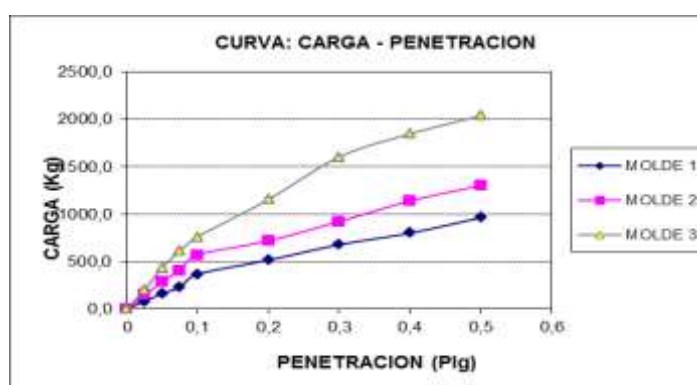
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 57. California Bearing Ratio (C.B.R.) de la muestra SBG-2(66 golpes).**

PENETRACION		CARGA NORMAL	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		80,5	4,2			148,3	7,7			204,5	10,6		
0,05	1,27		161,9	8,4			284,0	14,7			435,1	22,5		
0,075	1,9		229,7	11,9			406,1	21,0			611,5	31,6		
0,1	2,54	1360	365,4	18,9		26,9	569,0	29,4		41,8	760,8	39,3		55,9
0,2	5,08	2040	514,7	26,6		25,2	718,2	37,1		35,2	1154,3	59,6		56,6
0,3	7,62		677,5	35,0			921,8	47,6			1602,1	82,8		
0,4	10,16		799,6	41,3			1138,9	58,8			1846,3	95,4		
0,5	12,7		962,5	49,7			1301,7	67,3			2036,3	105,2		

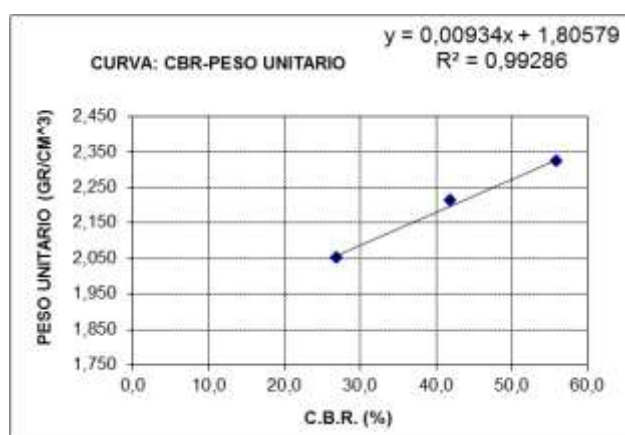
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 30. Curva de carga Vs Penetración SBG-2(66 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 31. Relación entre CBR y Peso unitario de la SBG-2 (66 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

CBR 100% D.máx
<b>52 %</b>
CBR 95% D.Máx.
<b>40 %</b>

Muestra (SBG-2) 75 golpes.

**Tabla 58. Contenido de humedad y peso unitario SBG-2(75 golpes).**

Muestra	LL	IP	Clasific.	H. Opt.	D. Máx
2	0	0	A+ta	4,02	2,30

Nº capas	5		5			5			
Nº golpes por capa	16		34			75			
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse	D. de M.	Antes de mojarse	D. de M.	Antes de mojarse	D. de M.			
Peso muestra húm.+molde	12689	12813	13098	13157	12470	12518			
Peso Molde	8005	8005	8035	8035	7250	7250			
Peso muestra húmeda	4684	4808	5063	5122	5220	5268			
Volumen de la muestra	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9	2104,9			
Peso Unit. Muestra Húm.	2,225	2,284	2,405	2,433	2,480	2,503			
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	46,6	53,7	59,4	50,1	60	65,3	83,9	71,2	61,9
Peso muestra seca + tara	44,8	51,7	56,9	48	57	62,1	80,4	67,7	59,8
Peso del agua	1,8	2	2,5	2,1	3	3,2	3,5	3,5	2,1
Peso de tara	21	21,5	21,1	22,2	21,1	21,6	17,3	19,8	11,1
Peso de la muestra seca	23,8	30,2	35,8	25,8	35,9	40,5	63,1	47,9	48,7
Contenido humedad %	7,563	6,6225	6,9832	8,1395	8,357	7,9012	5,5468	7,307	4,3121
Promedio cont. Humedad	7,09		6,9832	8,25		7,9012	6,43		4,3121
Peso Unit.muestra seca	2,078		2,1351	2,222		2,2552	2,330		2,3993

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm <sup>3</sup>
4,02	2,30

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 59. Expansión de la muestra SBG-2(75 golpes).**

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.		EXPANSION	LECT.		EXPANSION	LECT.		EXPANSION
			EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%
13-mar	9:20	1	3	0,3	0	8	0,8	0	10	1	0
14-mar	9:20	2	3	0,3	0	8	0,8	0	10	1	0
15-mar	9:20	3	3	0,3	0	8	0,8	0	10	1	0
16-mar	10:30	4	3	0,3	0	8	0,8	0	10	1	0

C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm <sup>3</sup>
21,9	2,078
33,9	2,222
51,9	2,330

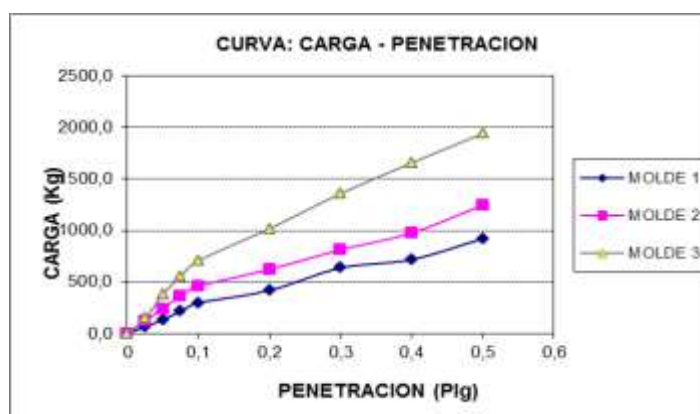
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 60. California Bearing Ratio (C.B.R.) de la muestra SBG-2(75 golpes).**

PENETRACION		CARGA NORMAL	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		66,9	3,5			121,2	6,3			150,2	7,8		
0,05	1,27		134,8	7,0			243,3	12,6			380,9	19,7		
0,075	1,9		216,2	11,2			365,4	18,9			557,3	28,8		
0,1	2,54	1360	297,6	15,4		21,9	460,4	23,8		33,9	706,5	36,5		51,9
0,2	5,08	2040	419,7	21,7		20,6	623,2	32,2		30,6	1018,6	52,6		49,9
0,3	7,62		636,8	32,9			813,2	42,0			1357,8	70,2		
0,4	10,16		718,2	37,1			976,0	50,4			1656,3	85,6		
0,5	12,7		921,8	47,6			1247,4	64,5			1941,3	100,3		

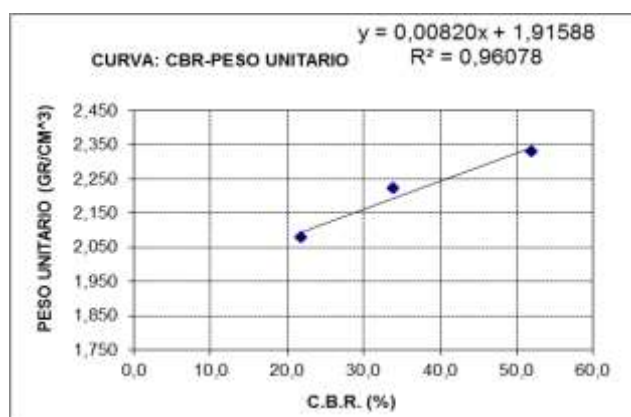
Fuente: Elaboración Propia

Grafica 32. Curva de carga Vs Penetración SBG-2(75 golpes).



Fuente: Elaboración Propia

Grafica 33. Relación entre CBR y Peso unitario de la SBG-2 (75 golpes).



Fuente: Elaboración Propia



CBR 100% D.máx
<b>47 %</b>
CBR 95% D.Máx.
<b>33 %</b>

Muestra (SBG-3) 66 golpes.

**Tabla 61. Contenido de humedad y peso unitario SBG-3(66 golpes).**

Muestra	LL	IP	Clasific.	H. Opt.	D. Máx
3	18	0	A-1a(0)	5,63	2,13

Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	14			30			66		
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12480		12710	12750		12955	12255		12430
Peso Molde	7933,4		7933,4	7998,3		7998,3	7264,2		7264,2
Peso muestra húmeda	4546,6		4776,6	4751,7		4956,7	4990,8		5165,8
Volumen de la muestra	2104,9		2104,9	2104,9		2104,9	2104,9		2104,9
Peso Unit. Muestra Húm.	2,160		2,269	2,257		2,355	2,371		2,454
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	76,6	102,7	120,1	84,3	91,3	111,8	65,1	88,5	97,5
Peso muestra seca + tara	72,3	97,4	113,5	79,8	85,5	105	61,9	83,2	91,7
Peso del agua	4,3	5,3	6,6	4,5	5,8	6,8	3,2	5,3	5,8
Peso de tara	17,2	17,3	17,4	18,7	17,8	18,3	17,5	18,2	18,6
Peso de la muestra seca	55,1	80,1	96,1	61,1	67,7	86,7	44,4	65	73,1
Contenido humedad %	7,804	6,6167	6,8678	7,365	8,567	7,8431	7,2072	8,154	7,9343
Promedio cont. Humedad	7,21		6,8678	7,97		7,8431	7,68		7,9343
Peso Unit.muestra seca	2,015		2,1234	2,091		2,1836	2,202		2,2738

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm <sup>3</sup>
5,63	2,13

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 62. Expansión de la muestra SBG-3(66 golpes).**

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.		EXPANSION	LECT.		EXPANSION	LECT.		EXPANSION
			EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%
02-may	9:50	1	25,6	2,56	0	12,4	1,24	0	22,2	2,22	0
03-may	9:50	2	25,6	2,56	0	12,4	1,24	0	22,2	2,22	0
04-may	9:50	3	25,6	2,56	0	12,4	1,24	0	22,2	2,22	0
05-may	16:50	4	25,6	2,56	0	12,4	1,24	0	22,2	2,22	0

C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm <sup>3</sup>
21,9	2,015
40,8	2,091
59,9	2,202

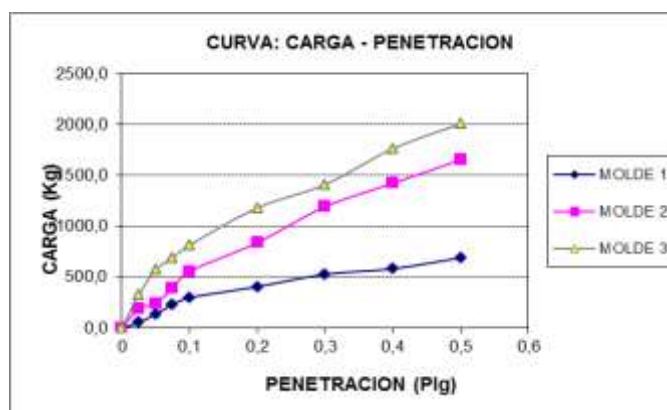
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 63. California Bearing Ratio (C.B.R.) de la muestra SBG-3(66 golpes).**

PENETRACION		CARGA NORMAL	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		53,3	2,8			189,0	9,8			326,6	16,9		
0,05	1,27		134,8	7,0			243,3	12,6			570,8	29,5		
0,075	1,9		229,7	11,9			392,6	20,3			692,9	35,8		
0,1	2,54	1360	297,6	15,4		21,9	555,4	28,7		40,8	815,1	42,1		59,9
0,2	5,08	2040	406,1	21,0		19,9	840,3	43,4		41,2	1181,4	61,0		57,9
0,3	7,62		528,3	27,3			1193,1	61,6			1412,1	73,0		
0,4	10,16		582,5	30,1			1423,8	73,6			1764,9	91,2		
0,5	12,7		691,1	35,7			1654,5	85,5			2009,1	103,8		

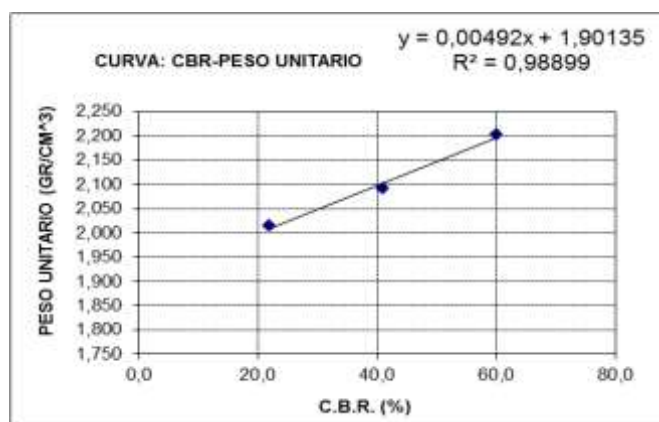
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 34. Curva de carga Vs Penetración SBG-3(66 golpes).



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 35. Relación entre CBR y Peso unitario de la SBG-3 (66 golpes).



Fuente: Elaboración Propia

CBR 100% D.máx
<b>46 %</b>
CBR 95% D.Máx.
<b>25 %</b>

Muestra (SBG-3) 75 golpes.

**Tabla 64. Contenido de humedad y peso unitario SBG-3(75 golpes).**

Muestra	LL	IP	Clasific.	H. Opt.	D. Máx
3	0	0	A-1a(0)	5,63	2,14

Nº capas	5			5			5			
Nº golpes por capa	16			34			75			
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse	D. de M		Antes de mojarse	D. de M		Antes de mojarse	D. de M		
Peso muestra húm.+molde	12693	12840		12890	12960		13136	13210		
Peso Molde	7635	7635		7595	7595		7650	7650		
Peso muestra húmeda	5058	5205		5295	5365		5486	5560		
Volumen de la muestra	2104,9	2104,9		2104,9	2104,9		2104,9	2104,9		
Peso Unit. Muestra Húm.	2,403	2,473		2,516	2,549		2,606	2,641		
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.	Fondo	Superf.	2° sup.	
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Peso muestra húm + tara	44,1	34,7	37,1	47,8	25,7	31,3	45,7	35,5	39,6	
Peso muestra seca + tara	40,3	32,2	34,5	44,9	23,9	29,5	41,3	33,2	36,8	
Peso del agua	3,8	2,5	2,6	2,9	1,8	1,8	4,4	2,3	2,8	
Peso de tara	19,3	17,8	18,2	17,9	17,3	16	19,6	18,1	18,2	
Peso de la muestra seca	21	14,4	16,3	27	6,6	13,5	21,7	15,1	18,6	
Contenido humedad %	18,1	17,361	15,951	10,741	27,27	13,333	20,276	15,23	15,054	
Promedio cont. Humedad	17,73			19,01			17,75			15,054
Peso Unit.muestra seca	2,041			2,114			2,249			2,2958

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
5,63	2,14

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 65. Expansión de la muestra SBG-3(75 golpes).**

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION	
			EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%
08-may	17:25	1	8,4	0,84	0	19,02	1,902	0	9,4	0,94	0
09-may	17:35	2	8,4	0,84	0	19,02	1,902	0	9,4	0,94	0
10-may	17:25	3	8,4	0,84	0	19,02	1,902	0	9,4	0,94	0
11-may	17:15	4	8,4	0,84	0	19,02	1,902	0	9,4	0,94	0

C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
19,9	2,041
37,8	2,114
54,9	2,213

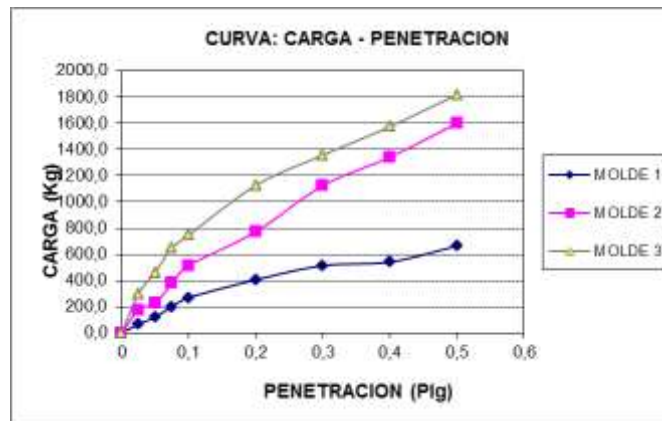
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 66. California Bearing Ratio (C.B.R.) de la muestra SBG-3(75 golpes).**

PENETRACION		CARGA NORMAL Kg	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3			
Pulg.	mm		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
			Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		66,9	3,5			175,5	9,1			299,4	15,5		
0,05	1,27		121,2	6,3			229,7	11,9			462,3	23,9		
0,075	1,9		202,6	10,5			379,0	19,6			652,2	33,7		
0,1	2,54	1360	270,5	14,0		19,9	514,7	26,6		37,8	747,2	38,6		54,9
0,2	5,08	2040	406,1	21,0		19,9	772,5	39,9		37,9	1127,2	58,2		55,3
0,3	7,62		514,7	26,6			1125,3	58,1			1357,8	70,2		
0,4	10,16		541,8	28,0			1342,4	69,4			1574,9	81,4		
0,5	12,7		664,0	34,3			1600,2	82,7			1819,2	94,0		

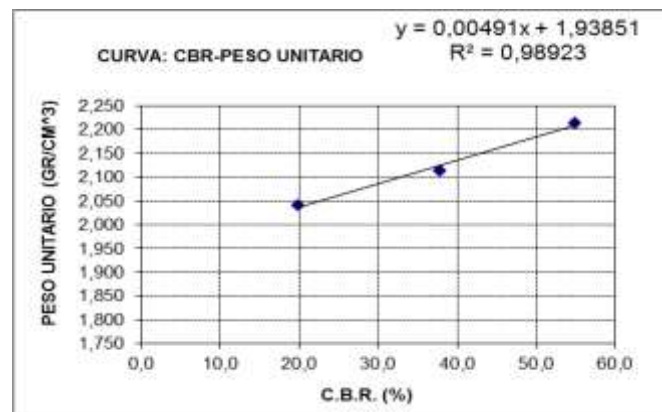
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 36. Curva de carga Vs Penetración SBG-3(75 golpes).



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 37. Relación entre CBR y Peso unitario de la SBG-3 (75 golpes).



Fuente: Elaboración Propia

CBR 100% D.máx
<b>41 %</b>
CBR 95% D.Máx.
<b>19 %</b>

### 3.3.2.1. GRANULOMETRÍA DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (C.B.R.).

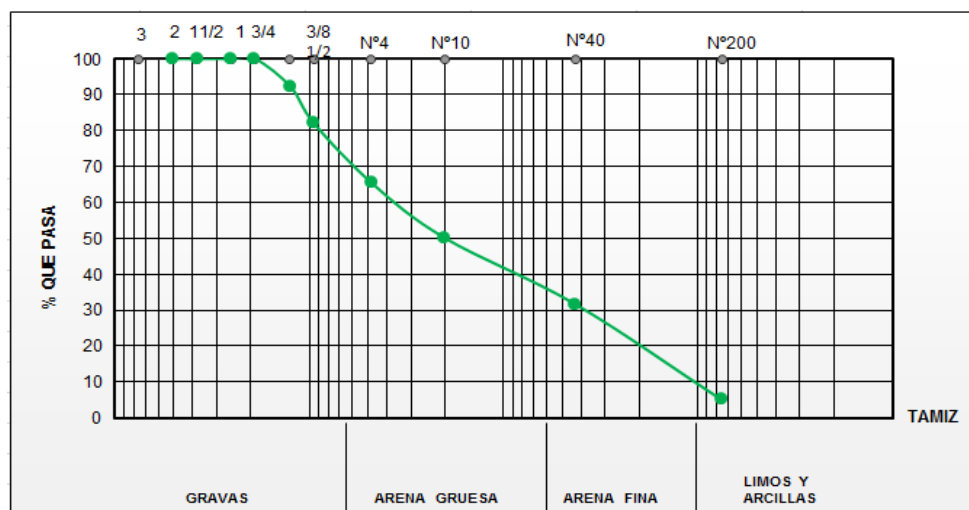
Muestra (SBG-1) 66 golpes.

**Tabla 67. Granulométrica de la muestra SBG-1 de CBR (66 golpes).**

Peso Total (gr.)		4000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75		0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2"	12,50	310,60	310,60	7,76	<b>92,24</b>
3/8"	9,50	404,80	715,40	17,88	<b>82,12</b>
Nº4	4,75	673,80	1389,20	34,73	<b>65,27</b>
Nº10	2,00	610,10	1999,30	49,98	<b>50,02</b>
Nº40	0,43	739,20	2738,50	68,46	<b>31,54</b>
Nº200	0,075	1066,40	3804,90	95,12	<b>4,88</b>
BASE	-	195,30	4000,20	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 38. Distribución granulométrica del material SBG-1 del CBR (66 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

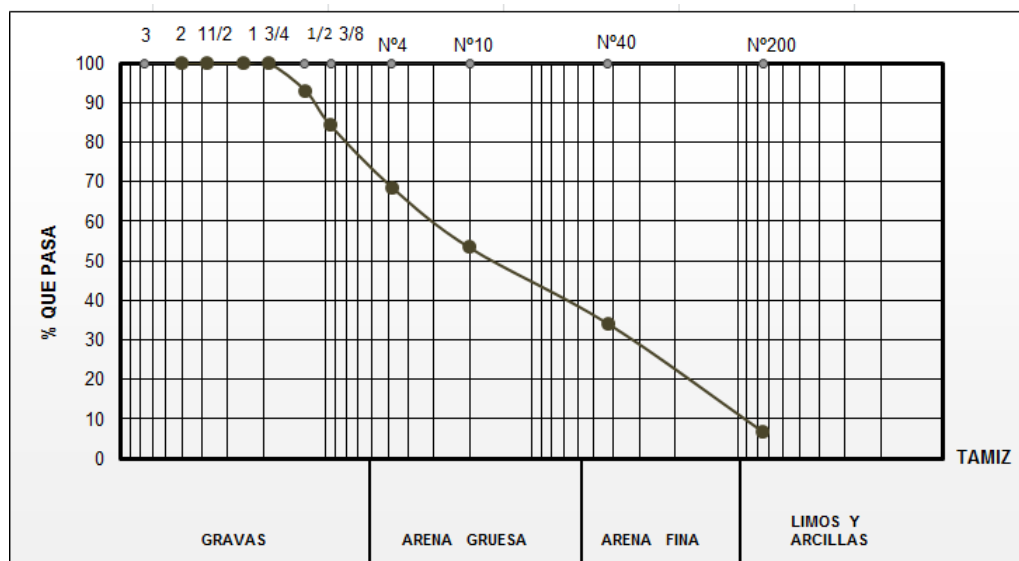
Muestra (SBG-1) 75 golpes.

**Tabla 68. Granulométrica de la muestra SBG-1 de CBR (75 golpes).**

Peso Total (gr.)			4000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2"	12,50	284,60	284,60	7,12	<b>92,88</b>
3/8"	9,50	344,80	629,40	15,74	<b>84,26</b>
Nº4	4,75	633,20	1262,60	31,57	<b>68,43</b>
Nº10	2,00	606,20	1868,80	46,72	<b>53,28</b>
Nº40	0,43	768,10	2636,90	65,93	<b>34,07</b>
Nº200	0,075	1095,20	3732,10	93,31	<b>6,69</b>
BASE	-	267,50	3999,60	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 39. Distribución granulométrica del material SBG-2 de CBR (75 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

Muestra (SBG-2) 66 golpes.

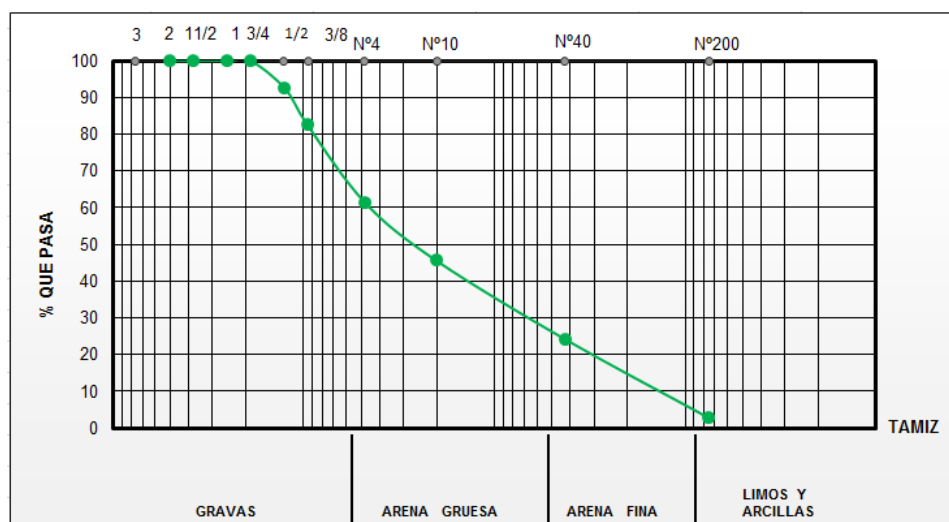
**Tabla 69. Granulométrica de la muestra SBG-2 de CBR (66 golpes).**

Peso Total (gr.)			4000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total

3"	75		0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2"	12,50	303,50	303,50	7,59	<b>92,41</b>
3/8"	9,50	401,40	704,90	17,63	<b>82,37</b>
Nº4	4,75	843,40	1548,30	38,72	<b>61,28</b>
Nº10	2,00	631,50	2179,80	54,52	<b>45,48</b>
Nº40	0,43	852,50	3032,30	75,84	<b>24,16</b>
Nº200	0,075	855,90	3888,20	97,25	<b>2,75</b>
BASE	-	110,10	3998,30	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 40. Distribución granulométrica del material SBG-2 (66 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

**Muestra (SBG-2) 75 golpes.**

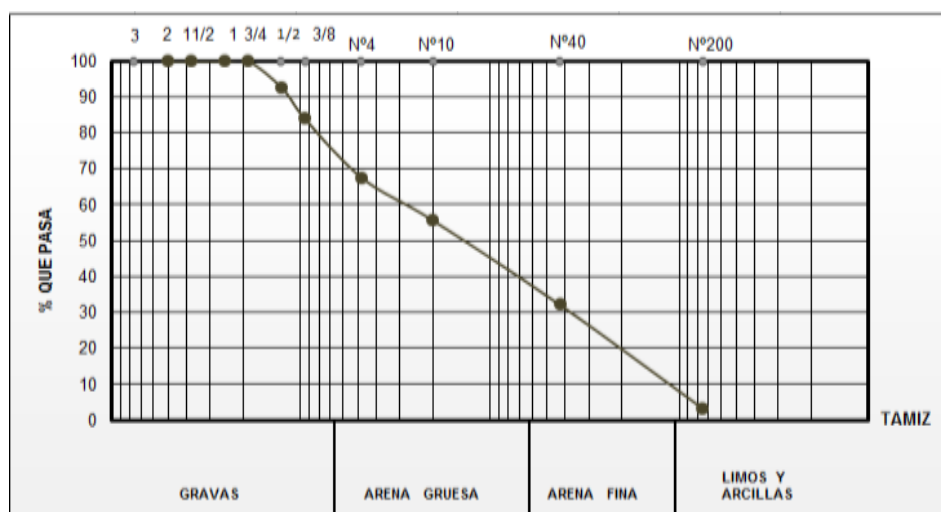
**Tabla 70. Granulométrica de la muestra SBG-2 de CBR (75 golpes).**

Peso Total (gr.)		4000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>

1/2"	12,50	304,80	304,80	7,62	<b>92,38</b>
3/8"	9,50	338,70	643,50	16,10	<b>83,90</b>
Nº4	4,75	658,40	1301,90	32,56	<b>67,44</b>
Nº10	2,00	474,20	1776,10	44,42	<b>55,58</b>
Nº40	0,43	941,50	2717,60	67,97	<b>32,03</b>
Nº200	0,075	1151,50	3869,10	96,78	<b>3,22</b>
BASE	-	128,90	3998,00	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 41. Distribución granulométrica del material SBG-2 de CBR (75 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

**Muestra (SBG-3) 66 golpes.**

**Tabla 71. Granulométrica de la muestra SBG-3 de CBR (66 golpes).**

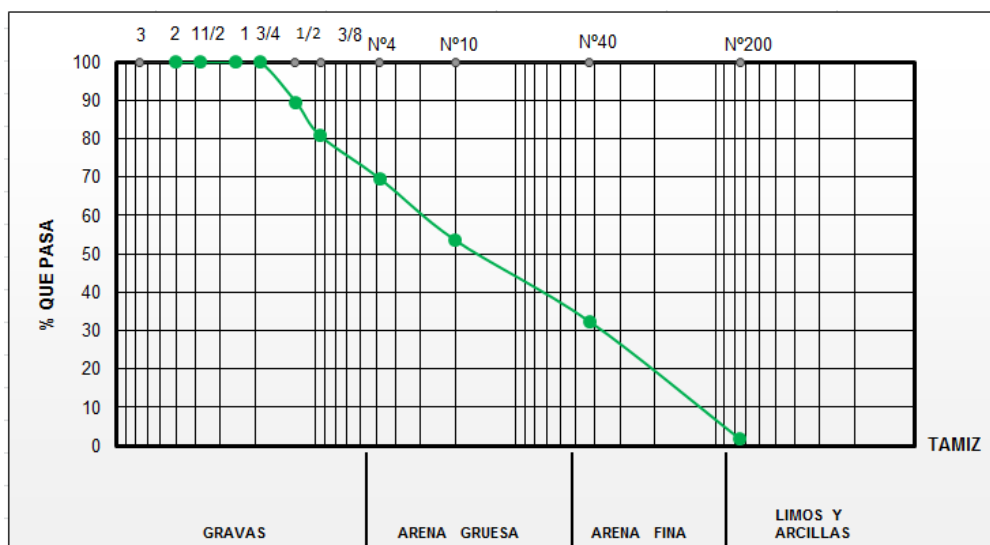
Peso Total (gr.)		4000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2"	12,50	426,20	426,20	10,66	<b>89,34</b>
3/8"	9,50	341,90	768,10	19,22	<b>80,78</b>
Nº4	4,75	450,00	1218,10	30,47	<b>69,53</b>
Nº10	2,00	639,40	1857,50	46,47	<b>53,53</b>
Nº40	0,43	847,20	2704,70	67,66	<b>32,34</b>
Nº200	0,075	1224,40	3929,10	98,29	<b>1,71</b>



BASE	-	68,20	3997,30	100,00	<b>0,00</b>
------	---	-------	---------	--------	-------------

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 42. Distribución granulométrica del material SBG-3 de CBR (66 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

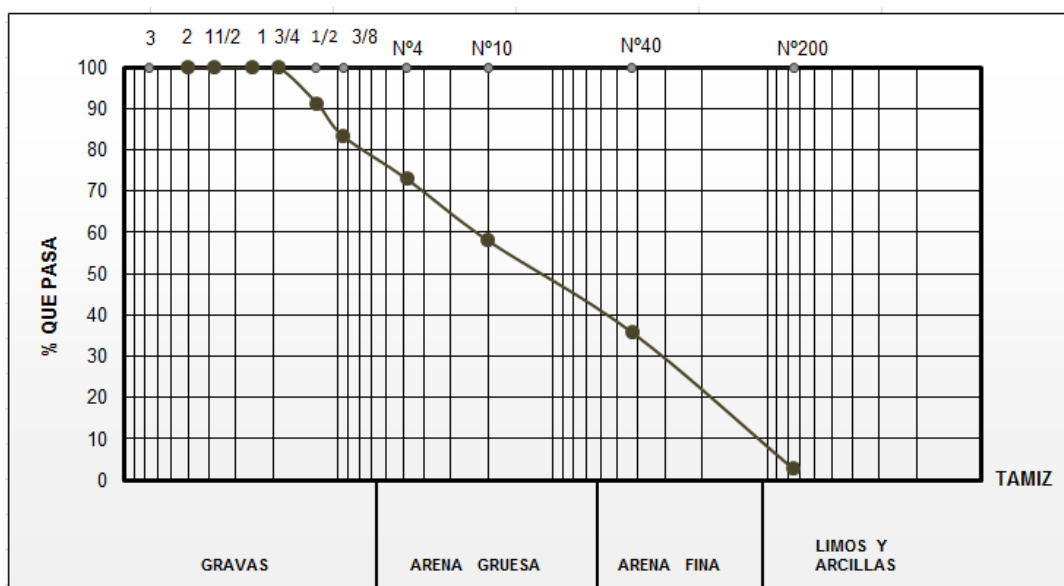
**Muestra (SBG-3) 75 golpes.**

**Tabla 72. Granulométrica de la muestra SBG-3 de CBR (75 golpes).**

Peso Total (gr.)		4000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2"	12,50	356,20	356,20	8,91	<b>91,09</b>
3/8"	9,50	308,90	665,10	16,64	<b>83,36</b>
N°4	4,75	421,50	1086,60	27,18	<b>72,82</b>
N°10	2,00	593,40	1680,00	42,03	<b>57,97</b>
N°40	0,43	889,20	2569,20	64,27	<b>35,73</b>
N°200	0,075	1324,50	3893,70	97,41	<b>2,59</b>
BASE	-	103,60	3997,30	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 43. Distribución granulométrica del material SBG-3 de CBR (75 golpes).**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS PROCESOS DE RECOMPACTACIÓN SOBRE LA GRANULOMETRIA Y LA RESPUESTA MECANICA DE LA SUB-BASE GRANULAR

#### 3.5.1. Resultados de los ensayos de evaluación de calidad y caracterización.

**Tabla 73. Resultado de los ensayos de evaluación de calidad y caracterización.**

Material	LL (%)	IP (%)	DMA (%)	EA (%)	Wo (%)	D <sub>máx</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )
SBG-1( Empresa Erika)	0	NP	28,13	51,71	4,95	2,15
SBG-2 (Alcaldía)	0	NP	24,10	51,81	4,02	2,28
SBG-3 (SEDECA)	0	NP	28,14	52,00	5,63	2,13
<b>Valor admisible AASTHO</b>	<b>≤ 35</b>	<b>≤ 6</b>	<b>≤ 40</b>	<b>≥ 25</b>		

Fuente: Elaboración Propia

**Nota:** LL= límite líquido; IP= índice de plasticidad; DMA= desgaste en la máquina de Los Ángeles; EA= equivalente de arena; Wo = humedad óptima de compactación; D<sub>máx</sub> = peso unitario seco máximo; NP= no presenta; SBG= sub-base granular.

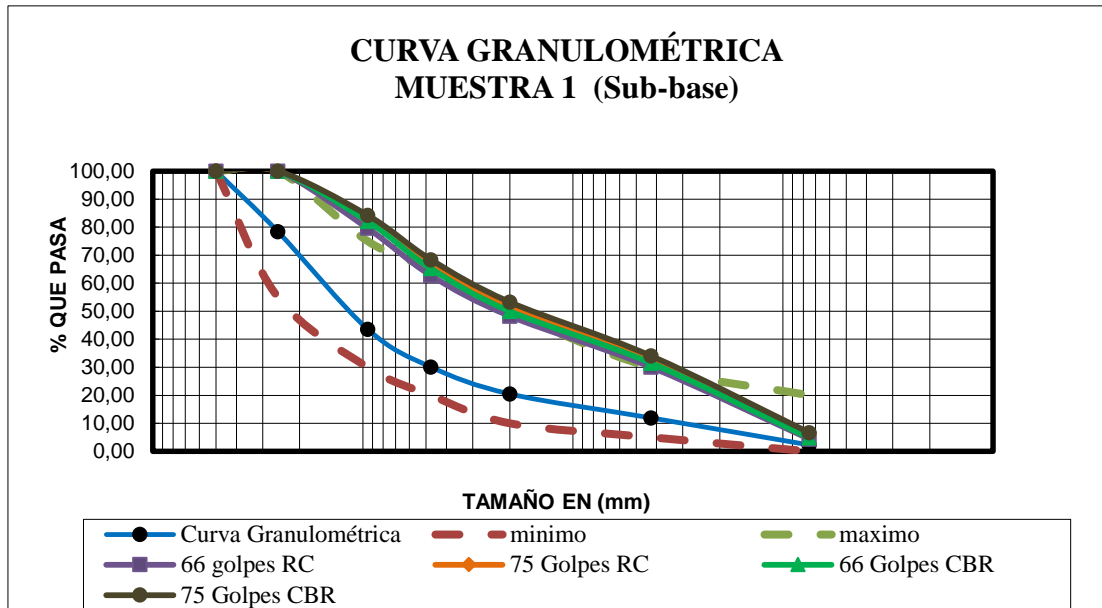
### **3.4.1. ANÁLISIS Y RESULTADOS**

Se observaron los cambios sufridos por los materiales una vez sometidos a los procesos de compactación y recompactación, específicamente los cambios ocurridos en los tamaños de partícula, y respuesta mecánica. A continuación se presentan dichos análisis

#### **3.4.1.1. CAMBIOS EN LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA**

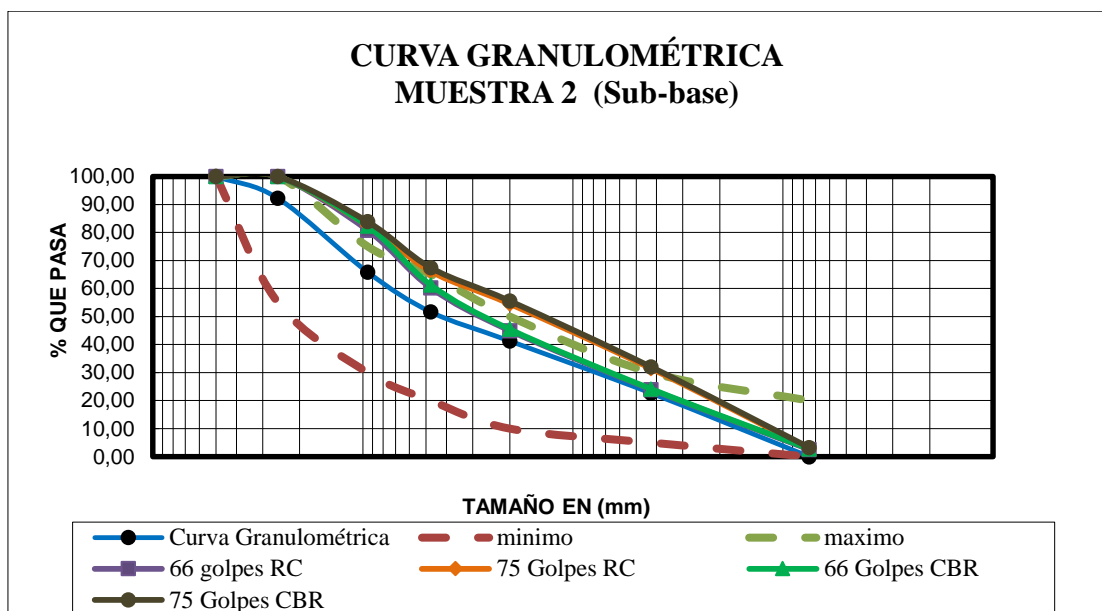
La figura 83, 84,85 presenta los cambios granulométricos de las sub-bases en estudio en las diferentes condiciones de compactación, comparadas con la granulometría del material original. Analizando estas curvas granulométricas se observa que los materiales son susceptibles a procesos de degradación puesto que se da un cambio en la distribución de los tamaños de partícula, de modo que se salen del huso granulométrico establecido por la especificación AASTHO para material tipo sub-base. Dicho cambio, como resultado de aplicar energía mecánica, se presentó principalmente en el porcentaje que pasa para el tamiz No 200 (0.076 mm), lo cual significa que en las tres sub-bases hubo producción de finos (ver figura 1, 2, 3).

***Gráfica 44. Cambios en la distribución granulométrica de los materiales de sub-base en sus diferentes condiciones a) SBG-1.***



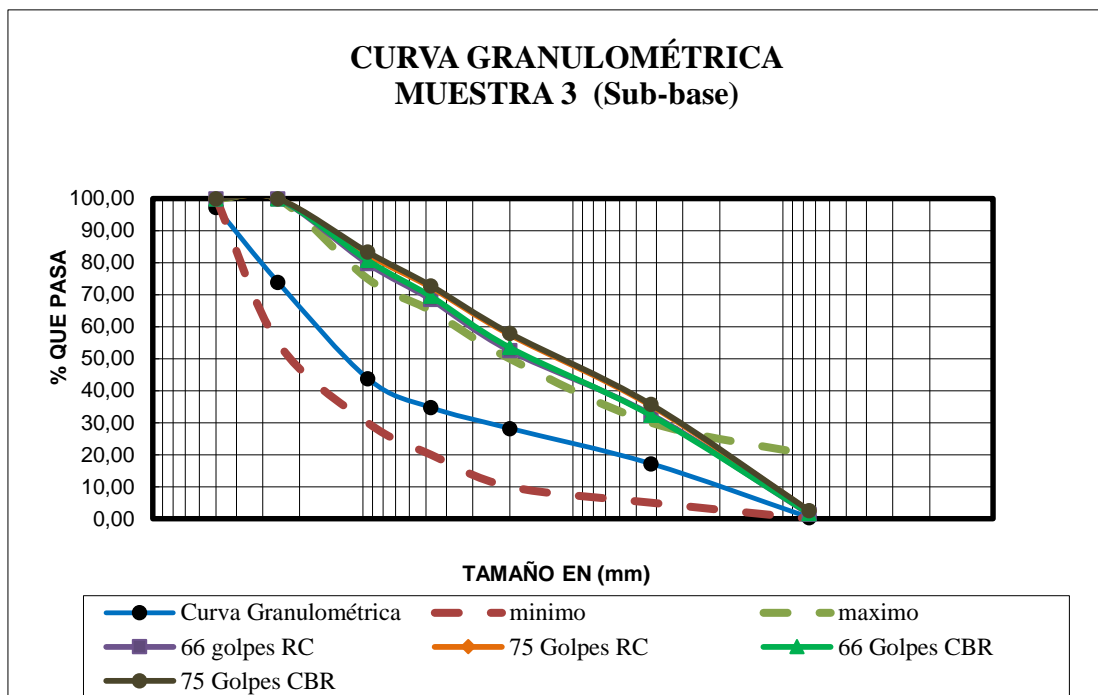
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 45. Cambios en la distribución granulométrica de los materiales de sub-base en sus diferentes condiciones b) SBG-2.**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 46. Cambios en la distribución granulométrica de los materiales de sub-base en sus diferentes condiciones c) SBG-3.**



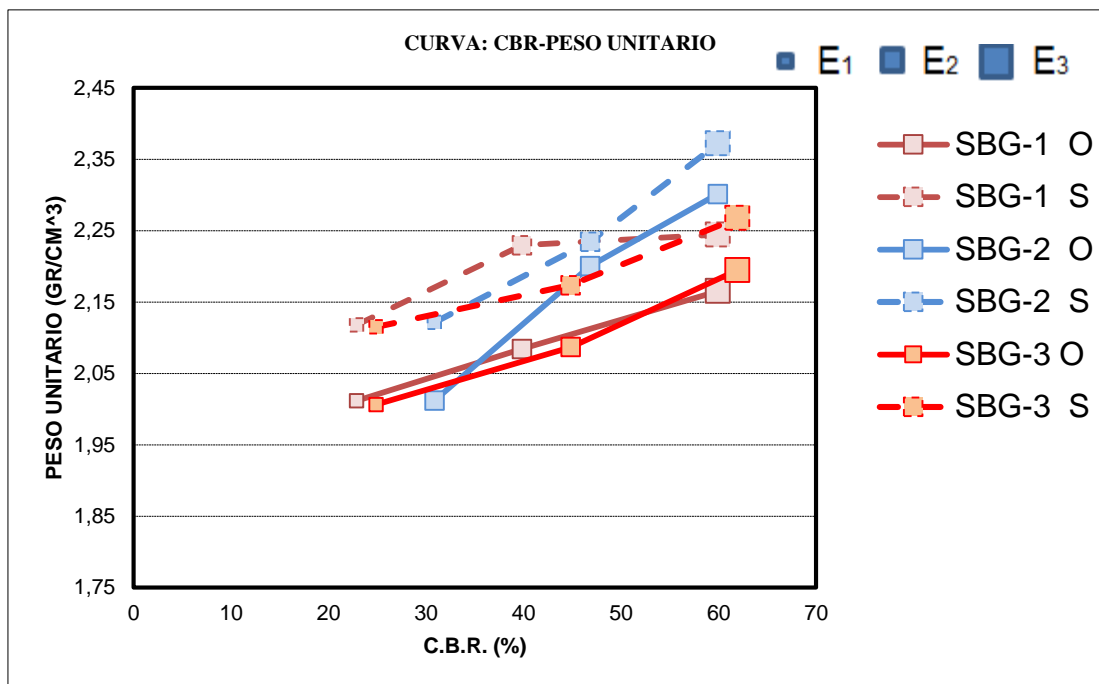
*Fuente:* Elaboración Propia

Esto se relaciona directamente con los resultados obtenidos en los ensayos de calidad (ver tabla 54). Específicamente, los valores de DMA obtenidos para la SBG-1, 3, cercanos a los límites admisibles ( $DMA \leq 35\%$ ), sugieren la mayor propensión de este material a la degradación comparado con el material SBG-2, que exhibe mejores indicadores de comportamiento en las pruebas de DMA.

### 3.4.1.2. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA MECÁNICA EN TÉRMINOS DE CBR

La figura 47 presenta el comportamiento de las SBG-1, SBG-2 y SBG-3 en términos de su respuesta mecánica capturada a partir del ensayo de CBR. Se presentan en ella las energías a las que fueron compactadas las probetas, E1, E2 y E3, que indican, respectivamente, las energías de 12, 25 y 56 golpes/capa aplicadas como indica la norma de ensayo AASTHO. Se puede observar también la condición de humedad óptima de compactación (O) y de saturación (S), así como el valor mínimo de CBR especificado en la AASTHO para que estas sub-bases cumplan como materiales aptos para construcción vial.

**Gráfica 47. Relación entre CBR y peso unitario seco a diferentes energías de compactación**



*Fuente:* Elaboración Propia

Adicionalmente, los datos de la figura 3 muestran el cambio de la respuesta mecánica por efecto del agua (incremento del grado de saturación). Se observan disminuciones pequeñas en el CBR de las probetas fabricadas a los tres niveles de energía con la SBG-1, SBG-2 y SBG-3.

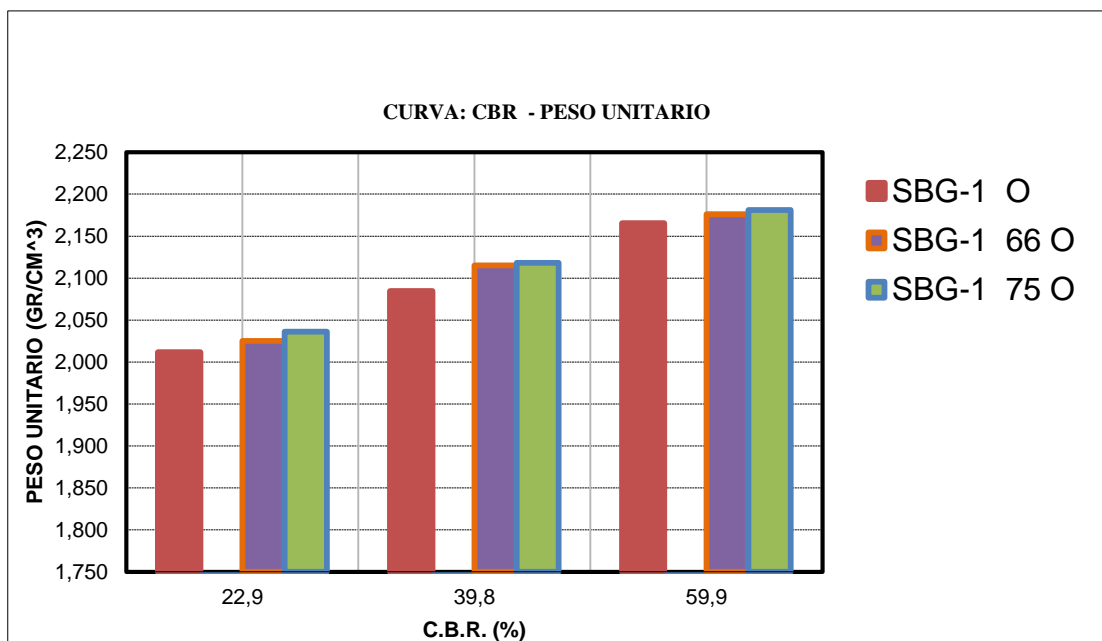
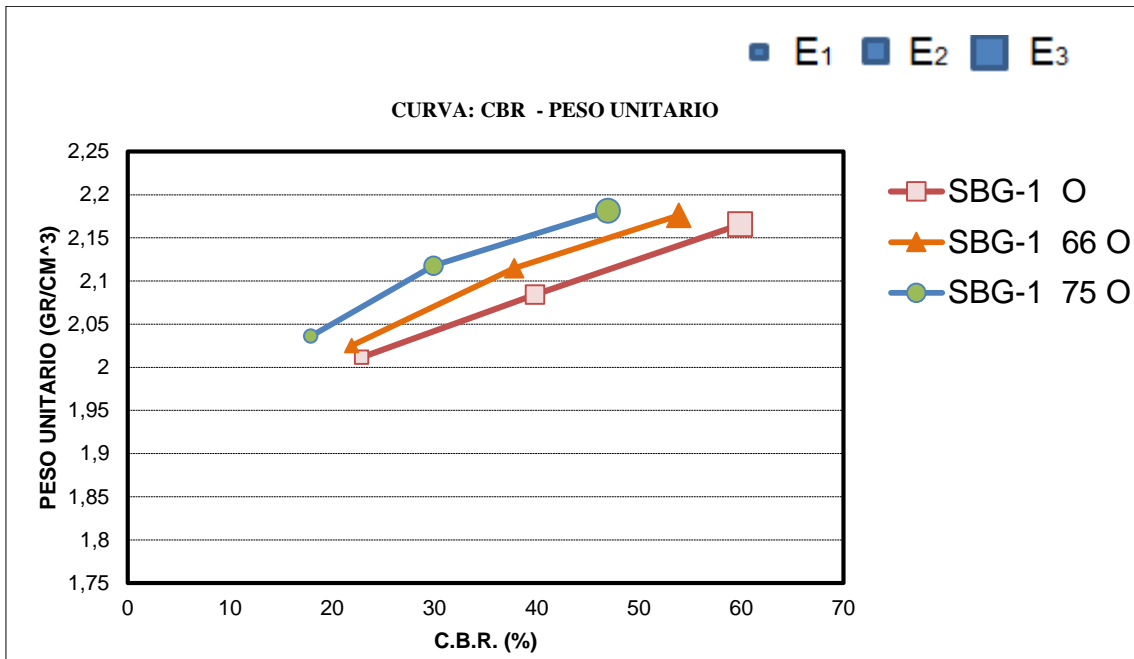
La Gráfica 47 presenta el comportamiento de la SBG-1, SBG-2, y SBG-3, recompactada a diferentes energías. Se puede observar que al recompactar a la máxima energía se obtuvo una mayor disminución del CBR que al recompactar con las energías de menor magnitud.

**Tabla 74. Comparación del CBR normal y recompactado.**

SUB-BASE	C.B.R. Normal		C.B.R. 66 golpes		C.B.R. 75 golpes	
	100%	95%	100%	95%	100%	95%
<b>SBG-1</b>	56	30	49	27	43	21
<b>SBG-2</b>	57	45	52	40	47	33
<b>SBG-3</b>	51	30	46	25	41	19

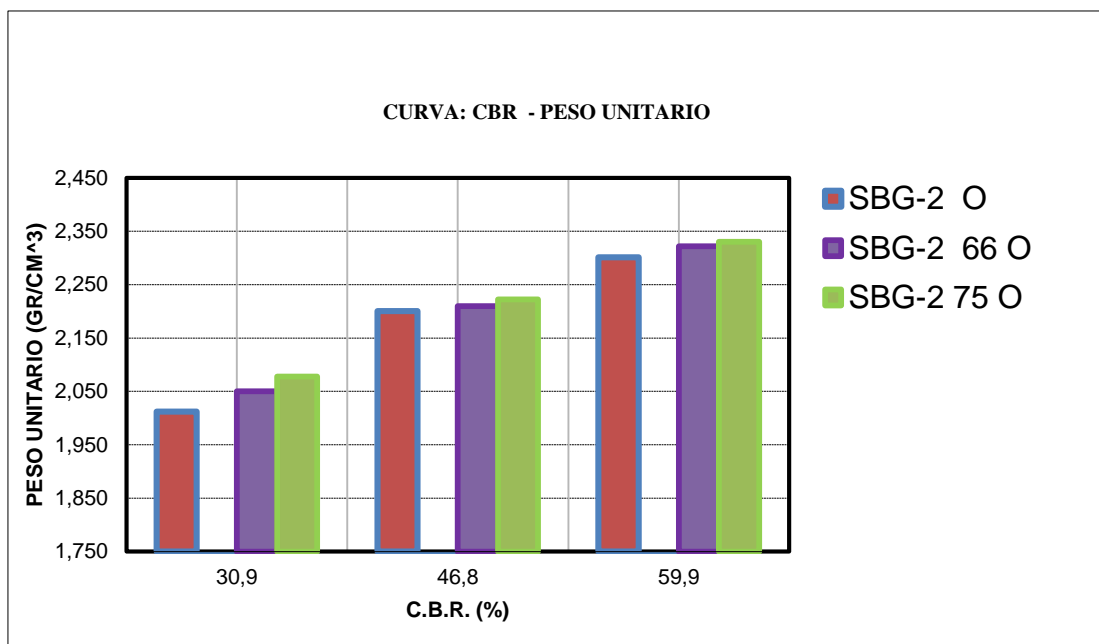
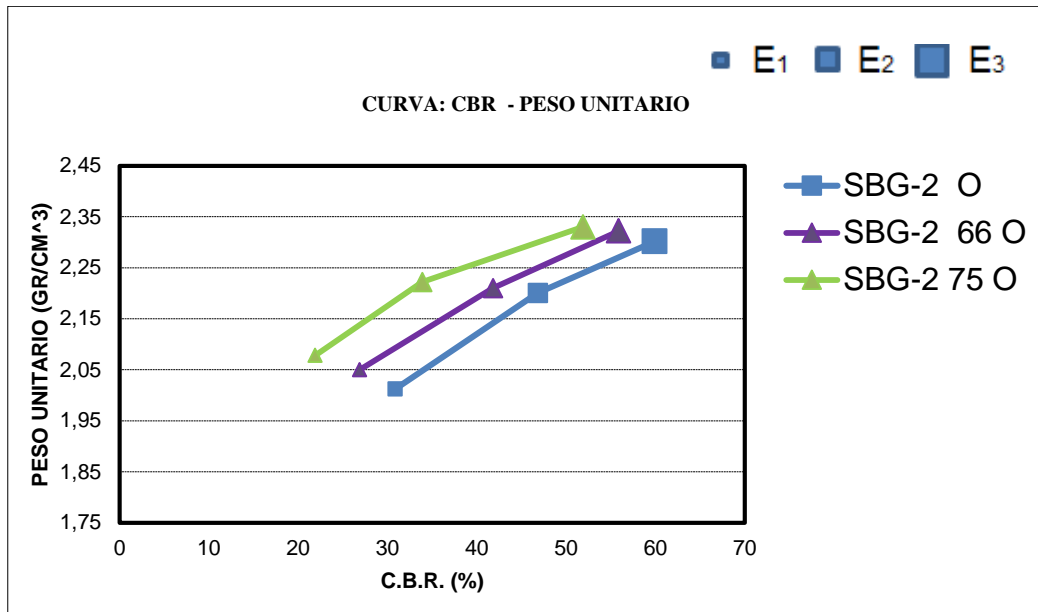
*Fuente:* Elaboración Propia

**Gráfica 48. Relación de CBR y peso unitario seco para probetas de la SBG-1, Recompactadas a diferentes energías.**



Fuente: Elaboración Propia

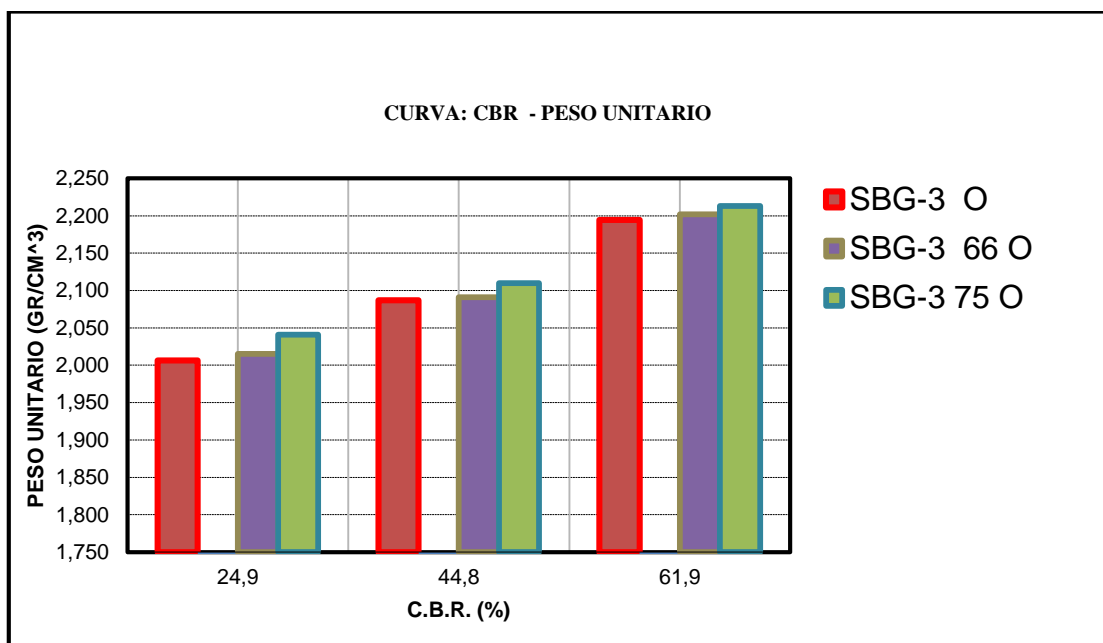
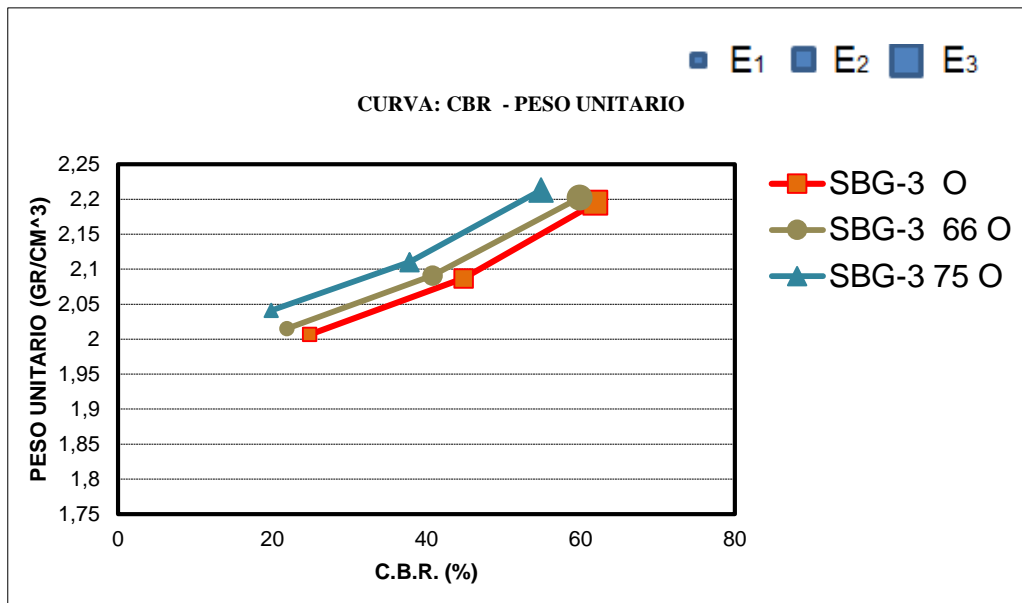
**Gráfica 49. Relación de CBR y peso unitario seco para probetas de la SBG-2, Recompactadas a diferentes energías.**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 50. Relación de CBR y peso unitario seco para probetas de la SBG-3, Recompactadas a diferentes energías.**

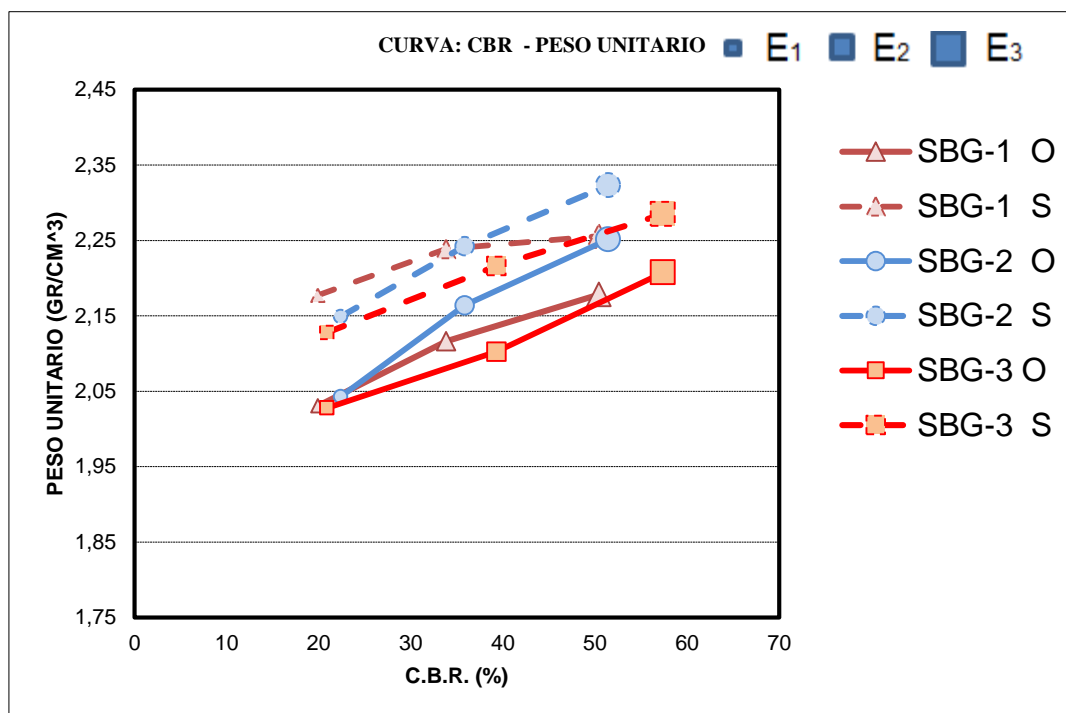




*Fuente:* Elaboración Propia

En la Gráfica 48, 49, 50 se muestran los resultados obtenidos de CBR contra peso unitario seco ( $Y_d$ ) en condiciones de humedad óptima (O) y humedad de saturación (S) para probetas recompactadas. Al someter los materiales a procesos de compactación y recompactación sucesivos se observa la magnitud de las reducciones en su CBR. Estas reducciones indican que la aplicación sucesiva de energía mecánica generó degradación del material.

**Gráfica 51. Relación de CBR y peso unitario seco en términos de valores promedios de las réplicas.**



*Fuente:* Elaboración Propia

Después de llevar el material desde la compactación inicial hasta la tercera recompactación, repitiendo los ciclos de compactación, inmersión y disgregación, se presentó disminución de la respuesta mecánica. Adicionalmente, se obtuvo un aumento del peso unitario seco, que se debe a la disminución del tamaño de las partículas tipo grava, generando arenas y finos, lo cual permite que más partículas puedan empaquetarse por unidad de volumen durante el proceso de compactación. En todas las condiciones de compactación, luego de someter las probetas a inmersión por cuatro días, se observó una pérdida de respuesta mecánica ocasionada por la saturación del material. Los resultados anteriores ratifican que la humedad es uno de los parámetros más importantes a controlar

en campo y su control constituye uno de los retos del diseño y construcción de pavimentos, pues el incremento de humedad hace que el desempeño del material disminuya con potencial para ocasionar fallas de la estructura de pavimento.

### 3.4. ANÁLISIS DE COSTOS

A continuación se muestran las planillas de precios unitarios y de costo total de las tres tipos de sub-base en análisis normal de recompactación de la sub-base granular.

**Tabla 75. Análisis de precios unitarios de la sub-base granular normal.**

DATOS GENERALES:				
Proyecto:				
Actividad:	Conformación de la plataforma Normal de 6 pasadas			
Cantidad:	2400			
Unidad:	m <sup>3</sup>			
Moneda:	Bolívianos			
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Operador	hr	0,031	24	0,74
Ayudante	hr	0,031	16	0,50
Operador	hr	0,033	24	0,79
Ayudante	hr	0,033	16	0,53
Operador	hr	0,02	24	0,48
Ayudante	hr	0,02	16	0,32
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>3,36</b>
Cargas Sociales	55% de sub total mano de obra			1,85
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra mas carga social			0,78
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>5,99</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Motoniveladora	hr	0,0021	423	0,8883
compactadora	hr	0,004	302	1,208
Carro Aguatero	hr	0,0093	223	2,0739
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			0,30
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>0,30</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>4,47</b>
Gastos generales y administrativos	7% del sub total			0,31
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos+el sub total			0,48
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>5,26</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			0,16
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>5,42</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>5,42</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 76. Análisis de precios unitarios de la sub-base granular recompactada 7 pasadas.**

DATOS GENERALES:				
Proyecto:				
Actividad:	Conformación de la plataforma Recompactada 7 pasada			
Cantidad:	2400			
Unidad:	m <sup>3</sup>			
Moneda:	Bolivianos			
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Operador	hr	0,03	24	0,74
Ayudante	hr	0,031	16	0,496
Operador	hr	0,033	24	0,792
Ayudante	hr	0,033	16	0,528
Operador	hr	0,02	24	0,48
Ayudante	hr	0,02	16	0,32
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>3,36</b>
Cargas Sociales	55% de sub total mano de obra			1,85
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra mas carga social			0,78
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>5,99</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Motoniveladora	hr	0,0021	423	0,8883
compactadora	hr	0,0047	302	1,4194
Carro Aguatero	hr	0,0093	223	2,0739
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			0,30
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>0,30</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>4,68</b>
Gastos generales y administrativos	7% del sub total			0,33
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos+el sub total			0,50
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>5,51</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			0,17
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>5,68</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>5,68</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 77. Análisis de precios unitarios de la sub-base granular recompactada 8 pasadas.**

DATOS GENERALES:				
Proyecto:				
Actividad:	Conformación de la plataforma Recompactada de 8 pasadas			
Cantidad:	2400			
Unidad:	m3			
Mone da:	Bolivianos			
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Operador	hr	0,03	24	0,74
Ayudante	hr	0,031	16	0,496
Operador	hr	0,033	24	0,792
Ayudante	hr	0,033	16	0,528
Operador	hr	0,02	24	0,48
Ayudante	hr	0,02	16	0,32
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>3,36</b>
Cargas Sociales	55% de sub total mano de obra			1,85
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra mas carga social			0,78
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>5,99</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Motoniveladora	hr	0,0021	423	0,8883
compactadora	hr	0,0054	302	1,6308
Carro Aguatero	hr	0,0093	223	2,0739
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			0,30
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>0,30</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>4,89</b>
Gastos generales y administrativos	7% del sub total			0,34
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos+el sub total			0,52
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>5,76</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			0,18
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>5,94</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>5,94</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 5.5.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

Tabla 78. Análisis Comparativo de Costos de las Número de Pasadas

No Pasadas	Precio Unitario (Bs/m3)	Cantidad m3	Costo final Bs
6	5,42	2400	13008

<b>7</b>	5,68	2400	13632
<b>8</b>	5,94	2400	14256

*Fuente:* Elaboración Propia

En la tabla 59 se destaca la diferencia de Precios Unitarios, y por consiguiente del Costo Final, manteniendo constante la cantidad de 2400 m<sup>3</sup>, a partir de un cálculo de aproximación de volumen a ocupar, con una longitud igual a 2 Km, con un ancho de 6 m y un espesor de 20 cm. El costo de la recompactación de 7 y 8 tiene un sobre costo mayor a la normal de 6 pasadas.

## **CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. CONCLUSIONES**

- Luego de evaluar y analizar los diferentes parámetros, cambios en la granulometría, en el CBR, en términos de parámetros empleados para el diseño estructural de pavimentos, los cambios en respuesta mecánica que pueden inducir los procesos de recompactación sobre materiales granulares.
- En los ensayos descritos se encontró que la primera y segunda recompactación le induce daño a los materiales, disminuyendo su respuesta mecánica ante carga monotómica y dinámica.

- Al someter las sub-base granular a procesos de recompactación, efectivamente se logró un aumento del peso unitario seco, debido a que al aplicar energía mecánica se produjo una disminución en el tamaño de las partículas, aumentando la proporción de arenas y finos en el material por la trituración del material de mayor tamaño. Sin embargo, el incremento del peso unitario seco no representó mejora en la respuesta mecánica del material, debido a los efectos negativos que se presentaron, específicamente la degradación de partículas tamaño grava y arena. Lo anterior significa que después de los procesos de recompactación se puede afectar el desempeño de las estructuras de pavimento conformados con estos materiales.
- En cuanto a la evaluación de los materiales en las condiciones de humedad óptima de compactación y humedad de saturación, las respuestas obtenidas mostraron que las resistencias más altas se alcanzaron a humedades óptimas de compactación, así como menores deformaciones, lo cual es coincidente con las expectativas teóricas.

#### **4.2. RECOMENDACIONES**

- En lo posterior se recomienda el estudio del material sub-base puesto en obra de compactación.
- Se recomienda tener mucho cuidado al utilizar los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos.
- Dar mantenimiento al equipo de C.B.R. para expiación y penetración.
- En lo posible usar un extensómetro para medir la deformación para tener mayor precisión en el ensayo.