

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### 1.1 GENERALIDADES.

La construcción de capas sub-base en carreteras requiere un conocimiento ingenieril detallado de los materiales involucrados.

Por lo general, se utilizan materiales disponibles en el sector de emplazamiento de la obra, sobre los que se aplican técnicas de mejoramiento de suelos con el objetivo de mejorar su comportamiento y disminuir los espesores de diseño en cada una de las capas que forman el pavimento.

La conformación de una capa sub base debe tener como función principal evitar la ascensión capilar del agua, controlar los cambios de volumen del terreno de fundación, evitando de este modo deformaciones no admisibles. Generalmente se acepta que el material de esta capa corresponda a tipos de suelo A-1 o A-2, según clasificación AASHTO, con un CBR del 40 % como mínimo según norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

Cuando se ejecuta una carretera es complicado tener el material deseable para la conformación de una capa sub-base, y muchas veces tenemos bastante suelos finos, estos suelos corresponden al grupo de suelos inestables colapsables, los cuales, bajo acción aislada o combinada de incrementos de humedad o estado tensional, pueden experimentar grandes deformaciones que generan daños significativos sobre las estructuras que sustentan.

La plasticidad de un suelo se debe al contenido de partículas más finas de forma laminar. Ya que la forma laminar ejerce una influencia importante en la compresibilidad del suelo, mientras que el pequeño tamaño propio de este tipo de suelos hace que la permeabilidad del conjunto de material sea muy baja, al complementarse este con material granular para conformar la capa sub-base que por características de diseño tienen que cumplir con la función de drenaje donde el suelo tiene que ser granular y la excesiva presencia de material con índice plástico elevado perturbaría el funcionamiento para el cual ha sido diseñado y por consiguiente a su resistencia.

## **1.2 JUSTIFICACION.**

El ensayo de CBR es antiguo pero de gran importancia para los ingenieros civiles para poder determinar la expansión del suelo bajo la estructura del pavimento cuando este se satura y la pérdida de resistencia que sufre el mismo. Probablemente sea el ensayo más utilizado en el mundo para determinar la capacidad de soporte de los suelos constituyentes de los cimientos de la plataforma.

Se tiene conocimiento previo que los suelos en el departamento de Tarija se caracterizan por tener alto contenido de material fino, caracterizado por la presencia de limos, arenas finas y arcillas en gran parte de su territorio.

Así mismo, la mayoría de sus carreteras y proyecciones a futuro de las mismas estarán asentados sobre estos suelos, siendo fundamental la determinación del CBR para la proyección de estas obras en nuestra región.

Al momento de realizar un ensayo de CBR, el tiempo es un factor importante ya que este es moroso y de mucho cuidado, donde se somete un suelo a la penetración de un vástago cilíndrico a una velocidad constante. Previamente haber realizado la compactación y sumergido en agua para su saturación durante cuatro días, donde se mide el eventual hinchamiento del suelo a medida que se satura.

El resultado de todo este proceso es la obtención de la capacidad soporte del suelo comparado con una grava patrón, en porcentaje. Mientras que en la realización de los ensayos para obtener el índice de plasticidad, el paso que más se demora es en el secado de la muestra en horno, realizable en un tiempo medio de un día.

El presente trabajo surge como una alternativa de referencia al momento de determinar la capacidad soporte (CBR) de la capa sub-base según el valor de índice plástico que tenga dicha muestra. Se pretende que la relación CBR vs IP (índice de plasticidad) brinde un ahorro de tiempo y economía ya que realizar un ensayo de CBR es más moroso que el ensayo para la obtención del índice de plasticidad.

### **1.3 PLANEAMIENTO DE HIPOTESIS.**

El valor del índice de plasticidad en los materiales que componen la capa sub-base es un factor que tiene gran incidencia en la conformación de la misma y en su capacidad soporte (CBR) cuando se construye una carretera.

## **1.4 OBJETIVOS.**

La presente investigación tiene los siguientes objetivos:

### **1.4.1 Objetivo General.**

Realizar un análisis sobre los materiales que componen la capa sub-base de pavimentos cuyas muestras presenten diferentes valores de índice plástico, obteniendo como resultado curvas que relacionen el CBR con el Índice de Plasticidad.

### **1.4.2 Objetivos Específicos.**

- Estudiar las propiedades, características y ensayos necesarios para llevar a cabo la investigación, al material de capa sub-base.
- Averiguar sobre la influencia que tiene el índice de plasticidad en los materiales para la conformación de capa sub-base.
- Realizar ensayos de: Contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, (límite líquido y límite plástico), compactación Proctor modificado T-180 y ensayo de CBR. Para el material de cada proyecto y las diferentes muestras con los incrementos de material fino que pasa el tamiz N°200.
- Demostrar la hipótesis de la investigación mediante curvas donde se relacione; CBR (capacidad soporte) vs Índice de Plasticidad.
- Analizar los resultados obtenidos y realizar las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

## **1.5 ALCANCE DE LA INVESTIGACION.**

La investigación sobre el análisis del CBR de la sub-base con diferentes valores de índice plástico constará de dos partes; primera la parte teórica donde se recolectará información necesaria de diferentes bibliografías para realizar la investigación; segunda la parte práctica donde se realizara los ensayos necesarios para demostrar la hipótesis.

Se recolectará muestras de material que componen la capa sub base a tres proyectos de distintas partes del departamento de Tarija de pavimentos flexibles para realizar los ensayos correspondientes. El material será suministrado por el Servicio Departamental de Caminos de la ciudad de Tarija (SEDECA). Los materiales serán recolectados a proyectos viales departamentales que se encuentran en ejecución, estos proyectos serán: (Chocloca – Chaguaya), (Puerta al Chaco – Canaletas), (San Jacinto – Temporal).

Se realizará un análisis de las propiedades y características del material usado para la conformación de la capa sub base, las cuales serán estudiadas y clasificadas para los diferentes usos de la ingeniería.

Se llevarán a cabo los ensayos de límites de Atterberg, Límite Líquido y Límite Plástico, para determinar el índice de plasticidad del material en estudio. Para la determinación del CBR (capacidad de soporte) que demostrará la resistencia que tenga el material de sub base, se realizará la compactación del material en estudio con diferentes valores de índice plástico, para posteriormente medir la expansión de dicha muestra y finalmente determinar la capacidad soporte (CBR) de las diferentes muestras que se ensayarán en laboratorio.

Esta investigación se limitará a analizar la capacidad soporte de la sub-base en función a la variable de plasticidad. Cumpliendo las especificaciones mínimas y máximas para una sub-base especificada en la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

## CAPITULO II

### ESTADO DE CONOCIMIENTO PREVIO AL ANALISIS DEL CBR DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICE PLASTICO

#### 2.1 DEFINICION DE CAPA SUB-BASE.

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 capa de sub-base está orientada por las siguientes reglas:

- Disminuir el espesor de base que requiera un diseño, reemplazando parte del material de base por uno de inferiores características, el cual viene a formar la capa de sub-base con un menor costo.
- Servir de refuerzo 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 base y también para impedir que la base sea afectada por la plasticidad, elasticidad y cambios volumétricos de los suelos sub-rasantes.
- 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 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 exigen compactaciones del 95% del Proctor modificado. Su límite líquido 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 pasa el tamiz No 200 no deberá ser mayor al 8%.

### 2.1.1 Generalidades de la capa sub-base.

Este trabajo para conformar una capa sub-base consiste en la obtención, explotación, acarreo, tendido, humedecimiento, mezcla, conformación y compactación del material de sub-base; el control de laboratorio y operaciones necesarias para construir en una o varias capas, una sub-base del espesor compactado requerido, sobre la sub-rasante previamente preparada y reacondicionada.

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.

En la actualidad como elemento drenante en la sub-base se esta utilizando con mucha frecuencia geotextiles. El geotextil se define como cualquier textil permeable. Sus propiedades hidráulicas son, convenientes para las funciones de filtración y drenaje.

### 2.1.2 Definición de pavimento.

Un pavimento, se define como una estructura vial, formada por una o varias capas de materiales seleccionados, el cual se construye sobre la sub-rasante, y que 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.

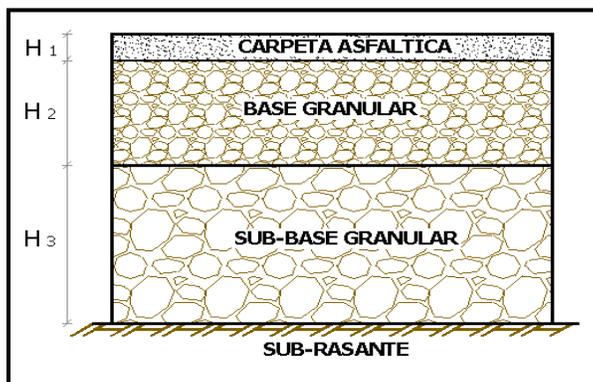


Figura (2-1). Capas estructurales de un pavimento flexible.

### 2.1.3 Pavimento flexible.

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 disipación de tensiones, presiones que van 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 estructuras, 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>

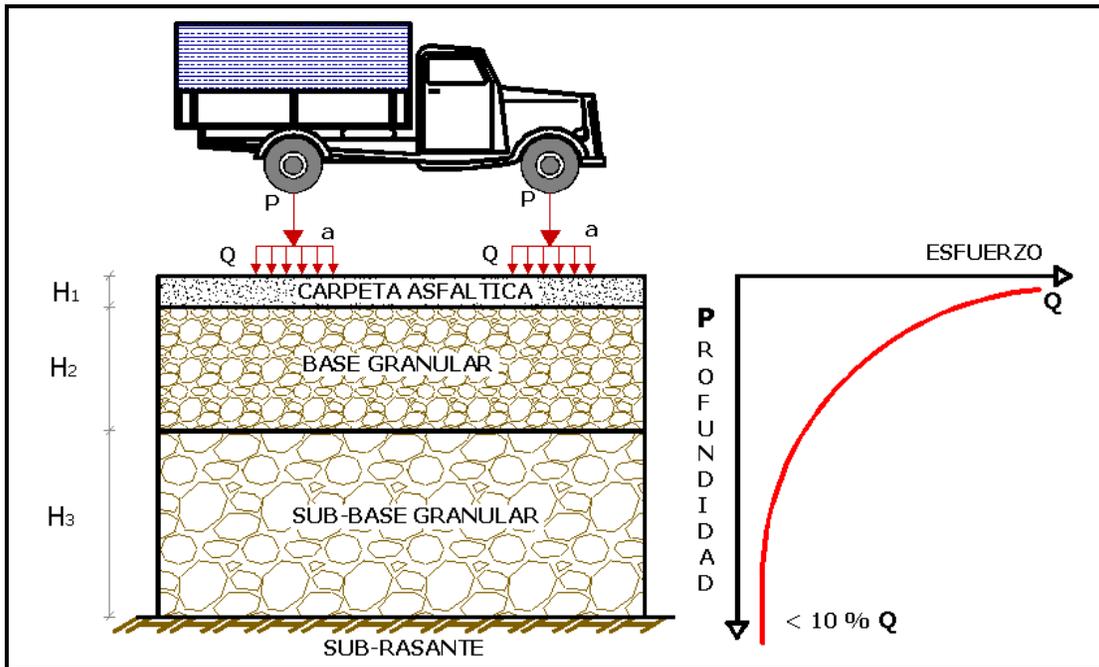


Figura (2-2). Mecanismo de disipación de tensiones en Pavimentos Flexibles.

## **2.2 VARIABLES QUE PARTICIPAN EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS.**

- Variables estructurales
- Tránsito
- Clima y condiciones regionales
- Costos de construcción y costos de mantenimiento

### **A) Variables estructurales.**

- Terreno de fundación o Sub-rasante
- Paquete estructural del pavimento

Fijada una sub-rasante estudiadas sus características promedio, su humedad, sus límites de consistencia, su granulometría – clasificación y principalmente su capacidad de soporte y ligados los esfuerzos de las cargas (Ejes) que han de circular por una vía, es fácil para el Ingeniero diseñar una estructura de la vía, sea pavimentada o afirmada por diversos métodos. La estructura estará compuesta por diversas capas de materiales diferentes, que resistan y tengan el espesor conveniente para absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a una profundidad determinada. Como todo proceso de construcción va relacionado con un costo económico, se seleccionarán materiales vírgenes, semiprocesados o procesados para conformar cada capa; así obtendremos una estructura resistente de arriba hacia abajo con materiales de mayor especificación hacia menor calidad y costo que podrá en algunos casos estar conformada por un suelo mejorado o de préstamo, una sub-base, una base y una carpeta de rodadura, en orden a los esfuerzos crecientes que deben soportar cada capa.

### **B) Tránsito.**

Es un parámetro importante al momento de diseñar un pavimento, según el tipo de vehículos, peso y tipo de eje de los vehículos es como se dimensiona los espesores de las capas que componen el pavimento tomando en cuenta el índice de crecimiento anual y el periodo para el cual están siendo diseñados.

### **C) Clima y condiciones regionales.**

En la concepción de un pavimento, para una unidad homogénea de diseño, interesa conocer:

\* **Temperatura.-** Que influye en la resistencia estructural de los componentes granulares de la sub-base o base al cambio de clima tanto a temperaturas elevadas como al congelamiento; en pavimentos rígidos, participa en los métodos de construcción y en el dimensionamiento de las juntas.

\* **Agua.-** Es un parámetro muy crítico, ya que es definitivo en el comportamiento de las estructuras de pavimento. se debe tener en cuenta para la valoración de obras de drenaje y de sub-drenaje y además tiene otras incidencias, como por ejemplo, la elección del tipo de mezcla asfáltica y tipo de pavimento (pavimento rígido para zonas muy lluviosas); tiene otras incidencias, como influir directamente en el bombeo de las capas granulares y en los cambios volumétrico de sub-rasantes expansivas, como también, en la contaminación de la sub-base a causa del ascenso de los niveles freáticos. Junto con la temperatura y el agua, se debe tener en cuenta:

- Topografía de la zona
- Condiciones regionales de humedad relativa, presión atmosférica, viento, entre otras.

### **D) Costos de construcción y costos de mantenimiento.**

En un proyecto de pavimentación, se debe hacer un balance, entre las condiciones técnicas y los aspectos económicos de construcción y de mantenimiento. Para tal fin, se debe analizar el proyecto mediante modelos de evaluación, como HDM IV.

## 2.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.

En la construcción de vías terrestres es indispensable la aplicación de los principios de la mecánica de suelos ya que 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 recursos es esencial proyectar basándose en el conocimiento de las propiedades y características de los suelos encontrados en el lugar donde ésta se construirá. Las propiedades de los suelos, determinan 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 relacionada con algunas propiedades de los áridos que los caracterizan.

### 2.3.1 Tamaño de sus partículas.

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

- **Gravas:** 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 mayor a 1, entonces se produce en ellas el flujo turbulento, sus partículas son visibles en general son no plásticas

- **Arenas:** partículas rocosas con diámetros entre (2 y 0.06) mm. los granos se apelmazan si están húmedos en este tipo de material no se produce el flujo turbulento. Cuando están secos tienen una ligera cohesión pero se reducen a polvo fácilmente entre los dedos y son fácilmente erosionables por el viento.

- **Limos:** con tamaño de partículas entre (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 a los dedos.

- **Arcillas:** con tamaños de partícula menores a 0.002 mm. 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.

### **2.3.2 Estructura de su masa.**

Se refiere a la resistencia que los agregados del suelo tienden a desintegrarse o romperse frente a la acción del agua y manipulación mecánica. Un factor muy importante en afectar la estabilidad de la estructura es el contenido de agua que hay en el material ya que determina el grado en que las fuerzas mecánicas causan destrucción en la estructura. Conviene insistir en una afirmación ya asentada: un suelo nunca es un mero agregado desprovisto de organización, al contrario, sus partículas se disponen en forma organizada, siguiendo leyes naturales y según la acción de fuerzas que son susceptibles de análisis.

En los suelos formados por partículas relativamente grandes (gravas y arenas) las fuerzas que intervienen para formar la estructura son conocidas y sus efectos son relativamente simples de calificar; por ello, prácticamente no hay discusión respecto al mecanismo de estructuración que, por otra parte, es verificable a simple vista.

Por el contrario, en los suelos formados por partículas muy pequeñas (limos y arcillas), las fuerzas que intervienen en los procesos de estructuración son de un carácter mucho más complejo y las estructuras resultantes son sólo parcialmente verificables por métodos indirectos, relativamente complicados.

### **2.3.3 Contenido de humedad.**

Esta propiedad física del suelo es de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están regidos, por la cantidad de agua que contienen. El contenido de humedad de un suelo es la relación del cociente del peso de las partículas sólidas y el peso del agua que guarda, esto se expresa en términos de porcentaje.

La humedad que tiene un suelo es una propiedad que se mide para diferentes usos en la ingeniería y está normado , su uso se extiende a ensayos de compactación donde se

necesita saber la cantidad de agua necesaria que debe contener los materiales de diferentes capas del pavimento para tener un comportamiento estructural resistente indicado en especificaciones y medidos a través de pruebas de CBR en los materiales que componen las capas del pavimento compactados a una determinada energía de compactación. El grado de compactación que alcanza un suelo dado, sometido a un procedimiento de compactación, depende en gran parte del contenido de humedad del suelo. La compactación máxima se obtiene para un cierto contenido de humedad conocida como Contenido de Humedad Óptimo, mientras que el procedimiento utilizado para mantener durante la compactación de los terraplenes o capas estructurales de un pavimento que deben estar cerca a la Humedad Optima, se conoce como el control de humedad.

El proceso de la obtención del contenido de humedad de una muestra se hace en laboratorios; el equipo de trabajo consiste en un horno donde la temperatura pueda ser controlable. Una vez tomada la muestra del sólido en estado natural se introduce al horno, donde se calienta el espécimen a una temperatura de más de 100 grados Celsius, para producir la evaporación del agua y su escape a través de ventanillas. Se debe ser cuidadoso de no sobrepasar el límite, para no correr el riesgo de que el suelo quede quemado con la alteración del cociente de la determinación del contenido de humedad. El material debe permanecer un periodo de doce horas en el horno.

Cumplidas ya las 12 horas de secado de la muestra de tamaño normal se procede a retirar y pesar, para así obtener el peso del suelo seco. El peso del agua será la diferencia entre el peso de la muestra en estado natural y la muestra seca de suelo.

#### **2.3.4 Análisis Granulométrico.**

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría prueba estándar (ASTM D422, AASHTO T88), que es la propiedad que tiene los suelos naturales de mostrar diferentes tamaños en su composición que consiste en obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforma un suelo. Esto se realiza con ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASTHO, Figura (2-3), donde se obtiene los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculo y la curva granulométrica.

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
75	( 3" )
63	( 2 ½" )
50	( 2" )
37,5	( 1 ½" )
25	( 1" )
19	( ¾" )
9,5	( ⅜" )
4,75	( N° 4 )
2	( N° 10 )
0,425	( N° 40 )
0,075	( N° 200 )

Figura (2-3). SERIE DE TAMICES. fuente: norma ABC.

Si bien se realiza una distribución de tamaños, esto no incide en la forma que puedan tener los granos de suelo, ya que al retener material en una malla se observa diferentes tamaños y el porcentaje que se calcula está basado estrictamente en los pesos que se retiene en la malla, referido al peso total que se utiliza en el ensayo. El factor fundamental del ensayo es obtener la curva granulométrica para representar la graduación de los suelos, donde diferentes tamaños de granos se dibujan en el eje de las abscisas a escala logarítmica y los porcentajes en peso del material que pasa cada tamiz en el eje de las ordenadas a escala natural. La unión de varios puntos nos llega a dar la curva granulométrica del suelo estudiado. La forma de la curva empinada nos indica que se trata de un suelo uniforme, mientras que la curva suave y un tanto extendida nos indica que se trata de un suelo bien graduado. A veces se presenta inflexiones en la curva lo que indica que el material ensayado es de graduación incompleta.

En la figura(2-4). Se puede apreciar la curva granulométrica y algunos parámetros.

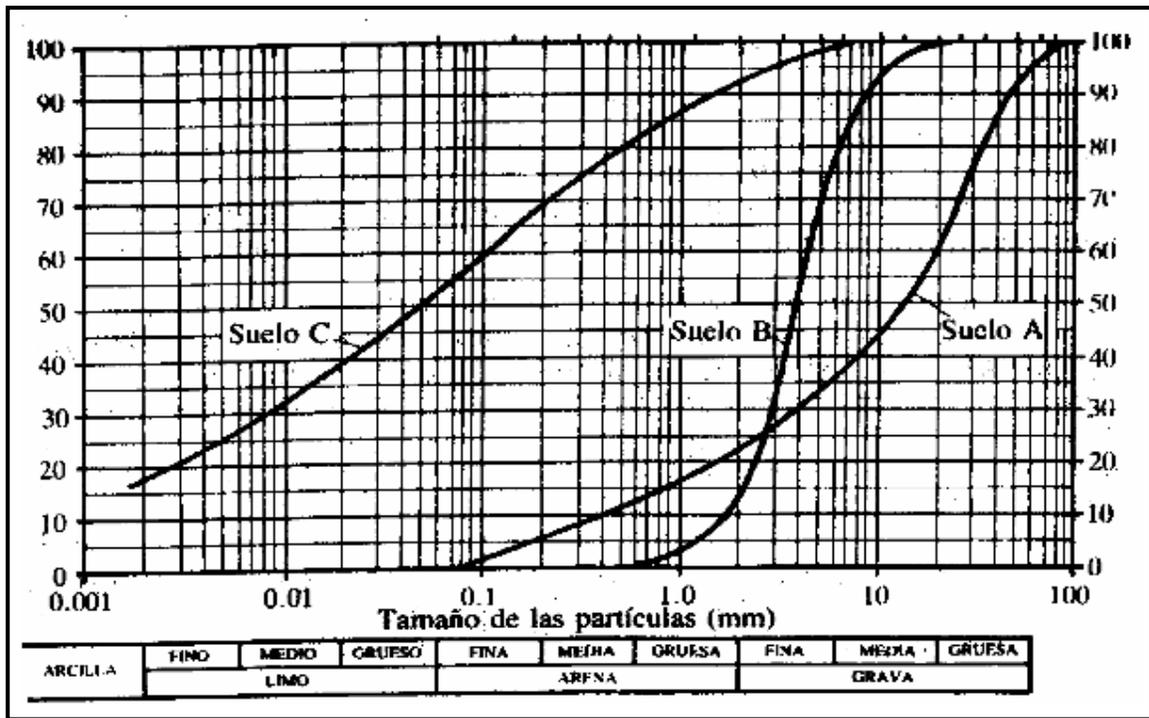


Figura (2-4). Curvas granulométricas de suelos definidos.

- La curva.-
- A: Suelo bien graduado y de grano grueso.
  - B: mal graduado, poco uniforme (curva parada sin extensión)
  - C: Suelo arcilloso o limoso (fino)

En la clasificación de los suelos para el uso en ingeniería se está acostumbrado utilizar algún tipo de análisis granulométrico; este ensayo constituye una parte de los criterios de aceptabilidad de suelos para carreteras.

### 2.3.5 Límites de Atterberg.

Definiciones básicas.-

- Material elástico: Se deforma bajo la acción de una fuerza, pero recupera su forma original.
- Material plástico: Se deforma bajo la acción de una fuerza, pero al contrario del material elástico, este no recupera su forma original.
- Suelos plásticos: suelos de granos finos (arcillas)
- Suelos no plásticos (suelos gruesos, gravas y arena)

Un agente importante para que se produzca la plasticidad, es el contenido de humedad con que cuenta el suelo.

- Suelos cohesivos.- Los suelos que han determinado su contenido de humedad forman una masa consistente de modo que sus partículas quedan unidas entre sí, por ejemplo: Arcilla.
- Suelos no cohesivos.- Son aquellos que no tienen las propiedades mencionadas anteriormente, por ejemplo: Arenas y gravas.

#### ❖ **Límites Propuestos por Atterberg.**

**1.- Límite de contracción.-** Es el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, debajo del cual no se produce reducción adicional de volumen o contracción en el suelo.

**2.- Límite plástico.-** Es el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico.

**3.- Límite líquido.-** Es el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico, según esta definición los suelos plásticos en el límite líquido tienen una resistencia baja al esfuerzo de corte que según Atterberg es de 25 g/cm<sup>2</sup>.

Los límites líquido y plástico han sido ampliamente utilizados en todas las regiones de mundo, principalmente con objetivos de identificación y clasificación de suelos. El límite líquido en ocasiones puede utilizarse para estimar asentamientos en problemas de consolidación y ambos límites son algunas veces útiles para predecir la máxima densidad en estudios de compactación.

Cuando existe una atracción entre partículas y cuando interactúa el agua con el suelo, produciendo una masa que permanece unida y se deforma plásticamente para diferentes contenidos de humedad, entonces se llaman suelos cohesivos. Cuando ocurre todo lo contrario a lo que se menciona en el anterior párrafo, estamos hablando de suelos no cohesivos.

### ❖ Estados de Consistencia.

La consistencia de un suelo varía con la humedad; Atterberg, mediante analogías definió los estados de consistencia de un suelo figura (2-5), observando que el mismo desde un grado de saturación hasta un grado seco tiene los siguientes estados.

ESTADO	DESCRIPCION	LIMITES
Líquido	Mantequilla blanda, líquido viscoso	→ LL
Plástico	Mantequilla blanda a masilla dura, se deforma pero no se agrieta	
Semi Sólido	Queso, se deforma permanentemente y se agrieta	→ LP
Sólido	Caramelo duro, falla al deformarse	→ LC

Figura (2-5). Estados de Consistencia.

#### 2.3.5.1 Límite líquido.

El Límite Líquido prueba estándar AASHTO T-89, es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo colocado en cuchara de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, con un ranurador que se encuentra estandarizado, después de haber dejado caer 25 veces la cuchara desde 10mm de altura a través del giro de una manivela que la levanta y la deja caer sucesivamente hasta que entren en contacto en una longitud de 1 cm según norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). Es decir, es el contenido de humedad (en %) con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia de estado líquido al plástico.

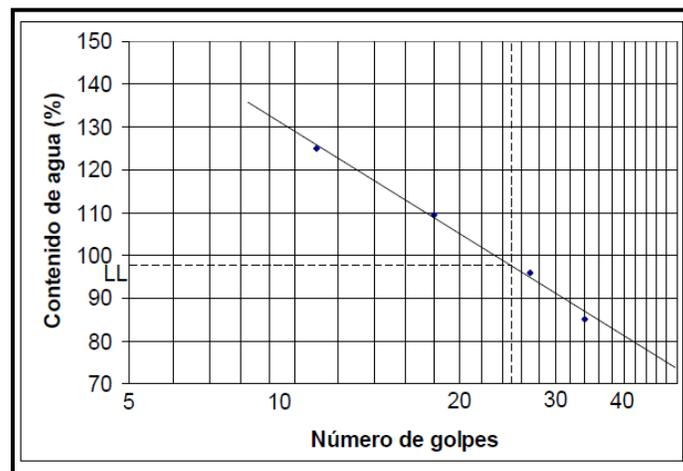


Figura (2-6). Curva de fluidez.

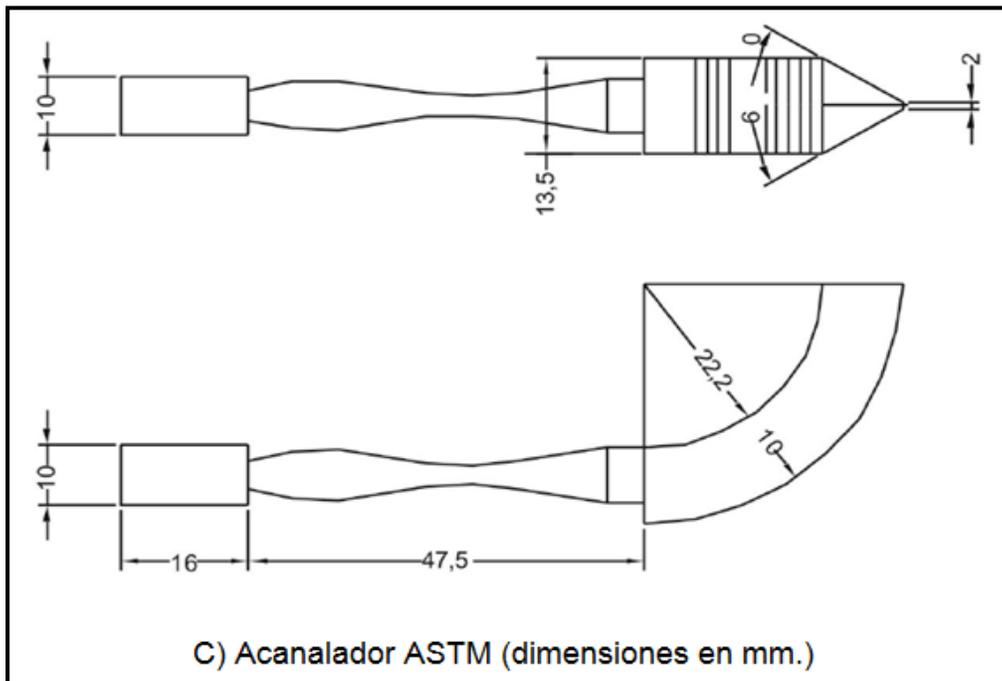
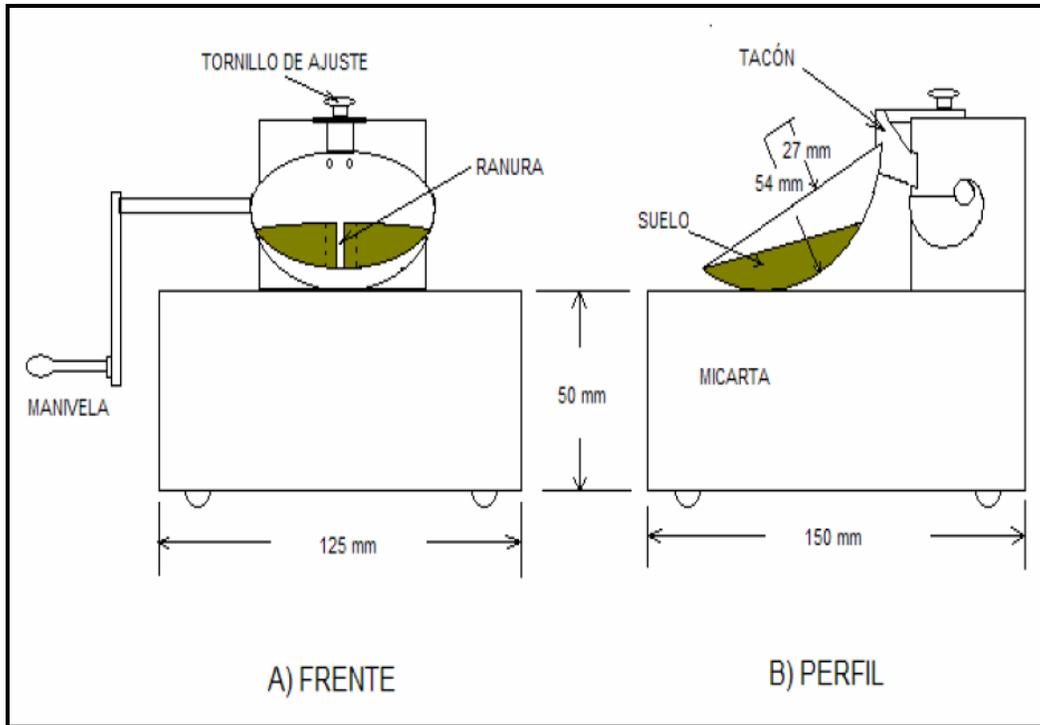


Figura (2-7). Esquema de la copa de Casa Grande.

Los contenidos de humedad con que se realiza el ensayo de límite líquido se grafican en función al número de golpes que se realiza el cierre de la zanja en la copa de casa grande.

#### 2.3.5.4 Límite plástico e Índice de plasticidad

El Límite Plástico prueba estándar AASHTO T-90, Humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco 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 3mm de diámetro y longitud de 10 cm. amasados sobre un cristal esmerilado hasta que se agrieten y no puedan ser reamados ni reconstituidos.

Luego se colocan en 3 cápsulas para determinar su humedad a través de la media aritmética de las muestras, o sea el Límite de Plasticidad.

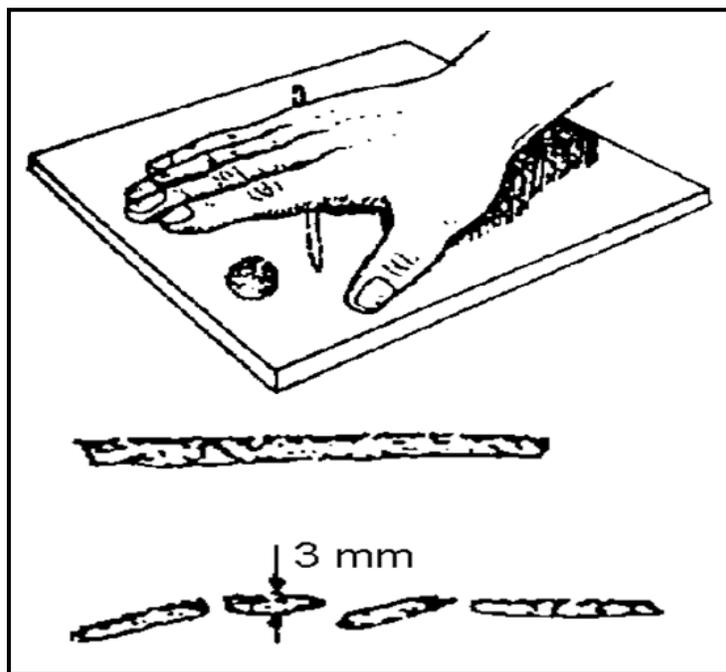


Figura (2-8). Determinación del Límite Plástico.

#### ❖ Índice de plasticidad.

Tanto el límite líquido como el límite plástico, dependen de la calidad y del tipo de arcilla; sin embargo, el índice de plasticidad, depende generalmente, de la cantidad de arcilla en el suelo.

El Índice de Plasticidad se obtiene haciendo la diferencia del Límite Líquido y del Límite Plástico.

$$IP=LL-LP$$

La consistencia de un suelo depende de la plasticidad que tenga la misma en la figura (2-9) se puede ver la variación de la consistencia de un suelo según su valor de plasticidad presente.

<b>CONSISTENCIA</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD</b>
Suelo No Plastico	0
Suelo De Baja Plasticidad	< 7
Suelo Medianamente Plastico	7-17
Suelo Altamente Plastico	> 17

Figura (2-9). Variabilidad de la plasticidad según el índice de plasticidad

### **2.3.6 Clasificación de suelos.**

El Departamento de Caminos Públicos de USA (Bureau of Public Roads) introdujo en 1929 uno de los primeros sistemas de clasificación, para evaluar los suelos sobre los cuales se construían las carreteras. En 1945 fue modificado y a partir de entonces se le conoce como Sistema AASHO (American Asociaty of State Highway Officials) y recientemente AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) deriva de un sistema desarrollado por A. Casagrande para identificar y agrupar suelos en forma rápida en obras militares durante la guerra.

### 2.3.6.1 Sistema AASHTO.

Este sistema describe un procedimiento para clasificar suelos en siete grupos, basado en las determinaciones de laboratorio de granulometría, límite líquido e índice de plasticidad. La evaluación en cada grupo se hace mediante un "índice de grupo", el cual se calcula por la fórmula empírica:

$$IG = 0,2*a + 0.005*a*c + 0,01*b*d$$

Donde:

- a: Exceso sobre 35 de la cantidad que pasa por el tamiz N°200, expresado como número entero y positivo mínimo valor 0 y máximo valor 40.
- b: Exceso sobre 15 de la cantidad que pasa por el tamiz N°200, expresado como número entero y positivo mínimo valor 0 y máximo valor 40.
- c: Exceso de límite líquido sobre 40, expresado como número entero y positivo mínimo valor 0 y máximo valor 20.
- d: Exceso de índice de plasticidad sobre 10, expresado como número entero y positivo mínimo valor 0 y máximo valor 20.

Se informa en números enteros y si es negativo se informa igual a 0. El grupo de clasificación, incluyendo el índice de grupo, se usa para determinar la calidad relativa de suelos de terraplenes, material de sub-rasante, sub bases y bases.

Disponiendo de los resultados de los ensayos requeridos, proceda en la tabla de izquierda a derecha y el grupo correcto se encontrará por eliminación. El primer grupo desde la izquierda que satisface los datos de ensaye es la clasificación correcta. Todos los valores límites son enteros, si alguno de los datos es decimal, se debe aproximar al entero más cercano. El valor del índice de grupo debe ir siempre en paréntesis y en número entero después del símbolo del grupo, como: A-2-6 (3); A-7-5 (17), etc.

Este método define:

- Grava: material que pasa por 80 mm y es retenido en tamiz de 2
- Arena gruesa: material comprendido entre 2 mm y 0.5 mm
- Arena fina: material comprendido entre 0,5 y 0,08 mm.
- Limo arcilla: material que pasa por tamiz 0,08 mm.

El término material granular se aplica a aquellos con 35% o menos bajo tamiz 0,08 mm; limoso a los materiales finos que tienen un índice de plasticidad de 10 o menor; y arcilloso se aplica a los materiales finos que tienen índice de plasticidad 11 o mayor. Materiales limo arcilla contienen más del 35% bajo tamiz 0,08 mm.

Cuando se calcula índices de grupo de los subgrupos A-2-6 y A-2-7, use solamente el término del índice de plasticidad de la fórmula.

Cuando el suelo es NP o cuando el límite líquido no puede ser determinado, el índice de grupo se debe considerar (0).

Si un suelo es altamente orgánico (turba) puede ser clasificado como A-8 sólo con una inspección visual, sin considerar el porcentaje bajo 0,08 mm, límite líquido e índice de plasticidad. Generalmente es de color oscuro, fibroso y olor putrefacto.

CLASIFICACIÓN GENERAL	MATERIALES GRANULARES (35% ó menos que pasa por el tamiz n° 200)							MATERIALES LIMO- ARCILLOSOS Más del 35% que pasa por el tamiz n° 200			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación en grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Análisis granulométrico, % que pasa											
Tamiz n° 10 .....	50 máx.		51 mín.								
Tamiz n° 40 .....	30 máx.	50 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Tamiz n° 200 .....	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción que pasa por el tamiz n°40 :											
Límite líquido .....			NP	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad .....	6 máx.			10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de grupo .....	0	0	0	0	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.		
Materiales que constituyen fundamentalmente estos grupos .....	Fragmentos de piedra, grava y arena.		Arena fina	Grava y arena limosas ó arenosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	

PROCEDIMIENTO . Valiéndose de los resultados de los ensayos realizados , proceder de izquierda a derecha en la tabla hasta encontrar por eliminación el grupo correcto . El primer grupo de la izquierda con el cual se cumplan los datos es la clasificación correcta del suelo . El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual ó menor que LL-30 . El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es igual ó mayor que LL-30 .

Figura (2-10).Tabla de clasificación AASTHO

### 2.3.6.2 Sistema SUCS.

Este sistema divide los suelos primero en dos grandes grupos, de granos gruesos y de granos finos. Los primeros tienen más del 50 por ciento en peso de granos mayores que 0,08 mm; se representan por el símbolo G si más de la mitad, en peso, de las partículas gruesas son retenidas en tamiz 5 mm, y por el símbolo S si más de la mitad pasa por tamiz 5 mm.

A la G o a la S se les agrega una segunda letra que describe la graduación: W, buena graduación con poco o ningún fino; P, graduación pobre, uniforme o discontinua con poco o ningún fino; M, que contiene limo o limo y arena; C, que contiene arcilla o arena y arcilla.

Los suelos finos, con más del 50 por ciento bajo tamiz 0,08 mm, se dividen en tres grupos, las arcillas (C), los limos (M) y limos o arcillas orgánicos (O). Estos símbolos están seguidos por una segunda letra que depende de la magnitud del límite líquido e indica la compresibilidad relativa: L, si el límite líquido es menor a 50 y H, si es mayor.

#### A) Clasificación de Suelos Granos Gruesos.

Suelos donde (más de 50% retenido en 0,08 mm) se sigue el siguiente procedimiento. Una vez efectuados los ensayos de clasificación, determine la distribución acumulativa de los tamaños de las partículas y clasifique la muestra como grava (G), si el 50%, o más de la fracción gruesa (> 0,08 mm) es retenida en tamiz 5 mm, y clasifíquela como arena (S), si más del 50% de la fracción gruesa (> 0,08 mm) pasa por tamiz 5 mm. Si menos del 5% en peso de la muestra pasa por tamiz 0,08 mm, calcule:

$$Cu = \frac{D60}{D10} \quad Cc = \frac{D30^2}{D10 * D60}$$

Clasifique la muestra como grava bien graduada (GW), o arena bien graduada (SW), si Cu es mayor que 4 para las gravas y mayor que 6 para las arenas, y Cc está comprendido entre 1 y 3.

Clasifique la muestra como grava pobremente graduada (GP), o arena pobremente graduada (SP), si no se satisfacen simultáneamente los criterios de  $C_u$  y  $C_c$  para bien graduada.

Si más del 12%, en peso, de la muestra de ensayo pasa por 0,08 mm, analice los valores del límite líquido (wL) e índice de plasticidad (IP) mediante la línea "A" de la carta de plasticidad).

Clasifique la muestra como grava limosa (GM), o arena limosa (SM), si los resultados de los límites de consistencia muestran que los finos son limosos, es decir, si al dibujar wL versus IP, este punto cae bajo la línea "A" o el IP es menor que 4.

Clasifique la muestra como grava arcillosa (GC), o arena arcillosa (SC), si los finos son arcillosos, es decir, si al dibujar el wL, versus IP, cae sobre la línea "A" y el IP es mayor que 7. Si el punto del límite líquido versus índice de plasticidad cae prácticamente en la línea "A" o está sobre esta línea, pero el índice de plasticidad está comprendido entre 4 y 7, dé clasificación doble tal como GM-GC o SM-SC.

Si pasa por tamiz 0,08 mm del 5 al 12% de la muestra, el suelo llevará clasificación doble, basada en los criterios de graduación y límites de consistencia, tales como GW-GC o SP-SM. En casos dudosos, la regla es favorecer a la clasificación de menos plasticidad. Por ejemplo, una grava con 10% de finos, un  $C_u$  de 20,  $C_c$  de 2,0 y un índice de plasticidad de 6, será clasificado como GW-GM en vez de GW-CG.

## **B) Clasificación de Suelos de Granos Finos.**

Donde el (50% o más pasa por 0,08 mm.) se sigue el siguiente procedimiento.

Clasifique el suelo como una arcilla inorgánica (C), si al dibujar el punto del límite líquido versus índice de plasticidad, éste cae sobre la línea "A" y el índice de plasticidad es mayor que 7.

Si el límite líquido es menor que 50 y el punto wL versus IP cae sobre la línea "A" y el IP es mayor que 7, clasifíquela como arcilla inorgánica de baja a media plasticidad (CL), y como arcilla de alta plasticidad (CH) si el Límite Líquido es mayor que 50 y el punto wL versus IP cae sobre la línea A (Carta de plasticidad fig. 2-11). En caso que el límite líquido exceda a 100 o el IP exceda a 60, expanda la carta de plasticidad manteniendo las mismas escalas y pendiente de la línea "A".

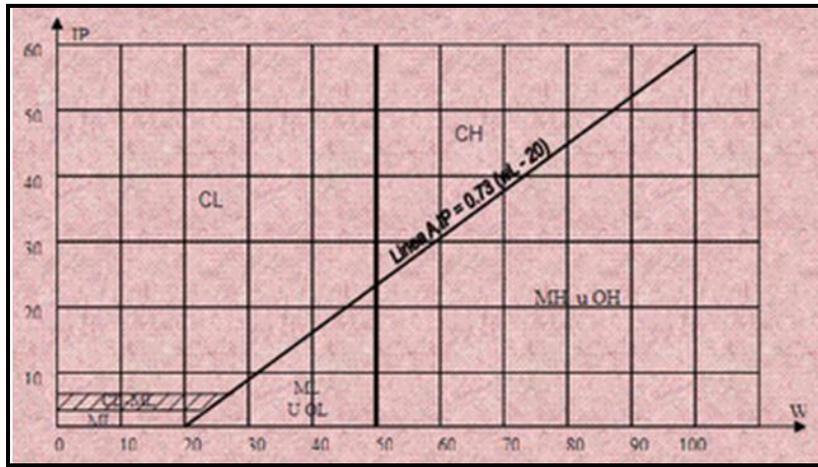


Figura (2-11). Carta de Plasticidad.

Clasifique el suelo como limo inorgánico (M), si al dibujar el punto  $w_L$  versus IP cae bajo la línea "A" o el IP es menor que 4, a menos que se sospeche que hay materia orgánica presente en cantidades suficientes como para influir en las propiedades del suelo (suelo de color oscuro y olor orgánico cuando está húmedo y tibio), en cuyo caso se debe efectuar un segundo límite líquido con la muestra de ensaye secada al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Se clasifica como limo o arcilla orgánicos (O), si el límite líquido después del secado al horno, es menor que 75% del límite líquido de la muestra original determinado antes del secado.

Clasifique el suelo como limo inorgánico de baja plasticidad (ML), o como limo o limo arcilla orgánicos de baja plasticidad (OL), si el límite líquido es menor que 50 y al dibujar  $w_L$  versus IP cae bajo la línea "A" o el IP es menor a 4.

Clasifique el suelo como limo inorgánico de media a alta plasticidad (MH), o como una arcilla u limo arcilla orgánico de media a alta plasticidad (OH), si el  $w_L$  es mayor que 50 y el punto dibujado de  $w_L$  versus IP cae bajo la línea "A" o el IP es menor a 4. Con el fin de indicar sus características de borde, algunos suelos de grano fino deben clasificarse mediante simbología doble. Si el punto dibujado del  $w_L$  versus IP cae prácticamente en la línea "A" o sobre la línea "A" donde el Índice de Plasticidad tiene un rango de 4 a 7, el suelo debe tener clasificación doble tales como CL-ML o CH-OH. Si el punto dibujado de  $w_L$  versus IP cae prácticamente en la línea del límite líquido igual a 50, el suelo deberá tener clasificación doble tales como CL-CH o ML-MH.

En casos dudosos la regla de clasificación favorece al más plástico. Por ejemplo, un suelo fino con un  $w_L = 50$  y un índice de plasticidad de 22 se deberá clasificar como CH-MH en lugar de CL-ML.

Este sistema fue adoptado por el U.S. Army Corps of Engineers en 1942 y en 1947 le introdujo algunos límites para evitar doble clasificación. En 1952, el Cuerpo de Ingenieros en conjunto con el Bureau of Reclamation y asesorados por el Dr. Casagrande efectuaron las últimas modificaciones. Basados en observaciones de terreno y ensayos de laboratorio de materiales de base para caminos y aeropuertos, el Cuerpo de Ingenieros subdividió los grupos GM y SM en dos grupos, designados por los sufijos "d" y "u", que han sido escogidos para representar a materiales que son convenientes o no, respectivamente, para ser empleados en bases de caminos y aeropuertos. Símbolos típicos son GM, y SM.

Se emplea el sufijo "d" cuando el límite líquido es menor o igual a 25 y el índice de plasticidad menor o igual a 5.

SISTEMA CLASIFICACION USCS			
FINOS ( $\geq 50\%$ pasa 0.08 mm)			
Tipo de Suelo	Símbolo	Lim. Líq. $w_L$	Índice de Plasticidad * IP
Limos Inorgánicos	ML	< 50	< 0.73 ( $w_L - 20$ ) $\delta < 4$
	MH	> 50	< 0.73 ( $w_L - 20$ )
Arcillas Inorgánicas	CL	< 50	> 0.73 ( $w_L - 20$ ) $\gamma > 7$
	CH	> 50	> 0.73 ( $w_L - 20$ )
Limos o Arcillas Orgánicos	OL	< 50	** $w_L$ seco al horno $\leq 75\%$ del $w_L$ seco al aire.
	OH	> 50	
Altamente Orgánicos	$P_f$	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.	
Si $IP \geq 0.73 (w_L - 20)$ ó si IP entre 4 y 7 E $IP > 0.73 (w_L - 20)$ , usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH			
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente $w_L$ seco al horno			
En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej: CH-MH en vez de CL-ML.			
Si $w_L = 50$ , CL-CH ó ML-MH			
Tabla V.7 Sistema de Clasificación USCS (a)			

Figura (2-12). Tabla Sistema de Clasificación USCS. (SUELOS FINOS) (a)

SISTEMA CLASIFICACION USCS						
GRUESOS (< 50 % pasa 0.08 mm)						
Tipo de Suelo	Símbolo	% RET 5 mm.	% Pasa 0.08 mm.	CU	CC	** IP
Gravas	GW	50% de lo Ret. En 0.08mm	< 5	> 4	1 a 3	
	GP			≤ 6	<16>3	
	GM	> 12			< 0.73 (wl-20) ó <4	
	GC				> 0.73 (wl-20) ó >7	
Arenas	SW	< 50% de lo Ret. En 0.08 mm	< 5	> 6	1 a 3	
	SP			≤ 6	<16>3	
	SM	> 12			< 0.73 (wl-20) ó <4	
	SC				> 0.73 (wl-20) y >7	
* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC.						
** Si $IP \geq 0.73 (wl-20)$ ó si IP entre 4 y 7 e $IP > 0.73 (wl-20)$ , usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.						
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej. GW-GM en vez de GW-GC.						
				$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}}$		
				$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$		

Tabla (2-13). Sistema de clasificación USCS. (SUELOS GRUESOS) (b)

### 2.3.7 Compactación.

Se entiende por compactación de los suelos al mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. Se distingue de la consolidación de los suelos por lo que este se realiza por medios físicos y la compactación por medios mecánicos.

La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtiene al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. La importancia de la compactación radica en que aumenta la resistencia del suelo y reduce la capacidad de deformación y los vacíos que pueden producir asentamientos futuros.

El establecimiento de una prueba de compactación en el laboratorio cubre, principalmente, dos finalidades: primera por un lado, disponer de muestras compactadas teóricamente con las condiciones de campo a fin de investigar sus propiedades mecánicas

para conseguir datos firmes de proyecto; por otro lado, es necesario poder controlar el trabajo de campo, con vistas a tener la seguridad de que el equipo utilizado está trabajando efectivamente en condiciones previstas del proyecto.

#### **2.3.7.1 Factores Importantes que Determinan la Compactación.**

Los siguientes aspectos son los que más influencia tienen al momento de densificar un suelo con el método de la compactación.

- Naturaleza del suelo.
- Método de compactación.
- Contenido de agua en el suelo (humedad).

##### **A) Naturaleza del Suelo.**

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

Prevalece aún la distinción usual entre suelos finos y gruesos y suelos arcillosos y friccionantes pero en el análisis de los procesos de compactación es muy común que tal distinción se detalle 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 impactos, por amasado y por aplicación de cargas estáticas.

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

Además, ya se comienza a utilizar algunos dispositivos de laboratorio para compactar por vibración, si bien su uso está menos extendido que el de los otros tres métodos. Resulta bastante más fácil diferenciar de un modo analógico los métodos de compactación de 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, con equipo vibratorio, etc.

Se supone que los métodos de laboratorio reproducen las condiciones del proceso de campo, pero en muchos casos no es fácil establecer una correspondencia clara entre el tren de 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 de 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 creciente de aguas, a partir de valores bajos, se obtenían más altos peso 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, disminuyen los pesos específicos secos logrados.

Es decir Proctor puso de manifiesto que para un suelo dado y usado determinado procedimiento de compactación, llamado el óptimo, que produce el máximo peso volumétrico seco es dable 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 correspondientes.

Lo anterior puede explicarse en términos generales si se toma en cuenta que en los suelos arcillosos, a bajos contenidos de agua esta se encuentra en forma capilar produciendo compresiones entre las partículas constituyentes del suelo, las cuales tienden a formar grumos difícilmente desintegrables, que dificultan la compactación.

El aumento en contenido de agua disminuye la tensión capilar; por lo tanto, el aglutinamiento de sus grumos lo que hace que aumente la eficiencia de la energía de compactación pero si el contenido de agua es tal que hay exceso de agua, el grado de casi llenar los vacíos del suelo se impiden una buena compactación puesto que el agua no puede desplazarse instantáneamente y resulta del efecto mecánico que se esté aplicando; esto es más cierto en los suelos más finos.

#### **2.3.7.2 Ensayo Proctor.**

Es un ensayo para obtener la Humedad Óptima de compactación de un suelo en un molde para una determinada 'energía de compactación'. La Humedad Óptima de compactación es aquella humedad (% de agua) para la cual la Densidad del Suelo es Máxima, es decir qué cantidad de agua, en forma repetida y progresiva le debemos agregar a una probeta de suelo en un molde para poderlo compactar lo máximo con una energía concreta, mediante apisonado con una maza en una máquina, mejorando así la uniformidad, compactación, peso específico y resistencia al corte.

Se realizan 4 ensayos de un mismo suelo pero con diferentes humedades de manera que después de haber realizado las compactaciones se obtienen 4 densidades del suelo para 4 humedades diferentes. No son las humedades óptimas, pero se las calcula mediante interpolación de los 4 valores en una gráfica (figura 2-14).

La diferencia entre el ensayo Proctor Normal (ASTM D698 AASHTO T99) y el Proctor Modificado (ASTM D422 AASHTO T180) radica en la energía de compactación utilizada. Por lo tanto, cuando se solicita un suelo compactado al 90% Proctor o Proctor Modificado significa que la compactación debe obtener una densidad seca de al menos el 90% 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 moldes de 6'' de diámetro y 5'' de altura, (figura 2-15) con un pistón de 10 lb. y una altura de caída de 18 pulg. A diferencia del proctor normal que se realiza en tres capas y cada una de las capas con 25 golpes usando moldes de diámetro igual a 4'', altura de 4,6'', un apisonador o martillo de 5.5 lb. y altura de caída de 12 pulg. Estos valores son muy usados en suelos para plateas de fundación, calles o carreteras, y básicamente el objeto es el mejoramiento del suelo a través de la compactación superficial.

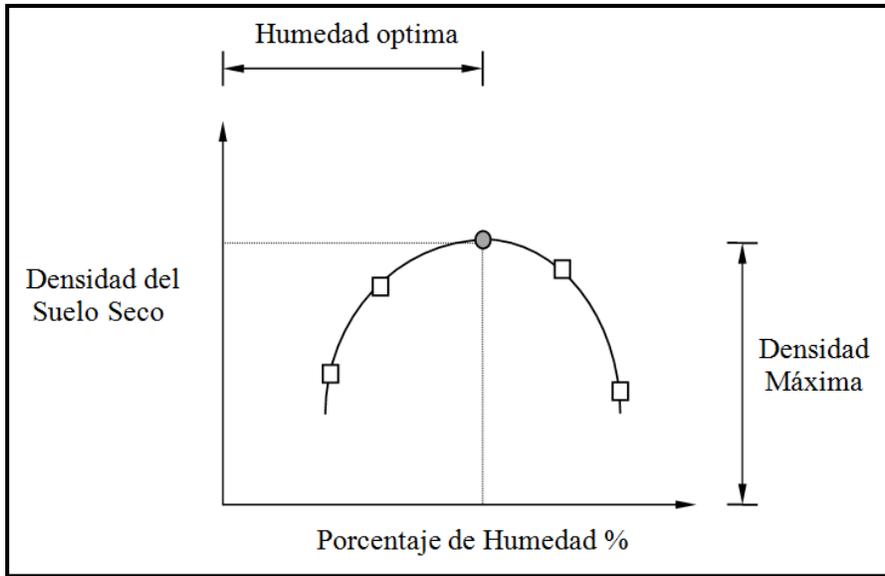


Figura (2-14). Gráfica de la energía de compactación.

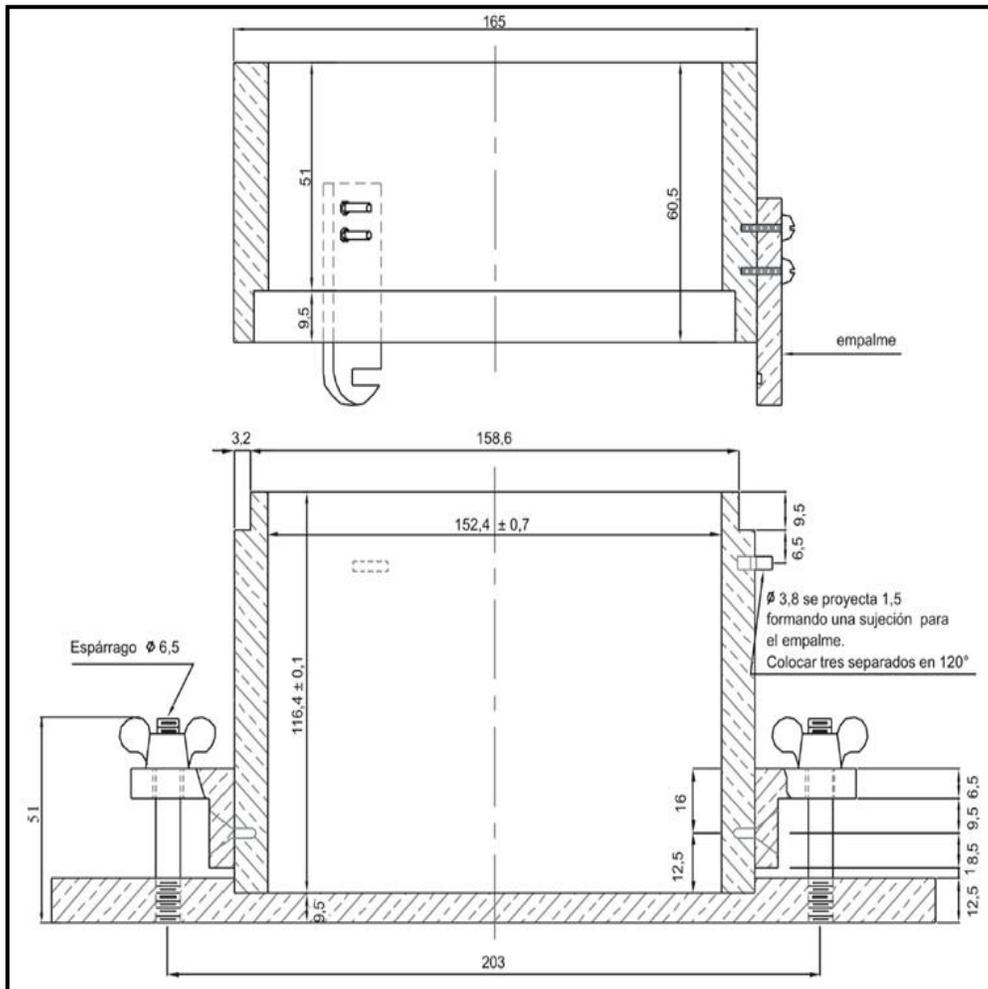


Figura (2-15). Molde de Ensayo de compactación Proctor Modificado T-180.

### 2.3.8 Ensayo de CBR (capacidad de soporte).

El ensayo de la relación de soporte de California se desarrolló por parte de la división de Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificación o material de base de construcción de carreteras. Durante la segunda guerra mundial el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de Norte América utilizó este método para emplearlo en la construcción de aeropuertos.

El ensayo CBR (la ASTM denomina dicho ensayo solamente como una relación de soporte) mide la resistencia al 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 al estado en el cual se encuentran el suelo durante el ensayo.

El número CBR (o solamente CBR) se obtiene como la relación de carga unitaria (en libras por pulgada 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 esto es:

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

De esta ecuación se puede ver que el número CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica, el símbolo de porcentaje se quita, la relación se presenta simplemente en número entero como ser por ejemplo: 3, 45, 98. Los valores de carga unitaria que se deben utilizar en la ecuación son los siguientes:

PENETRACIÓN		CARGA PATRÓN UNITARIA	
Mm	Pulg	MPa	PSI
2,5	0,10	6,9	1,000
5,0	0,20	10,3	1,500
7,5	0,30	13,0	1,900
10,0	0,40	16,0	2,300
12,7	0,50	18,0	2,600

Figura (2-16). Valores de carga unitaria para hallar el CBR.

El número CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2,5 mm. 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 utilizando el ensayo de compactación estándar (o el modificado).

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 los suelos principalmente con fines de utilización con base y sub-rasante bajo pavimentos de carreteras y aeropuertos.

La siguiente tabla de clasificación típica muestra los rangos de CBR:

<b>CBR</b>	<b>Clasificación cualitativa del suelo</b>	<b>Uso</b>
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

Figura (2-17). Valor de CBR, Calificación del suelo y Uso.

<b>CBR</b>	<b>CLASIFICACIÓN GENERAL</b>	<b>USOS</b>	<b>SISTEMA DE CLASIFICACIÓN</b>	
			<b>UNIFICADO</b>	<b>AASHTO</b>
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
>50	excelente	Base	GW,GM	A1-a,A2-4,A3

Figura (2-18). Tabla De Valores Soporte Según El Tipo De Suelos

### 2.3.8.1 Determinación de la Expansión.

a) Una vez determinada 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 colocarán varias pesas de plomo. La sobrecarga que se aplique mediante las pesas de plomo, debe ser prácticamente igual a la correspondiente al pavimento (base, sub-base y capa de rodadura) a construirse, la sobrecarga mínima a emplearse será de 10 libras (4.54Kg), 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) Colocado el molde dentro del tanque con agua, se monta el trípode con un extensómetro, y se toma y registra la lectura inicial.

e) Cada 24 horas y por un periodo de 96 horas (4 días), se toman y registran las lecturas del extensómetro.

f) Al cabo 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 los 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 establecen, generalmente, que los materiales de préstamo para sub-base deben tener expansiones menores del 2% al cabo de 4 días. Se recomienda que los materiales para sub-base tengan expansiones menores 1%.

$$\%exp = \frac{Lf - Li}{h} * 100$$

Donde:

Lf: Lectura final del extensómetro (mm.)

Li: Lectura inicial del extensómetro (mm.)

h: altura total del espécimen (mm.)

### **2.3.8.2 Determinación de la Resistencia a la Penetración.**

Después de saturada 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, sujétese bien el disco y las pesas metálicas al hacer esta operación. Luego remuévase el disco, las pesas y el papel filtro y pésese la muestra.

a) Si no es necesario sumergir la muestra en agua, se colocará sobre ella la pesa anular y se montarán las pesas de plomo equivalente a 10 lb., de tal modo que se obtenga una sobrecarga semejante a la del pavimento a construirse.

b) Si la muestra ha sido sumergida en agua para medir la expansión, y después que haya sido drenada, se colocará la pesa anular y encima de las pesas de plomo que tenía la muestra cuando estaba sumergida en agua; ó sea que la sobrecarga para la prueba de penetración deberá ser prácticamente igual a la sobrecarga colocada durante el ensayo de hinchamiento.

c) El molde con la muestra y la sobrecarga se colocan debajo de la prensa y se asienta el pistón sobre la primera, aplicando una carga de 10lb (4.5Kg).

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 hinca 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 1/2".

f) Hincado el pistón hasta 1/2" (1.27cm), se suelta la carga lentamente; se retira el molde de la prensa, y se quitan las pesas de la base metálica perforada.

g) Finalmente, se determina el contenido de humedad de la muestra.

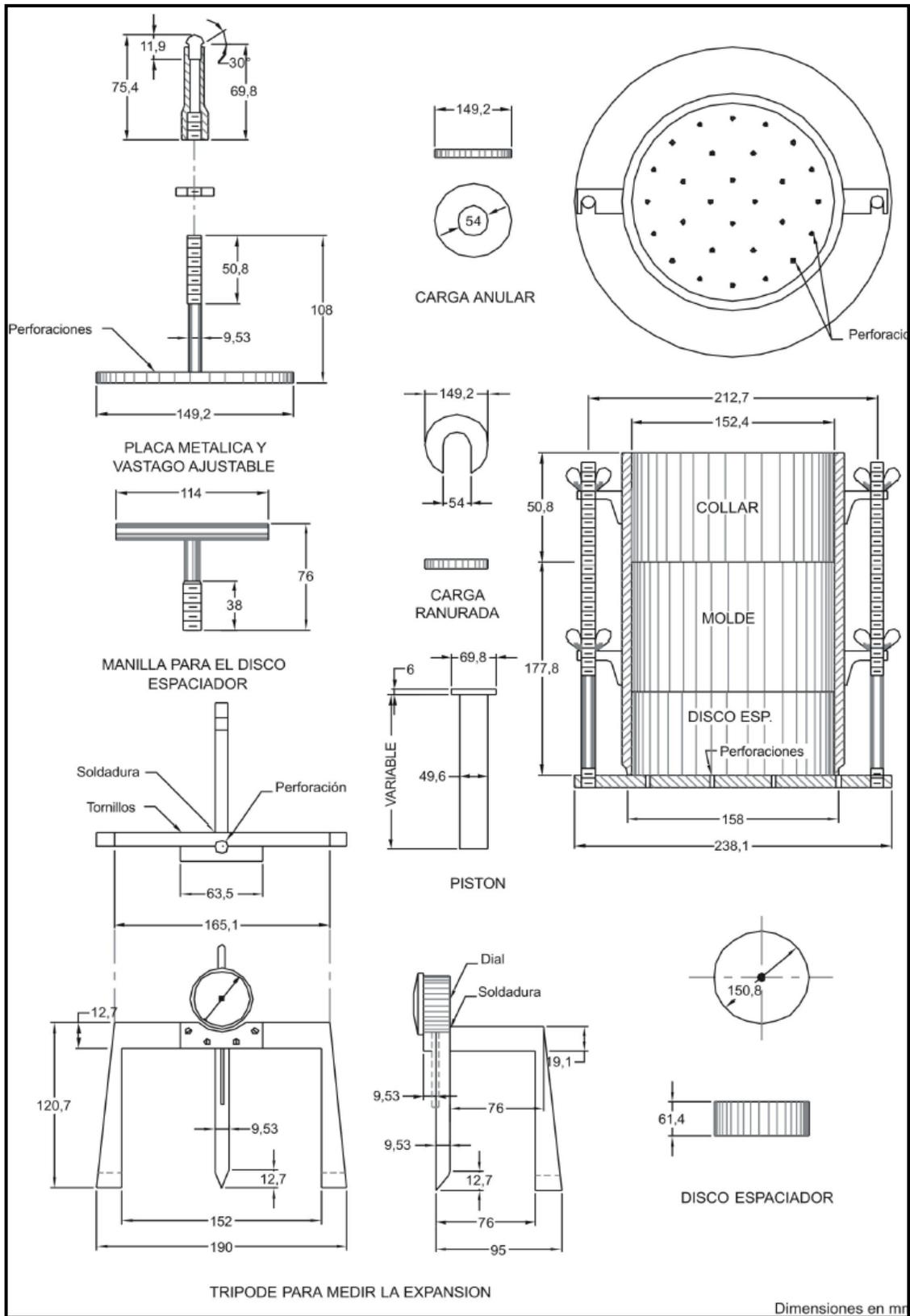


Figura (2-19). Instrumentos para realización ensayo de CBR.

## 2.4 SUELOS FINOS.

Los suelos finos están constituidos de partículas compuestas de fragmentos diminutos de roca, minerales y minerales de arcilla, con textura granular y en hojuelas. De acuerdo al sistema de clasificación unificado estas partículas tienen un tamaño inferior a 0.075 mm, que corresponden a la categoría del limo y la arcilla, por lo que toda fracción de suelo que pasa el tamiz Nro. 200 es considerado como suelo fino.

Se pondrá mayor énfasis en estos suelos ya que son los suelos más problemáticos en la construcción de carreteras debido a la contracción y expansión que sufren las mismas con el cambio de humedad a que son sometidas durante los cambios estacionarios de clima.

- Limos: suelos finos inorgánicos que están comprendidos entre 0,02 mm y 0,002 milímetros.
- Arcillas: suelos finos inorgánicos y plásticos, que presentan una alta resistencia cuando secos y cuya dimensión es menor de 0,002 milímetros.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades fisico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 0.002 mm).
- Desde el punto de vista petrológico, la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 0.002 mm.
- Desde el punto de vista ingenieril, la arcilla es aquel material que tiene un tamaño inferior a 0.002 mm. o pasa el tamiz N°200 su propiedad principal de este material es su impermeabilidad y la facilidad se expande ante la presencia del agua y la contracción cuando está en estado seco. Por lo general es usado en la construcción de presas y no se recomienda el uso de este material en carreteras, edificaciones y puentes por su alta capacidad de cambio volumétrico ante el cambio de clima.

### **2.4.1 Características y propiedades.**

Las características y propiedades de los suelos finos son de primordial importancia ya que estos suelos principalmente están basados en su comportamiento y reacción ante agentes externos, principalmente el agua que es un agente extremadamente preponderante a la hora de conocer sus propiedades y manifestaciones ante otro tipo de suelos. Su condición física determina, la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la capacidad de drenaje, absorción de agua, y su comportamiento plástico.

#### **2.4.1.1 Tamaño de sus partículas.**

De una manera general lo que el tamaño de las granos nos proporciona es una cierta idea de alguna de las propiedades potenciales del suelo. Como las propiedades de una arcilla dependen en gran parte del tipo de mineral arcilloso que predomina y de las sustancias presentes en sus capas de absorción. Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 0.002 mm).

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula; en este sentido, se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 0.002 mm. Según esto, todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan los 0.002 mm.

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

#### **2.4.1.2 Forma de sus partículas.**

La influencia de la forma y de las características mineralógicas en los suelos arcillosos reside en la ubicación de las partículas dentro de la masa, teniendo esta textura

laminar en forma de hojuelas o escamas, que son partículas muy pequeñas con muy poca esfericidad y sólo pueden observarse con microscopios electrónicos.

Este posicionamiento de las partículas de arcilla en forma laminar afecta directamente en la compresibilidad del suelo, ya que el pequeño tamaño propio de este tipo de suelos hace que la permeabilidad de la masa de material sea muy baja y expansiva con el incremento de humedad.

#### **2.4.1.3 Capacidad de absorción.**

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar o en los canales estructurales.

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el absorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas absorbido, denominado absorbato).

La capacidad de absorción se expresa en porcentaje de absorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

#### **2.4.1.4 Hidratación e hinchamiento.**

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las arcillas, y cuya importancia es crucial en la construcción de carreteras. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas,

lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminares es el sodio, las esmécticas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

#### **2.4.1.5 Plasticidad.**

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

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

#### **2.4.1.6 Tixotropía.**

Los suelos que tienen en su masa partículas menores que el tamiz 200 en porcentajes importantes, son suelos cohesivos y exigen un cierto esfuerzo de tracción para separar sus partículas.

La arcilla es un suelo cohesivo, la fuente de esta cohesión no parece estar en la atracción molecular de las partículas en sus puntos de contacto sino en la resistencia al corte de las capas absorbidas que separan las partículas en dichos puntos. Esta hipótesis está corroborada por el hecho de que la cohesión de una muestra de la fracción muy fina de un suelo determinado a un contenido dado de humedad, depende en gran parte de la naturaleza del complejo de absorción. Si el contenido de humedad de un suelo muy fino saturado disminuye, el volumen ocupado por las sustancias absorbidas permanece constante. Por consiguiente, la cohesión aumenta al disminuir el contenido de humedad.

Si se amasa completamente una muestra de la fracción muy fina de un suelo y luego se la deja reposar sin que sufra alteración alguna, la masa adquiere con el tiempo mayor resistencia cohesiva, dicha resistencia aumenta al principio en forma rápida y luego más y más lentamente. Si la muestra es nuevamente amasada a contenido de humedad constante, su cohesión disminuye en forma considerable, pero si se la deja reposar, vuelve a recuperar su valor. Este fenómeno se conoce con el nombre de Tixotropía. La pérdida y el subsiguiente retorno de la resistencia cohesiva parecen deberse a la destrucción y subsiguiente reordenación de la estructura molecular de las capas absorbidas.

#### **A) Contracción en Suelos Finos.**

Un suelo saturado exhibe primeramente una superficie brillante que cambia a opaco al formarse, por evaporación, los meniscos cóncavos, en cada poro. Al irse evaporando el agua, va disminuyendo el radio de curvatura de esos meniscos y aumentando, por lo tanto, la presión capilar sobre las partículas sólidas, que por este efecto, se comprimen; la evaporación seguirá disminuyendo el radio de curvatura de los meniscos y comprimiendo la estructura del suelo, hasta un punto en que la presión capilar sea incapaz de producir mayor deformación; en ese momento comenzará la retracción de los meniscos hacia el interior de la masa de suelo. Físicamente ese momento está señalado por el cambio de tono del suelo, de oscuro a más claro.

En el suelo, los poros y canalículos ocupados por el agua no son de tamaño uniforme, sino que varían entre amplios límites, por lo que el agua no se retraerá al mismo tiempo hacia el interior de la masa, comenzando el proceso en los poros de mayor diámetro. Estadísticamente, puede decirse que toda la gama de diámetros de los canalículos existentes se presentan a lo largo de un capilar, en una distancia relativamente pequeña a partir de la superficie. En arcillas ordinarias, con diámetros de poro comprendidos entre 0,1 y 0,001 de micrón, todos ellos se presentan a una distancia del exterior no mayor que una fracción de milímetro. Por lo tanto, aun cuando una de las aberturas de la superficie corresponda al mayor diámetro que pueda encontrarse en la muestra total de suelo, el menisco necesitará retraerse muy poco para llegar a una zona de pequeño diámetro en la cual pueda desarrollar esfuerzos de tensión importantes.

Finalmente, cada menisco se retirará al diámetro del poro más pequeño para el que un menisco totalmente desarrollado produzca en el suelo la máxima presión capilar que pueda deformar la estructura al máximo.

En ese instante, con su máxima contracción alcanzada bajo esa máxima presión capilar que el agua ejerce, el suelo habrá llegado a su límite de contracción. Cualquier evaporación posterior hará que los meniscos se retraigan hacia el interior sin más incremento en la presión capilar, pues el diámetro de los poros ya no disminuye.

## **B) Factores que intervienen en el fenómeno de la expansión.**

El potencial expansivo de un suelo (presión de hinchamiento y elevación) dependen, como mínimo, de las siguientes variables:

### **1) Naturaleza y tipo de arcilla.**

La composición mineralógica de la arcilla (porcentajes de illita, caolinita y montmorillonita) resulta fundamental en cuanto al potencial expansivo del suelo. Los suelos expansivos por excelencia son aquellos que tienen altos porcentajes de montmorillonita.

## **2) Humedad inicial.**

El elemento “catalizador” del fenómeno de la expansión, es precisamente, la variación en el contenido de humedad del suelo. Por más montmorillonita de que esté compuesta una arcilla, si no hay variación en el contenido de humedad del suelo, no habrá cambios volumétricos.

No es necesario que el suelo se sature completamente para que produzca expansión del mismo. Por el contrario, en determinados casos, es suficiente variaciones en el contenido de humedad del suelo de sólo 1 ó 2 puntos porcentuales, para causar hinchamientos y producir daños estructurales en el pavimento.

El contenido de humedad inicial del suelo controla la magnitud del asentamiento. Arcilla “secas”, con contenido de humedad por debajo del 15 % indican un riesgo de expansión alto, pues fácilmente pueden llegar absorber contenidos de humedad de 35 % con las consecuentes daños estructurales en el pavimento. Por el contrario, arcillas cuyo contenido de humedad está por encima del 30 % indica que la mayoría de la expansión ya ha tenido lugar y sólo es esperable algún leve hinchamiento remanente.

## **3) Fatiga de la expansión**

En muestras sometidas en laboratorio a ciclos de saturación y disecado mostraron señales de fatiga después de varios ciclos. Se ha notado en pavimentos sometidos a variaciones estacionales en el contenido de humedad del mismo que tienden a un cierto punto de estabilización luego de un cierto número de años.

## **2.5 USOS DE LOS MATERIALES EN LA INGENIERÍA DE CARRETERAS.**

Su uso principalmente está destinado a la conformación de las capas estructurales de un pavimento ya sea este flexible o rígido, dependiendo de las especificaciones requeridas para alcanzar las condiciones mínimas de calidad.

### **2.5.1 Terminología de las Diferentes Capas de Pavimento Flexible.**

En la actualidad no existe una terminología única para la designación de las diferentes partes que constituyen un pavimento. Así, por ejemplo, algunos llaman pavimento a la capa superficial de mezcla bituminosa o de concreto; otros designan esta capa con el nombre de firme o afirmado, y muchos llaman pavimento al conjunto de todas las capas.

Nosotros emplearemos en este trabajo de investigación la terminología siguiente:

- Pavimento: se define como una estructura vial, formada por una o varias capas de materiales seleccionados, el cual se construye sobre la sub-rasante, toda la estructura que descansa sobre el terreno de fundación se halla formada por las diferentes capas: sub-base, base, capa de rodamiento y sello.
- Capa Sub-rasante.- Aquella que sirve de fundación al pavimento después de haber sido terminado el movimiento de tierras y que, una vez compactada, tiene las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos de diseño.
- Capa Sub-base: 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
- Capa Base: La capa de material pétreo, mezcla de suelo-cemento, mezcla bituminosa, o piedra triturada, que se coloca encima de la sub-base.
- Carpeta asfáltica: La que se coloca encima de la base y está formada por una mezcla bituminosa o de concreto.

## 2.5.2 Capas de un Pavimento Flexible.

Las capas de un pavimento lo conforman la sub-rasante, la sub-base y la base que tienen como objetivo servir como disipador de la carga entregada a la carpeta de rodadura; estas capas construidas con una finalidad para la cual son construidas deben cumplir ciertas normas y especificaciones que son detalladas a continuación.

### A) Capa Sub-rasante.

Se define como el área de la corteza terrestre, que le va a servir de soporte a la estructura de un pavimento; puede ser sub-rasante natural (en el caso de los cortes), o constituirse en el sitio (artificial, para los terraplenes), sobre la cual se construye autopista, vías urbanas y rurales, carreteras o pistas de aeropuertos.

❖ **Propiedades y Características.-** De su capacidad soporte depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea este flexible o rígido. Si el terreno de fundación es pésimo; por ejemplo, si el material que lo compone tiene un alto contenido de materia orgánica, debe desecharse este material y sustituirse por otro de mejor calidad. Si el terreno de fundación es malo y se halla formado por un suelo fino, limoso o arcilloso, susceptible de saturación, habrá de colocarse una sub-base granular de material seleccionado antes de poner la base y capa de rodamiento.

Si el terreno de fundación es regular o bueno y está formado por un suelo bien graduado que no ofrece peligro de saturación, o por un material de granulometría gruesa, posiblemente no se requerirá la capa de sub-base. Al contrario, si el terreno de fundación es excelente; es decir, que tiene un valor soporte elevado y no existe, además, la posibilidad de que se sature de agua, bastaría colocar encima la capa de rodamiento.

Resumiendo lo expuesto anteriormente, tendremos que:

- Si el terreno de fundación es pésimo, debe desecharse el material que lo compone, siempre que sea posible, y sustituirse este por un suelo de mejor calidad.
- Si el terreno de fundación es malo, habrá que colocar una sub-base de material seleccionado antes de poner la base.
- Si el terreno de fundación es regular o bueno, podría prescindirse de la sub-base.
- Si es excelente, podría prescindirse de la sub-base y la base.

## **B) Capa sub-base.**

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.

❖ **Propiedades y características.-** Tiene por objeto:

- Servir de capa de drenaje al pavimento.
- Controlar o eliminar en lo posible, los cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudiera tener el material de la sub-rasante.
- Controlar la ascensión capilar del agua proveniente de las napas freáticas cercanas, o de otras fuentes, protegiendo así el pavimento contra los hinchamientos que se producen en épocas de helada. Este hinchamiento es causado por el congelamiento del agua capilar, fenómeno que se observa especialmente en suelos limosos donde la ascensión capilar del agua es grande.

El material de la sub-base, debe ser seleccionado y tener mayor capacidad de soporte que el terreno de fundación compactado. Este material puede ser: arena, grava, granzón, escoria de altos hornos o residuos del material de cantera. 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. Su límite líquido debe ser inferior a 35% y su índice plástico no mayor a 8. El CBR no podrá bajar de 40%. Si la función principal de la sub-base es servir de capa de drenaje, el material a emplearse debe ser granular, y la cantidad de material fino (limo y arcilla) que pase el tamiz número 200 no ha de ser mayor del 8%.

### **C) Capa base.**

Esta capa tiene por finalidad absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos y, además, repartir uniformemente estos esfuerzos a la sub-base y al terreno de fundación.

#### **❖ Propiedades y características.-**

Las bases pueden ser granulares, o bien estar formadas por mezclas bituminosas o mezclas estabilizadas con cemento u otro material ligante.

El material pétreo que se emplee en la base, deberá llenar los siguientes requisitos:

- Ser resistente a los cambios de humedad y temperatura.
- No presentar cambios de volumen que sean perjudiciales.
- El porcentaje de desgaste, según el ensayo “Los Ángeles”, debe ser inferior a 35.
- La fracción del material que pase el tamiz N° 40, ha de tener un límite líquido menor del 35%, y un índice de plasticidad inferior a 6.
- La fracción que pasa el tamiz N° 200, no podrá exceder de 1/2, y en ningún caso de los 2/3 de la fracción que pase el tamiz N° 40.
- El valor soporte CBR AASTHO T193 tiene que ser superior o igual a 80%. Medida al 100 % de compactación AASHTO T180.
- Por lo general, para la capa de base se emplea piedra triturada, grava o mezclas estabilizadas de suelo cemento, suelo bituminoso, etc.

### **D) Capa de rodadura.**

Su función primordial es proteger la base impermeabilizando la superficie, para evitar así posibles infiltraciones del agua de lluvia que podría saturar parcial o totalmente las capas inferiores. Además, evita que se desgaste o se desintegre la base a causa del tránsito de los vehículos.

Así mismo, la capa de rodamiento contribuye, en cierto modo, a aumentar la capa soporte del pavimento, especialmente si su espesor es apreciable (mayor de 3”). De esta manera aporta a la estructura del pavimento en la capacidad de este distribuyendo los esfuerzos de manera distribuida a las capas inferiores.

### **2.5.3 Función y característica de la capa sub base.**

La capa sub-base como tal debe cumplir con cierta finalidad para la cual es construida y ciertas especificaciones generales y específicas de cada proyecto que sean objeto de supervisión; en nuestro país está determinado esto en la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) y estará detallado a continuación.

#### **2.5.3.1 Funciones de la Capa Sub Base.**

- Aumentar la resistencia estructural, la sub-base contribuye con el espesor, alejando la sub-rasante y disipando esfuerzos.
- Disminuir el espesor de base que requiera un diseño, reemplazando parte del material de base por uno de inferiores características, el cual viene a formar la capa de sub-base con un menor costo contribuyendo a la economía de la estructura.
- Transición entre materiales de distinta calidad.
- Servir de refuerzo o defensa a la sub-rasante impidiendo su deterioro, especialmente cuando esta vaya a estar sometida a la acción del tráfico por periodos largos.
- Debido a su distribución granulométrica, sirve para romper la capilaridad ayudando a mantener un buen drenaje en la estructura.
- Servir de capa drenante en la estructura del pavimento.
- Controlar o eliminar en lo posible cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudiera tener el material de la sub-rasante y pudiera afectar a la capa base.
- Controlar la ascensión capilar de las aguas provenientes de las capas freáticas cercanas protegiendo así al pavimento contra los hinchamientos que se producen en épocas de helada. causada por el congelamiento del agua capilar, fenómeno que se observa especialmente en los suelos limosos donde la ascensión capilar del agua es considerable

### 2.5.3.2 Características de la Sub-Base.

- Valor soporte. El material debe tener un CBR, AASHTO T193, mínimo de 40 según norma ABC, efectuado sobre muestra saturada a 100% de compactación, AASHTO T180,
- Los áridos gruesos, retenidos sobre el tamiz 4.75 mm. (N° 4), deben ser partículas resistentes, durables, constituidas de fragmentos de roca, grava o escorias. Materiales que se quiebren con ciclos alternados de hielo – deshielo y humedad – sequedad, no deben ser usados. El tamaño máximo de las piedras que contenga el material de sub-base, no debe 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 sub-base no debe 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 (figura 2-20).

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	N° 4	20 - 65
2,36	N° 8	-
2	N° 10	10 - 50
0,425	N° 40	5 – 30
0,075	N° 200	0 – 20

Figura (2-20). Rango granulométrico para Sub Base. Fuente Norma 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 muestra preparada en húmedo, según norma ABC.

- Impurezas. El material de sub- base debe estar razonablemente exento de materiales vegetales, basura, terrones de arcilla o sustancias que incorporadas dentro de la capa de sub-base puedan 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 de 10 centímetros. Si el espesor de sub-base requerido, es mayor de 30 centímetros, el material debe ser colocado en dos o más capas, nunca menores de 10 centímetros, no perdiéndose la colocación de la capa siguiente, antes de comprobar la compactación de la inmediata anterior.
- El material suelto de 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 puede ser colocado el material de sub-base, medida desde el extremo anterior cubierto con la base, no debe ser mayor de 4 kilómetros.
- Mezcla. Después de haberse colocado y tendido el material, cuando no se use máquina especial esparcidora y conformadora, debe procederse a su homogenización, mezclando el material en todo su espesor mediante la utilización de equipo apropiado, pudiéndose efectuar con moto niveladora, escarificadora, estabilizadora, arado de discos o por otro método que produzca una mezcla homogénea.
- Valor soporte CBR Se debe efectuar un ensayo por cada 500 metros cúbicos producidos, al iniciar la explotación de cada banco, hasta llegar a 3,000 metros cúbicos, y seguidamente un ensayo por cada 3,000 metros cúbicos colocados.
- Granulometría. Se debe efectuar ensayo de granulometría, por cada 500 metros cúbicos de los primeros 3,000 metros cúbicos producidos al iniciar la explotación de cada banco, seguidamente se debe efectuar un ensayo cada 3,000 metros cúbicos colocados de material de sub-base.

## **2.6 INFLUENCIA DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD EN LA CONFORMACIÓN DE CAPA SUB BASE.**

Como el índice de plasticidad depende de la cantidad de arcilla que tenga un material; este parámetro de información que nos brinda el índice de plasticidad, influye en la conformación de capas de un pavimento ya sea este base, sub-base o sub-rasante debido a las características tixotrópicas de los materiales arcillosos. La presencia de material fino tiene su principal énfasis en la pérdida de resistencia de los materiales para la conformación estructural del un pavimento; dicha disminución se puede verificar a través de los ensayos de CBR (capacidad soporte).

Se preestableció, según norma, de la Administradora Boliviana de Carreteras que el valor del índice de plasticidad para una capa base no debe exceder de 6, debido a que a mayor valor de índice plástico mayor presencia de material arcilloso, trayendo consecuencias de la no penetración del riego de liga en dicha capa, debido a que este material tiene características impermeabilizantes; lo mismo sucede en la conformación de capa sub-base donde tenemos según norma un valor máximo de índice plástico de 8; al contrario de la capa base, este se ve más afectada por los cambios volumétricos que puede causar la presencia de material fino en la misma, trayendo problemas como hundimientos o levantamientos que repercuten en la no linealidad de la capa de rodadura y deterioro de la misma trayendo consigo posteriores fallas en la estructura total del pavimento.

Sin embargo, la presencia del material fino no es del todo malo para la estructura del pavimento; este material tiene características de cohesividad que permiten a los materiales de las diferentes capas de un pavimento estar adheridos unos con el otro por medio de la propiedad cohesiva presente en la arcilla, por eso es necesario cuando se haga la conformación de una capa sub-base contenga un determinado índice plástico menor a lo especificado en las normas para darle adherencia al material y ser más resistentes a la acción del clima y la presencia de agua principalmente en tiempo de lluvias.

## 2.6.1 Presencia de material fino en los agregados para sub base.

La presencia del material fino en los materiales que se usan para sub-base generalmente repercute en los problemas y fallas en la carpeta de rodadura de los pavimentos asfálticos inclusive hasta llegar a las capas inferiores por el deterioro de la rodadura y la posterior infiltración de agua en las mismas.

### 2.6.1.1 Elevaciones y hundimientos.

Las elevaciones son pequeñas y localizadas protuberancias de la superficie del pavimento a diferencia de las deformaciones producidas por empuje que son producidas por la inestabilidad del pavimento las elevaciones son producidas por:

- Hinchamiento por localización debido a la presencia de material fino en la capa base, sub-base o sub-rasante en combinación con agua o humedad capilar.
- Degradación localizada de capas superficiales como consecuencia de un drenaje inadecuado.
- Ejecución del pavimento localmente defectuosa.
- Contaminación de las capas inferiores con material orgánico o arcilloso.
- Presencia de material heterogéneo no detectados en la sub-rasante.



Figura (2-21). Elevación en pavimento flexible.

Los hundimientos son pequeñas deformaciones de la superficie del pavimento, no debe confundirse esta falla con las deformaciones más pronunciadas y largas producidas por el hinchamiento. Son producidas generalmente por:

- Degradación de capas inferiores en un punto sensible.
- Falta de resistencia de las capas inferiores (base, sub-base).
- Mala construcción o contaminación local
- Falta de drenaje en las capas inferiores y el lavado de finos producidos por el agua a presión.

#### **2.6.1.2 Levantamiento o Hinchamientos (bufonamiento).**

Es un desplazamiento del pavimento localizado hacia arriba, debido al hinchamiento de la sub-rasante o sub base, generalmente causado por la humedad en los suelos expansivos o esponjamiento por congelación de una de las capas granulares del pavimento.

Este levantamiento es debido a la saturación de agua en la sub rasante, sub base, base de la estructura del pavimento. Estos hinchamientos generalmente se presentan cuando una de las capas de la estructura del pavimento contiene suelos expansivos (arcillas) que al penetrar la humedad tiende a levantarse en parte del área afectada.

Estos hinchamientos de material, con el tiempo pasan a ser baches o un deterioro total del pavimento. Casi siempre se presentan en zonas de corte; si se pone atención en cualquier carretera se observarán estos bufonamientos, la penetración de humedad sucede porque al cortar el terreno cambia el nivel freático del agua y el flujo de agua siempre tendera a aflorar por el talud de corte y a esto se agrega las fuerzas de filtración que es lo que produce las expansiones volumétricas. Son producidos también por:

- Elevación de la calzada debido a la acción del hielo
- Abombamiento de la calzada debido a las deformaciones plásticas.
- Entumecimiento de materiales arcillosos por absorción de agua.



Figura (2-22). Hinchamiento en pavimento flexible.

### 2.6.1.3 Roderas por Fallas en la Sub-Rasante.

Son causadas por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o sub-base) bajo la capa de asfalto. Aunque los materiales duros pueden reducir este tipo de roderas, es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí. Esencialmente, no hay suficiente fuerza en el pavimento o dureza para reducir la fuerza aplicada en un nivel tolerable. También puede ser causado por un inesperado debilitamiento de una de las capas base o sub base que tienen presencia de material arcilloso generadas que por la por la intrusión de humedad y la consiguiente expansión y contracción del mismo produciendo la deformación en las capas inferiores.

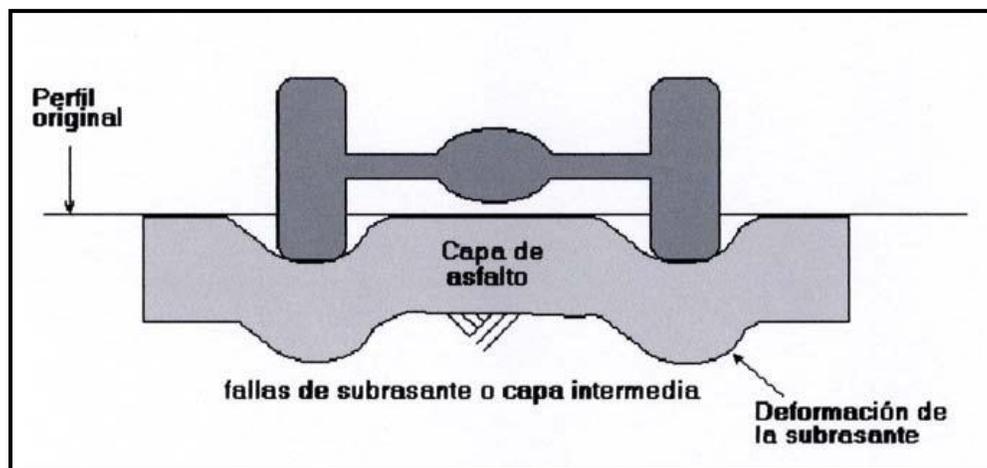


Figura (2-23). Roderas por fallas en la sub-rasante o capas intermedias.

Las cargas de tráfico provocan hundimientos y debilitamiento, por debajo en la estructura del pavimento. Los hundimientos por roderas tienden a ser de anchos que van desde los 750 mm. Hasta los 1000 mm., con poca profundidad y formas curvadas cruzando la sección del pavimento sin fisurarse. Si se hiciera una zanja o corte, la deformación de pavimento indicaría, que el espesor del pavimento permanece constante y cualquiera de las capas granulares (base o sub-base) tiene deformaciones. Si la estructura del pavimento es lo suficientemente rígida a la deformación, ocurrirán fisuras por fatiga de un lado a otro en el ancho entero de la trayectoria de la llanta.

## **2.7 EXPLORACIÓN Y MUESTREO DE SUELOS.**

Lo primero que hay que consignar en la obtención de una muestra representativa del terreno. Un muestreo adecuado y representativo es de primordial importancia, pues tiene el mismo valor que el de los ensayos en sí.

Las muestras pueden ser de dos tipos: alteradas o inalteradas. Se dice que una muestra es alterada cuando no guarda las mismas condiciones que cuando se encontraba en el terreno de donde procede e inalterada en caso contrario.

La muestra deberá ser identificada fácilmente en laboratorio; por este motivo deberá indicar: nombre del proyecto, ubicación, N° de pozo, horizonte, profundidad, N° de muestra, fecha de obtención, ítem a que pertenece, nombre de la persona que la tomó y si está contenida en uno o más envases.

### **2.7.1 Obtención de Muestras.**

Siempre es recomendable hacer un reconocimiento visual del área donde se encuentra ubicado el banco de donde se pretende extraer el material para tener una idea del tipo de formación geológica que pueda tener. Así mismo, deben delimitarse las zonas en que se detecten suelos que se consideren inadecuados.

Al programar una exploración se deben considerar las siguientes pautas generales:

1. Ubicar puntos de prospección a distancias aproximadamente iguales, para luego densificar la exploración si se estima pertinente.

2. Prospeccionar aquellos sectores que soportarán rellenos o terraplenes de importancia y aquellos en que la rasante se ubica muy próxima al terreno natural ( $h < 0.6$  m).
3. Inspeccionar aquellas zonas en que se tienen cortes de importancia, ubicando los puntos de cambio de cortes a terraplén para conocer el material al nivel de la sub-rasante.
4. Inspeccionar el subsuelo en aquellos puntos en que se ubican obras de arte y estructuras importantes.

Se puede extraer las muestras para determinados ensayos y posibles usos de los diferentes lugares disponibles para la construcción; estos pueden ser:

- Bancos de sedimentación: son los bancos construidos artificialmente para embancar el material fino-grueso que arrastran los ríos.
- Cauce de río: corresponde a la extracción desde el lecho del río, en los cuales se encuentra material arrastrado por el escurrimiento de las aguas.
- Canteras: es la explotación de los mantos rocosos o formaciones geológicas, donde los materiales se extraen usualmente desde cerros mediante lo que se denomina tronadora o voladura (rotura mediante explosivos).

### **2.7.2 Identificación de las Muestras.**

El laboratorista deberá efectuar una descripción del mismo mediante identificación visual basado en la pauta que se indica.

- Tamaño: Los suelos gruesos son aquellos en que más de la mitad de las partículas son visibles. En esta estimación se excluyen las partículas gruesas mayores a 80 mm (3"); sin embargo, tal fracción debe ser estimada visualmente y el porcentaje indicado independientemente del material inferior a 80 mm. La fracción gruesa comprende los tamaños de gravas y arenas, y la fracción fina los limos y arcillas.
- Color: Se debe indicar el color predominante.
- Olor: Las muestras recientes de suelos orgánicos tienen un olor distintivo que ayuda a su identificación. El olor puede hacerse manifiesto calentando una muestra húmeda.

- **Humedad:** En las muestras recientes deberá registrarse la humedad. Los materiales secos necesitan una cantidad considerable de agua para obtener un óptimo de compactación. Los materiales húmedos están cerca del contenido óptimo. Los mojados necesitan secarse para llegar al óptimo, y los saturados son los suelos ubicados bajo un nivel freático.
- **Densificación:** La compacidad o densidad relativa de suelos sin cohesión puede ser descrita como suelta o densa, dependiendo de la dificultad que oponga a la penetración de una cuña de madera.

### **2.7.2.1 Ubicación de los Materiales.**

Según la ubicación los áridos podemos distinguir de dos maneras aquellos que son extraídos como están en la naturaleza (áridos directos) y aquellos que necesitan un proceso anticipado antes de ser puestos o usados en la construcción (áridos indirectos).

- **Áridos Directos:** Son aquellos materiales que para su utilización sólo es necesario realizar las operaciones para su extracción y clasificación, es decir, que se emplean tal como se encuentran en la naturaleza.

- **Áridos Indirectos:** Son aquellos materiales que además de los dos procesos señalados necesitan otro intermedio, que consiste en su elaboración o chancado, selección, etc., por no ser utilizables con el tamaño que se extraen.

### **2.7.3 Tipos de Toma de Muestras.**

En la toma de muestras se puede distinguir dos formas de las cuales dependen del uso que se le dará y los ensayos que se llevarán a cabo con la misma siempre y, cuando no, olvidando el objetivo para el cual están siendo muestreadas estas pueden ser muestras perturbadas y muestras sin perturbar.

#### **A) Muestra Perturbadas.**

Se obtienen en general de las paredes de los pozos y comprometen estratos determinados o bien la suma de algunos de ellos, como es el caso de la investigación de yacimientos. Estas muestras deben guardarse en bolsas impermeables y de resistencia adecuada. Cada bolsa debe identificarse clara e indeleblemente, las muestras en bolsas se

toman con pala, barreta o cualquier otra herramienta de mano conveniente y se colocan en bolsas sin tratar de mantener al suelo en forma inalterada; estas muestras se usan para:

- Análisis granulométrico.
- Ensayos de plasticidad.
- Ensayos de compactación – humedad óptima.
- Ensayos de compactación CBR en laboratorio.

### **B) Muestra sin Perturbar.**

Este tipo de muestra se recorta de las paredes de los pozos y compromete estratos bien definidos. Después de cortadas deben revestirse con una capa de parafina sólida aplicada con brocha.

Es conveniente agregar alrededor de un 30% de cera virgen a la parafina sólida con el fin de que la capa protectora sea menos rígida. Si la consistencia de la muestra es relativamente blanda, debe rodearse de grasa y recubrir una vez más con parafina sólida y cera. Una vez dado el tratamiento anterior, debe colocarse en cajas de madera con aserrín u otro producto que actúe como amortiguador de golpes.

Las muestras sin perturbar deberán tomarse apenas excavadas las calicatas, en especial cuando se trate de suelos cuya estructura se ve afectada por los cambios de humedad. En todo caso, al tomar una muestra no perturbada, debe elegirse la pared de la calicata menos expuesta al sol y debe excavarse el espesor superficial que haya sido afectado por los cambios de humedad.

### **2.7.4 Tipos de Suelos Usados Para su Identificación.**

A continuación se describen los suelos más comunes con los nombres generalmente utilizados por el profesional, para su identificación.

**Gravas.-** Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen, cuando son acarreadas por las aguas, las gravas sufren desgaste en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, en los márgenes y en los conos de deyección de los ríos, también en muchas depresiones de terrenos rellenadas por el acarreo de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido re-transportadas. Las gravas ocupan

grandes extensiones, pero casi siempre se encuentran con mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. Sus partículas son mayores a 2 mm.

**Arenas.-** La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 0.06 y 2 mm de diámetro.

El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcilla. Las arenas estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea.

**Limos.-** Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.002 y 0.06 mm. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar.

**Arcillas.-** Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.002 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada y sus átomos están dispuestos en forma laminar.

## **CAPITULO III**

### **INVESTIGACION SOBRE EL ANALISIS DEL CBR DE LA SUB BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICE PLASTICO**

#### **3.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS**

Antes de llevar adelante la investigación, se predetermina tres proyectos de carreteras en ejecución del departamento de Tarija:

**PROYECTO DE ASFALTADO CHOCLOCA – CHAGUAYA.**

**PROYECTO DE ASFALTADO PUERTA AL CHACO – CANALETAS.**

**PROYECTO DE ASFALTADO PORTILLO - TEMPORAL – SAN JACINTO.**

De los cuales se procede a la recolección del material necesario para llevar adelante la investigación según el siguiente procedimiento.

- Ubicar el lugar previamente antes de proceder al muestreo.
- Verificar que el material disponible sea usada en la conformación de la capa estructural sub base.
- Recolectar 300 kg. aproximadamente de material usado en la conformación de capa sub-base para la realizar los ensayos de cada proyecto antes mencionados.
- El material recolectado se obtuvo de acopio para sub base en los proyectos (PUERTA AL CHACO – CANALETAS), (PORTILLO - TEMPORAL - SAN JACINTO), en el caso del proyecto (CHOCLOCA - CHAGUAYA) el material recolectado se obtuvo del terraplén de la carretera.
- Cada 300 kg. serán embolsados en bolsas de yute para su traslado a Laboratorios de Materiales y suelos del Servicio Departamental de Caminos (SEDECA) y posterior elaboración de los ensayos para llevar a cabo la investigación.

### **3.2 ENSAYOS REALIZADOS EN LA PRESENTE INVESTIGACIÓN**

Para realizar los ensayos proceder a la preparación de la muestra a través del cuarteo manual para muestras con un peso mayor a 50 kg. con este procedimiento dividir las muestras de material obtenidas en campo para obtener porciones representativas que tengan tamaños adecuados para los diferentes ensayos a realizar.

- Extender la muestra traída del campo, sobre una superficie dura limpia y nivelada, donde no se debe perder ni adicionar material.
- Mezclar el material completamente, volteándolo con pala unas tres veces, después de la última mezcla conformar una pila cónica colocando cada palada en el centro de modo que el suelo rueda hacia la base por todas las direcciones.
- A continuación, aplanar la pila en forma cuidadosa hasta tener un espesor uniforme y un diámetro definido, de forma tal que cada cuarto de círculo contenga material con todos los tamaños originales de la muestra.
- Proceder a la división de la muestra en cuatro partes iguales utilizando un tubo y obtener la muestra reducida al tamaño deseado.

#### **3.2.1 Análisis Granulométrico (ASTM D422 AASHTO T88).**

Este ensayo permite determinar la distribución del tamaño de las partículas de un suelo. En términos de porcentajes de grava, arena, limo y arcilla que se encuentra en cierta masa de suelo, para la presente investigación se realiza el ensayo por el METODO MECANICO.

Para su mejor representación la graduación de los suelos es haciendo uso de las curvas granulométricas, donde diferentes tamaños de granos se dibujan en el eje de las abscisas a escala logarítmica y los porcentajes en peso del material que pasa cada tamiz en el eje de las ordenadas a escala natural.

### **A) MATERIALES.-**

- Balanza con precisión de 0.1 g.
- Mortero con pistón cubierto de caucho, capaz de disgregar los grumos o agregaciones de partículas.
- Cuarteador.
- Brocha para limpiar los tamices.
- Juego de tamices (2", 1 1/2", 1", 3/4", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°200).
- Horno termostáticamente controlado para usar con temperatura de 60°C a 110°C.

### **B) PROCEDIMIENTO:**

Para obtener la muestra representativa utilizar el cuarteador mecánico hasta la obtención total de la muestra requerida.

1. Proceder a secar el material hasta que los granos no se encuentren pegados o formando grumos; para evitar los grumos, disgregar el material en el mortero con un pistón de madera forrado con caucho.
2. Los tamices a usar para la parte gruesa del material son 2", 1 1/2", 1", 3/4", 3/8", N° 4.
3. Hacer pasar el material a través de los tamices correspondientes con lapsos de tiempo hasta que no siga pasando material; dicho tamizado realizar manualmente.
4. Por último, pesar la cantidad de material retenido en cada malla y el pasante total del tamiz N°4.

### **METODO DEL LAVADO PARA EL MATERIAL FINO.**

1. Una vez concluida la granulometría del material grueso, se obtiene un sobrante que pasa el tamiz N° 4.
2. De este material que pasa el tamiz N° 4 pesar 500 g.
3. La muestra se deja reposar con agua hasta que se sature completamente haciendo que el suelo tenga características de lodo en un tiempo mínimo de 24 horas.
4. Sin perder material, se procede al lavado del material en el tamiz N°200, hasta que el agua tenga aspectos claros sin sedimentación.
5. El material que se retiene en el tamiz N°200 se procede a secar en un recipiente, para luego retamizar por los tamices N°10, N° 40 y N° 200 así obtener los pesos retenidos en cada tamiz.

### **3.2.2 Contenido de humedad (ASTM D2216).**

El contenido de agua del material se define como la relación expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o agua libre en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material

#### **A) MATERIALES.**

- Recipientes para humedad (aluminio o latón).
- Horno con temperatura adecuada (105-101) °C.
- Balanza.
- Espátula.

#### **B) PROCEDIMIENTO.**

1. Proceder a pesar las taras (recipientes de aluminio o latón), una vez pesadas identificar a cada una de ellas.
2. Introducir en ellas las muestras de suelo; posteriormente, pesar las muestras de cada tara.
3. Introducir al horno eléctrico de secado a 105°C. durante un lapso de 24 hrs.
4. Una vez transcurridas las 24 hrs. proceder a retirar las muestras del horno y volver a pesar, y con los nuevos pesos obtenidos, por medio de las fórmulas dadas, primero sacar la cantidad de agua en cada muestra y luego determinar el porcentaje de humedad.

### **3.2.3 Límite líquido (LL) (ASTM D4318 - AASHTO T89).**

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 maquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2mm entre sí, fluyan y entren en contacto en una longitud de 10mm, aplicando 25 golpes.

### **A) MATERIALES.**

- Plato de evaporación de porcelana con un diámetro de 120mm.
- Espátula con hoja flexible de aproximadamente 75mm de largo y 20 mm de ancho.
- Aparato de Límite Líquido (Maquina Casagrande).
- Acanalador de Casagrande.
- Cápsulas de aluminio para el secado de las muestras.
- Balanza con una precisión de 0.01g.
- Probeta graduada con una capacidad mínima de 25 ml.
- Horno con temperatura regulable capaz de mantener temperaturas a  $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### **B) AJUSTE Y CONTROL DEL APARATO DE CASAGRANDE.**

- AJUSTE DE LA ALTURA CAIDA DE LA TAZA.- Girar la manivela hasta que la tasa se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm. adosado al ranurador, se verifica que la distancia entre el punto de percusión y la base sea exactamente 10mm.
- El diámetro de la huella del punto de percusión en la base no debe exceder 15mm; si esto ocurre, pulir la base.
- El desgaste del ranurador no debe sobrepasar las tolerancias dimensionales especificadas.
- Verificar antes de cada ensayo que la base y la taza estén siempre limpias y secas.

### **C) PROCEDIMIENTO.**

1. La muestra requerida mínima es de 100g. previamente pasando el tamiz N° 40.
2. Agregar agua y mezclar completamente con la espátula hasta asegurar una mezcla homogénea eliminando todo el aire atrapado entre las partículas.
3. Ubicar el aparato de Casagrande sobre una base firme y plana.
4. Colocar en la taza una porción de la muestra acondicionada utilizando una espátula, enrasar y nivelar a 10mm en el punto de máximo espesor.
5. Dividir la pasta de suelo, pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza, de modo que se forme una ranura

clara y bien delineada. De ninguna manera debe existir desprendimiento de la pasta en el fondo de la taza; si esto ocurre, reiniciar el procedimiento.

6. Girar la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10mm. registrar el número de golpes entre el rango de (10-45) golpes.
7. Retirar aproximadamente 10g del material que se llega a juntar en el fondo del surco, colocarlo en una capsula de secado y determinar el contenido de humedad.

### **3.2.4 Límite plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP) (ASTM D4318 - AASHTO T90).**

Es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólidos. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3mm de diámetro se presenten agrietamientos y no puedan ser remasados ni reconstituídos.

#### **A) MATERIALES.**

- Plato de evaporación de porcelana con un diámetro aproximado de 120mm.
- Espátula con hoja flexible de aproximadamente 75mm de largo y 20mm de ancho.
- Placa de vidrio esmerilado de 20 x 20 cm.
- Cápsulas de aluminio para secado.
- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Probeta graduada con capacidad mínima de 25 ml.
- Patrón de comparación (alambre) de 3 mm de diámetro.
- Horno con circulación de aire y temperatura regulable entre 60  $\pm$  5 °C.

#### **B) PROCEDIMIENTO.**

1. Colocar la muestra en el plato de evaporación; agregar agua y mezclar completamente con la espátula hasta asegurar una mezcla homogénea.
2. Tomar una porción de la muestra de ensayo acondicionada de aproximadamente 1 cm<sup>3</sup>.

3. Amasar la muestra entre las manos, luego hacer rodar sobre la superficie del vidrio esmerilado ejerciendo una leve presión con la palma de la mano hasta conformar un cilindro de aproximadamente de 3 mm. de diámetro.
4. Repetir la operación, manteniendo la velocidad y la presión de amasado, hasta que el cilindro presente agrietamientos.
5. Con la espátula cortar pequeños trocitos del material y colocarlos en una cápsula de secado, y determinar y registrar el contenido de humedad de la muestra.
6. Como finalización del ensayo, calcular el Índice de Plasticidad (IP) con la siguiente fórmula

$$IP=LL-LP$$

Donde: IP: Índice de Plasticidad.

LL: Límite líquido.

LP: Límite plástico.

### **3.2.5 Compactación Modificado (ASTM D422 - AASHTO T180).**

Se entiende por compactación al mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. El principal objeto de este ensayo es determinar los valores de densidad máxima y contenido de humedad óptima de las muestras de material.

#### **A) MATERIALES.**

- Moldes Metálicos de forma cilíndrica, que contenga un collar separable de aproximadamente 60 mm. de altura y el conjunto de molde collar debe estar construido de modo que pueda ajustarse a una placa base.
- El molde a usarse en la práctica debe tener una capacidad de 2135 cm<sup>3</sup> y un peso de 3300 g.
- Pisón Metálico con una cara circular de 50 mm. de diámetro y una masa de 10 lb. debe estar equipado con una guía tubular para controlar la altura de caída de 18 pulg. La guía debe tener al menos cuatro perforaciones no menores que 10 mm. ubicadas a 20 mm de cada extremo, separadas en 90° entre sí, dejando una holgura suficiente para no restringir la caída libre del pisón.

- Probeta graduada de 500 cm<sup>3</sup> de capacidad.
- Balanza con precisión de 5 g. y otra con precisión de 0.1 g.
- Horno de temperatura regulable y circulación de aire.
- Regla de acero de 300 mm de largo y con un canto biselado.
- Juego de tamices de abertura cuadrada (2", 3/4" y N° 4)

## **B) PROCEDIMIENTO.**

1. De la muestra requerida ya pesada pasar por el tamiz de 3/4" y descartar el material retenido previamente habiendo determinado el peso retenido en el tamiz de 3/4", este material descartado se compensará con el mismo material que sea retenido en el tamiz N°4 y pase el de 3/4" interesándonos solo el material que queda entre dichas mallas hasta obtener el peso de material de la muestra.
2. Dividir la muestra total en 4 partes iguales para luego incrementarle agua en diferentes proporciones.
3. Homogenizar la muestra de ensayo con suficiente agua para que las humedades alcanzadas por las 4 fracciones varíen aproximadamente dos puntos porcentuales entre sí y se distribuyan próximas a la humedad optima.
4. Colocar el molde con su collar sobre una base firme, plana y horizontal.
5. Colocar una capa de material de aproximadamente un quinto de la altura del molde y compactar con 56 golpes cada capa, repetir hasta completar las 5 capas.
6. Terminada la compactación, retirar el collar y enrasar cuidadosamente con la regla al nivel del borde del molde, tapar con material fino los agujeros superficiales que resulten de la remoción de partículas gruesas en el enrasado.
7. Pesarse el molde con el suelo compactado, enrasado más la base y registrar en las planillas de cálculo.

### **3.2.6 Determinación de la Razón de Soporte de California CBR (ASTM D1883 - AASHTO T193).**

Su objeto es determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como Razón de Soporte de California (CBR). El ensayo se realiza a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables

#### **A) EQUIPO Y MATERIALES.**

Prensa de ensayo conformada por un marco de carga con una capacidad mínima de 44.5 KN y una gata mecánica capaz de desplazar una base metálica rígida a una velocidad uniforme de 1.27 mm/min contra el pistón de penetración. Este último, debe estar equipado con un dispositivo indicador de carga de una capacidad mínima de 26.7 KN. que permita registrar lecturas con una precisión mínima de 50 N. el pistón debe llevar un dial de penetración graduado en milésimas de pulgada (0.025 mm.).

- Moldes metálicos de forma cilíndrica con un diámetro interno de 6” y altura de 7”, debe tener un collarín de extensión metálico de 2” de altura y una placa base metálica de 9.5 mm. de espesor con perforaciones de 1.6 mm. de diámetro.
- Disco espaciador metálico y cilíndrico con un diámetro de 6” y una altura de 2.5”.
- Pistón o martillo de 10 lb. de peso y una altura de caída de 18”.
- Aparato medidor de expansión (Hinchamiento) compuesto por:
  - Una placa metálica de 150 mm de diámetro por molde, esta placa debe tener perforaciones de 1.6 mm. de diámetro y estar provista de un vástago ajustable de metal en el centro con un sistema de tornillo y contratuerca que permita regular y fijar su altura.
  - Un trípode metálico cuyas patas puedan apoyarse en el borde del molde, y que lleve montado en el centro un calibre comparador con indicador de dial. Con precisión de lectura de 0.025 mm. el vástago debe desplazarse libremente y coincidir con el de la placa, de forma tal que permita controlar la posición de esta y medir el hinchamiento.
- Carga metálica anular para cada molde en forma de herradura de 5lb. de peso cada una.

## **B) Expansión del material.**

1. Una vez determinada la densidad y la humedad de la muestra, colocar 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.
2. Sobre la superficie libre de la muestra colocar un papel filtro de 6" de diámetro y montar el plato con el vástago graduable, luego sobre el plato se colocan varias pesas de plomo. La sobrecarga que se aplique mediante las pesas de plomo, debe ser prácticamente igual a la correspondiente al pavimento (base, sub-base y capa de rodadura) a construirse, la sobrecarga mínima a emplearse será de 10 libras (4.54Kg), equivalente a un pavimento de concreto de 5" de espesor (12,5cm).
3. Una vez colocado el vástago y las pesas de forma indicada colocar cuidadosamente el molde dentro de un tanque o depósito lleno de agua. Para permitir el libre acceso por debajo de la muestra, es recomendable 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.
4. Colocado el molde dentro del tanque con agua, montar el trípode con un extensómetro, y registrar la lectura inicial. Cada 24 horas y por un periodo de 96 horas (4 días), se toman y registran las lecturas del extensómetro.
5. Al cabo 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 los 4 días, es referida, en por ciento, a la altura inicial que tenía la muestra antes de ser sumergida en agua. Los adobes, suelos orgánicos y algunos suelos cohesivos tienen expansiones muy grandes generalmente mayores al 10%. Las especificaciones establecen, generalmente, que los materiales de préstamo para sub-base deben tener expansiones menores del 2% al cabo de 4 días. Asimismo, se recomienda que los materiales para sub-base tengan expansiones menores del 1%.
6. Saturada la muestra durante 4 días, sacar el cilindro, y cuidadosamente drenar, durante 15 minutos, el agua libre que queda. para drenar bien el agua se debe

voltear el cilindro, sujétese bien el disco y las pesas metálicas al hacer esta operación. Luego remover el disco, las pesas y el papel filtro y pésese la muestra.

**C) Resistencia a la penetración.**

1. Una vez drenada la muestra, colocar 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 a la sobrecarga colocada durante el ensayo de hinchamiento.
2. El molde con la muestra y la sobrecarga se colocan debajo de la prensa y se asienta el pistón sobre la muestra.
3. Una vez asentado el pistón, colocar 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.
4. Hincar el pistón manteniendo una velocidad de 0.05 pulgadas por minuto, y leer las cargas totales necesarias para hincar el pistón en incrementos de 0.025", hasta alcanzar 1/2".
5. Hincado el pistón hasta 1/2" (1.27cm), soltar la carga lentamente; retirar el molde de la prensa, y quitar las pesas de la base metálica perforada.
6. Finalmente, se determina el contenido de humedad de la muestra.

### 3.3 Resumen de Ensayos.

#### 3.3.1 Resumen de ensayos contenido de Humedad.

<b>PROYECTO CHOCLOCA - CHAGUAYA</b>		
<b>CAPA SUB-BASE</b>		
<b>N° DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>CONTENIDO DE HUMEDAD (%)</b>
1	0%	2,11
2	0%	1,58
3	0%	2,06
16	5%	1,83
19	10%	1,85
22	15%	1,89
25	20%	1,86

<b>PROYECTO PUERTA AL CHACO - CANALETAS</b>		
<b>CAPA SUB-BASE</b>		
<b>N° DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>CONTENIDO DE HUMEDAD (%)</b>
4	0%	1,86
5	0%	1,69
6	0%	1,97
28	5%	1,78
31	10%	1,83
34	15%	1,81
37	20%	1,77

<b>PROYECTO SAN JACINTO - TEMPORAL</b>		
<b>CAPA SUB-BASE</b>		
<b>N° DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>CONTENIDO DE HUMEDAD (%)</b>
7	0%	1,97
8	0%	1,26
9	0%	1,61
40	5%	1,62
43	10%	1,52
46	15%	1,54
49	20%	1,62

### 3.3.2 Resumen de ensayos Límites de Atterberg.

<b>PROYECTO CHOCLOCA - CHAGUAYA</b>				
<b>CAPA SUB-BASE</b>				
<b>N° DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>LIMITE LIQUIDO (LL)</b>	<b>LIMITE PLASTICO (LP)</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>
1	0%	24,6	18,9	5,8
2	0%	22,7	16,1	6,6
3	0%	20,0	13,7	6,3
16	5%	22,7	15,7	7,0
19	10%	25,6	18,2	7,4
22	15%	26,6	17,4	9,2
25	20%	28,1	17,3	10,8

<b>PROYECTO PUERTA AL CHACO - CANALETAS</b>				
<b>CAPA SUB-BASE</b>				
<b>N° DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>LIMITE LIQUIDO (LL)</b>	<b>LIMITE PLASTICO (LP)</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>
4	0%	20,3	19,1	1,3
5	0%	20,1	19,6	0,5
6	0%	19,9	18,6	1,3
28	5%	18,1	16,4	1,7
31	10%	17,9	15,1	2,8
34	15%	19,6	15,9	3,7
37	20%	20,1	14,1	6,0

<b>PROYECTO SAN JACINTO - TEMPORAL</b>				
<b>CAPA SUB-BASE</b>				
<b>N° DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>LIMITE LIQUIDO (LL)</b>	<b>LIMITE PLASTICO (LP)</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>
7	0%	22,9	18,9	4,0
8	0%	22,5	20,0	2,5
9	0%	21,4	17,8	3,6
40	5%	22,7	18,2	4,5
43	10%	27,7	21,3	6,4
46	15%	24,5	16,7	7,8
49	20%	26,3	17,5	8,9

### 3.3.3 Resumen de clasificación.

PROYECTO CHOCLOCA - CHAGUAYA				
CAPA SUB-BASE				
N° DE ENSAYO	INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO < T 200	INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	CLASIFICACION	
			AASTHO	SUCS
1	0%	5,8	A - 1 - a (0)	GC-GM
2	0%	6,6	A - 2 - 4 (0)	GC-GM
3	0%	6,3	A - 1 - a (0)	GW-GM
16	5%	7,0	A - 2 - 4 (0)	GM-GC
19	10%	7,4	A - 2 - 4 (0)	GC
22	15%	9,2	A - 2 - 4 (0)	GC
25	20%	10,8	A - 2 - 6 (0)	GC

PROYECTO PUERTA AL CHACO - CANALETAS				
CAPA SUB-BASE				
N° DE ENSAYO	INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO < T 200	INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	CLASIFICACION	
			AASTHO	SUCS
4	0%	1,3	A - 1 - a (0)	GW-GM
5	0%	0,5	A - 1 - a (0)	GW-GM
6	0%	1,3	A - 1 - a (0)	GM
28	5%	1,7	A - 1 - a (0)	GW-GM
31	10%	2,8	A - 1 - a (0)	GM
34	15%	3,7	A - 1 - b (0)	SM
37	20%	6,0	A - 1 - b (0)	SM-SC

PROYECTO SAN JACINTO - TEMPORAL				
CAPA SUB-BASE				
N° DE ENSAYO	INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO < T 200	INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	CLASIFICACION	
			AASTHO	SUCS
7	0%	4,0	A - 1 - a (0)	GW-GM
8	0%	2,5	A - 1 - a (0)	GW-GM
9	0%	3,6	A - 1 - a (0)	GW-GM
40	5%	4,5	A - 1 - a (0)	GW-GM
43	10%	6,4	A - 1 - a (0)	GM-GC
46	15%	7,8	A - 2 - 4 (0)	GC
49	20%	8,9	A - 2 - 4 (0)	GC

### 3.3.4 Resumen de ensayos de compactación Proctor T-180.

<b>PROYECTO CHOCLOCA - CHAGUAYA</b>				
<b>CAPA SUB-BASE</b>				
<b>Nº DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>	<b>DENSIDAD MAXIMA (Kg/cm3)</b>	<b>HUMEDAD OPTIMA %</b>
10	0%	6,6	2202	6,7
17	5%	7,0	2195	6,9
20	10%	7,4	2180	7,2
23	15%	9,2	2159	7,6
26	20%	10,8	2138	7,8

<b>PROYECTO PUERTA AL CHACO - CANALETAS</b>				
<b>CAPA SUB-BASE</b>				
<b>Nº DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>	<b>DENSIDAD MAXIMA (Kg/cm3)</b>	<b>HUMEDAD OPTIMA %</b>
11	0%	1,3	2241	5,2
29	5%	1,7	2220	5,5
32	10%	2,8	2207	5,7
35	15%	3,7	2197	5,9
38	20%	6,0	2186	6,1

<b>PROYECTO SAN JACINTO - TEMPORAL</b>				
<b>CAPA SUB-BASE</b>				
<b>Nº DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>	<b>DENSIDAD MAXIMA (Kg/cm3)</b>	<b>HUMEDAD OPTIMA %</b>
12	0%	4,0	2222	6,0
41	5%	4,5	2203	6,4
44	10%	6,4	2179	6,8
47	15%	7,8	2166	7,1
50	20%	8,9	2154	7,3

Nota.- Los valores de densidad máxima y humedad óptima, en los cuales el índice de plasticidad excede al valor de 8, no fueron tomados en cuenta para el análisis debido a que no está dentro del rango permitido para materiales de Sub-base especificado en la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

### 3.3.5 Resumen de ensayos capacidad soporte (CBR)

#### 3.3.5.1 Resumen Capacidad soporte (CBR) al 100 % de compactación.

PROYECTO CHOCLOCA - CHAGUAYA					
CAPA SUB-BASE					
N° DE ENSAYO	INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO < T 200	INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	DENSIDAD AL 100% (g/cm3)	CBR AL 100 %	EXPANSION %
13	0%	6,6	2,241	56,2	0,017
18	5%	7,0	2,195	37,3	0,095
21	10%	7,4	2,180	29,7	0,181
24	15%	9,2	2,159	15,6	0,250
27	20%	10,8	2,138	12,0	0,517

PROYECTO PUERTA AL CHACO - CANALETAS					
CAPA SUB-BASE					
N° DE ENSAYO	INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO < T 200	INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	DENSIDAD AL 100% (g/cm3)	CBR AL 100 %	EXPANSION %
14	0%	1,3	2,202	83,1	0,013
30	5%	1,7	2,220	89,9	0,103
33	10%	2,8	2,207	74,1	0,172
36	15%	3,7	2,197	52,3	0,233
39	20%	6,0	2,186	42,6	0,328

PROYECTO SAN JACINTO - TEMPORAL					
CAPA SUB-BASE					
N° DE ENSAYO	INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO < T 200	INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	DENSIDAD AL 100% (g/cm3)	CBR AL 100 %	EXPANSION %
15	0%	4,0	2,222	43,3	0,013
42	5%	4,5	2,187	49,3	0,138
45	10%	6,4	2,179	28,6	0,293
48	15%	7,8	2,166	20,5	0,310
51	20%	8,9	2,154	16,8	0,440

Nota.- Los valores de capacidad soporte (CBR) en los cuales el índice de plasticidad excede el valor de 8, no fueron tomados en cuenta para el análisis debido a que no está dentro del rango permitido para materiales de Sub-base especificado en la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

### 3.3.5.2 Resumen capacidad soporte (CBR) al 95 % de compactación.

<b>PROYECTO CHOCLOCA - CHAGUAYA</b>					
<b>CAPA SUB-BASE</b>					
<b>N° DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>	<b>DENSIDAD AL 95 % (g/cm3)</b>	<b>CBR AL 95 %</b>	<b>EXPANSION %</b>
13	0%	6,6	2,129	36,5	0,034
18	5%	7,0	2,085	26,5	0,078
21	10%	7,4	2,071	16,8	0,190
24	15%	9,2	2,051	8,7	0,302
27	20%	10,8	2,031	6,6	0,776

<b>PROYECTO PUERTA AL CHACO - CANALETAS</b>					
<b>CAPA SUB-BASE</b>					
<b>N° DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>	<b>DENSIDAD AL 95 % (g/cm3)</b>	<b>CBR AL 95 %</b>	<b>EXPANSION %</b>
14	0%	1,3	2,092	53,8	0,034
30	5%	1,7	2,109	57,4	0,112
33	10%	2,8	2,097	49,2	0,164
36	15%	3,7	2,087	37,5	0,259
39	20%	6,0	2,077	28,7	0,353

<b>PROYECTO SAN JACINTO - TEMPORAL</b>					
<b>CAPA SUB-BASE</b>					
<b>N° DE ENSAYO</b>	<b>INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO &lt; T 200</b>	<b>INDICE DE PLASTICIDAD (IP)</b>	<b>DENSIDAD AL 95 % (g/cm3)</b>	<b>CBR AL 95 %</b>	<b>EXPANSION %</b>
15	0%	4,0	2,111	29,3	0,030
42	5%	4,5	2,078	37,0	0,155
45	10%	6,4	2,070	22,4	0,302
48	15%	7,8	2,058	13,0	0,328
51	20%	8,9	2,046	11,2	0,466

Nota.- Los valores de capacidad soporte (CBR) en los cuales el índice de plasticidad excede el valor de 8, no fueron tomados en cuenta para el análisis debido a que no está dentro del rango permitido para materiales de Sub-base especificado en la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

### 3.3.5.3 Resumen capacidad soporte (CBR) al 90 % de compactación.

PROYECTO CHOCLOCA - CHAGUAYA					
CAPA SUB-BASE					
N° DE ENSAYO	INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO < T 200	INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	DENSIDAD AL 90 % (g/cm3)	CBR AL 90 %	EXPANSION %
13	0%	6,6	2,017	16,9	0,043
18	5%	7,0	1,976	15,7	0,082
21	10%	7,4	1,962	3,9	0,259
24	15%	9,2	1,943	1,8	0,379
27	20%	10,8	1,924	1,1	0,509

PROYECTO PUERTA AL CHACO - CANALETAS					
CAPA SUB-BASE					
N° DE ENSAYO	INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO < T 200	INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	DENSIDAD AL 90 % (g/cm3)	CBR AL 90 %	EXPANSION %
14	0%	1,3	1,982	24,4	0,043
30	5%	1,7	1,998	24,9	0,121
33	10%	2,8	1,986	24,4	0,155
36	15%	3,7	1,977	22,7	0,276
39	20%	6,0	1,967	14,8	0,371

PROYECTO SAN JACINTO - TEMPORAL					
CAPA SUB-BASE					
N° DE ENSAYO	INCREMENTO EN PESO DE MATERIAL FINO < T 200	INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	DENSIDAD AL 90 % (g/cm3)	CBR AL 90 %	EXPANSION %
15	0%	4,0	2,000	15,3	0,043
42	5%	4,5	1,968	24,6	0,164
45	10%	6,4	1,961	16,3	0,310
48	15%	7,8	1,949	5,6	0,353
51	20%	8,9	1,939	5,6	0,526

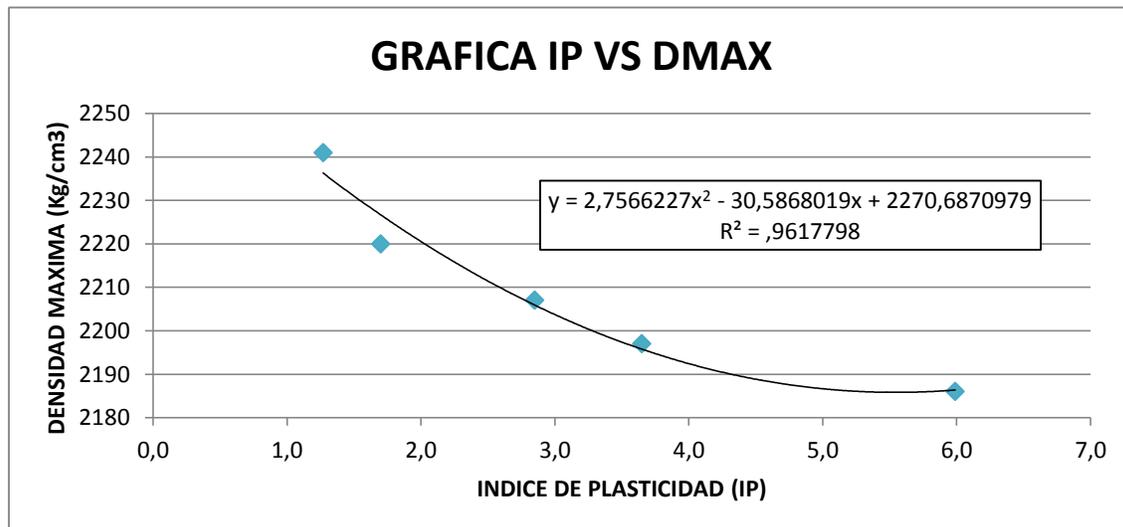
Nota.- Los valores de capacidad soporte (CBR) en los cuales el índice de plasticidad excede el valor de 8, no fueron tomados en cuenta para el análisis debido a que no está dentro del rango permitido para materiales de Sub-base especificado en la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

### 3.4 Análisis de la influencia que tiene el valor del índice de plásticidad en la resistencia de la capa sub base.

#### 3.4.1 Índice de Plásticidad vs densidad máxima.

#### ANALISIS DE LA DENSIDAD MAXIMA DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICES PLASTICOS (PUERTA AL CHACO - CANALETAS)

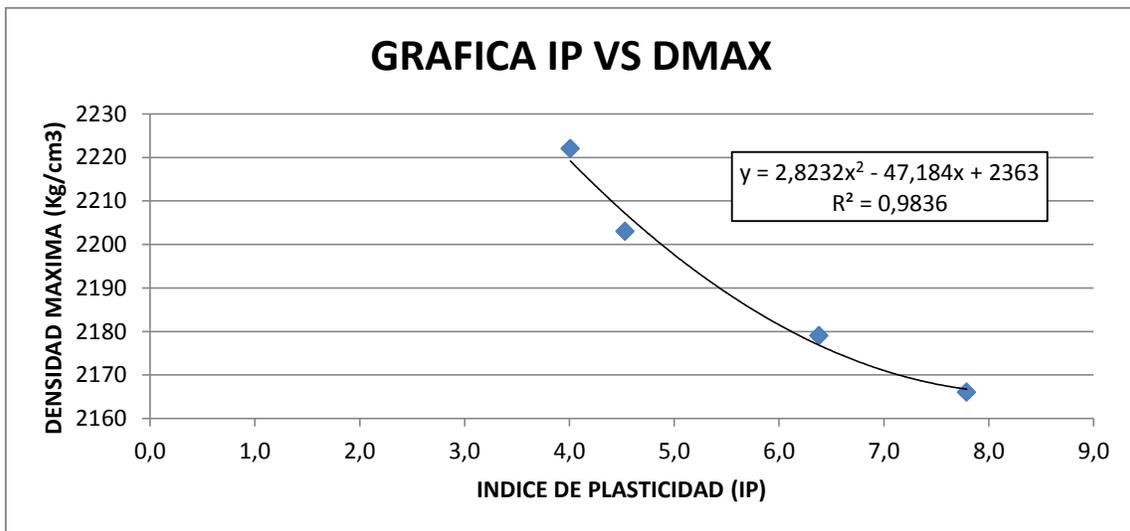
Índice de Plásticidad (IP)	Densidad Máxima (Kg/cm3)
1,3	2241
1,7	2220
2,9	2207
3,7	2197
6,0	2186



La gráfica demuestra la relación de la densidad máxima en función del valor del índice de plásticidad de la sub-base, donde se puede verificar que la densidad máxima va decreciendo a medida que incrementa el índice de plásticidad en el material de sub-base usado en la investigación, esto debido a las características propias del banco de donde se extrae el material para su conformación; los datos obtenidos en laboratorio demuestran que hay una continuidad en ellos que se puede apreciar en la gráfica donde su ajuste tiene una tendencia polinómica de 2do grado con una correlación mayor a 0,9. donde la densidad máxima para un índice de plásticidad de 6 es igual a 2186 Kg/cm3, y para un índice de plásticidad de 1 alcanza a 2242 Kg/cm3. Esto repercute en la resistencia del material que compone la sub-base a la hora de medir su valor soporte (CBR).

## ANALISIS DE LA DENSIDAD MAXIMA DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICES PLASTICOS (SAN JACINTO - TEMPORAL)

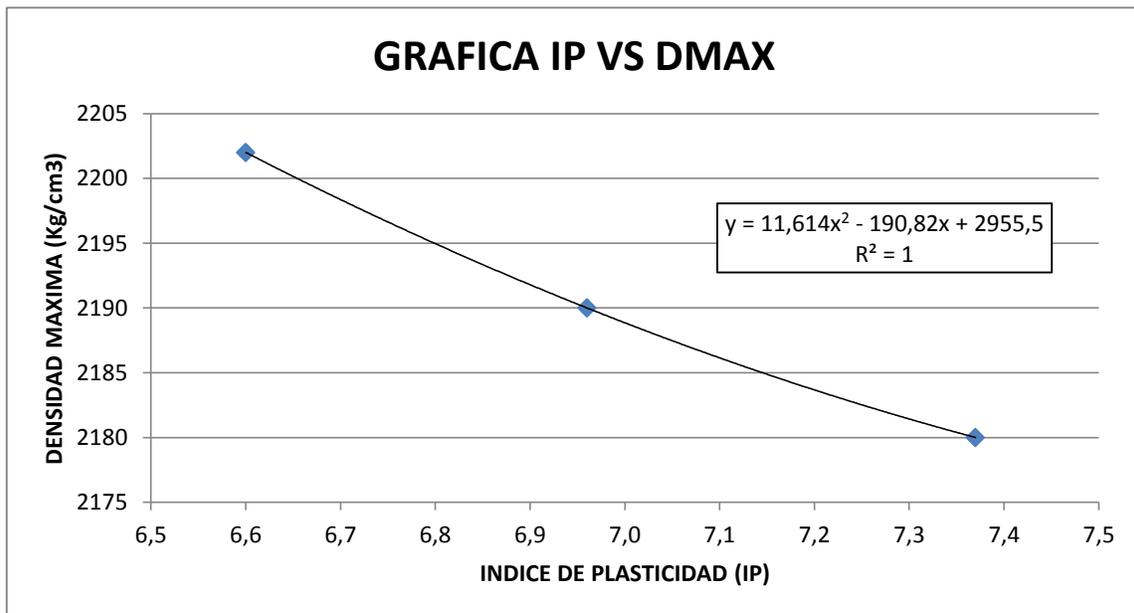
Índice de Plasticidad (IP)	Densidad Máxima (Kg/cm <sup>3</sup> )
4,0	2222
4,5	2203
6,4	2179
7,8	2166



La gráfica nos muestra que la densidad máxima va decreciendo a medida que se incrementa el valor del índice de plasticidad en el material de sub-base usado en la investigación; esto nos indica que el material usado en la conformación de sub base tiene características propias y únicas; de acuerdo al banco de material del que se extrae la misma, la nube de puntos densidad máxima vs. índice de plasticidad tiene una tendencia decreciente y continua a medida que se va incrementando el índice de plasticidad del material de sub-base, haciendo que se ajuste a una ecuación polinómica de 2do grado, con una correlacion mayor a 0,9 siendo representativa solo para el banco de extraccion de materiales. donde la densidad máxima para un índice de plasticidad de 8 es igual a 2166 Kg/cm<sup>3</sup>, y para un índice de plasticidad de 4 la densidad máxima alcanza a 2220 Kg/cm<sup>3</sup>. Esto repercute en la resistencia del material que compone la sub-base a la hora de medir su capacidad soporte (CBR).

## ANALISIS DE LA DENSIDAD MAXIMA DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICES PLASTICOS (CHOCLOCA - CHAGUAYA)

Índice de Plasticidad (IP)	Densidad Máxima (Kg/cm <sup>3</sup> )
6,6	2202
7,0	2190
7,4	2180

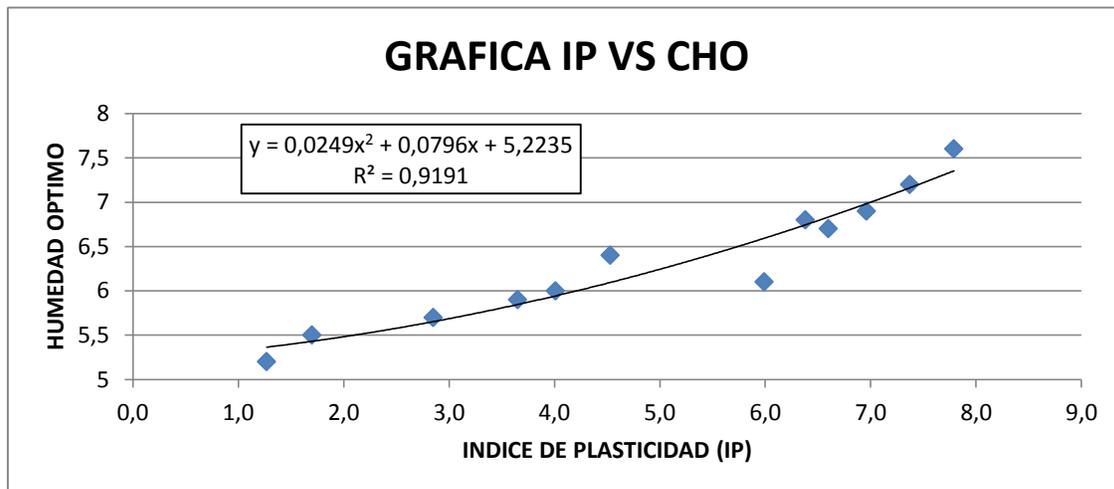


En la gráfica presente se puede ver que la densidad máxima es inversamente proporcional al incremento del índice de plasticidad en el material de sub-base usado en la investigación, es decir, que la densidad máxima decrece a medida que incrementa el índice de plasticidad, la nube de puntos se ajusta a una ecuación polinómica de 2do grado con una correlación mayor a 0,9 que es representativa sólo para el banco de extracción de materiales, donde las densidades máximas varían según el valor del índice de plasticidad y podemos obtener para un índice plástico de 6,5 una densidad máxima de 2205 Kg/cm<sup>3</sup>, y para un índice plástico de 8 un valor de 2177 Kg/cm<sup>3</sup>. donde la diferencia numérica alcanza hasta un 28 Kg/cm<sup>3</sup> de densidad, esto debido a la calidad del material y la elevada presencia de material fino en las muestras ensayadas.

### 3.4.2 Índice de plasticidad vs contenido de humedad optimo.

#### ANALISIS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMO DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICE PLASTICO (MUESTRAS EN GENERAL)

Indice de Plasticidad (IP)	Contenido de Humedad Optimo (%)
7,8	7,6
7,4	7,2
7,0	6,9
6,6	6,7
6,4	6,8
6,0	6,1
4,5	6,4
4,0	6,0
3,7	5,9
2,9	5,7
1,7	5,5
1,3	5,2

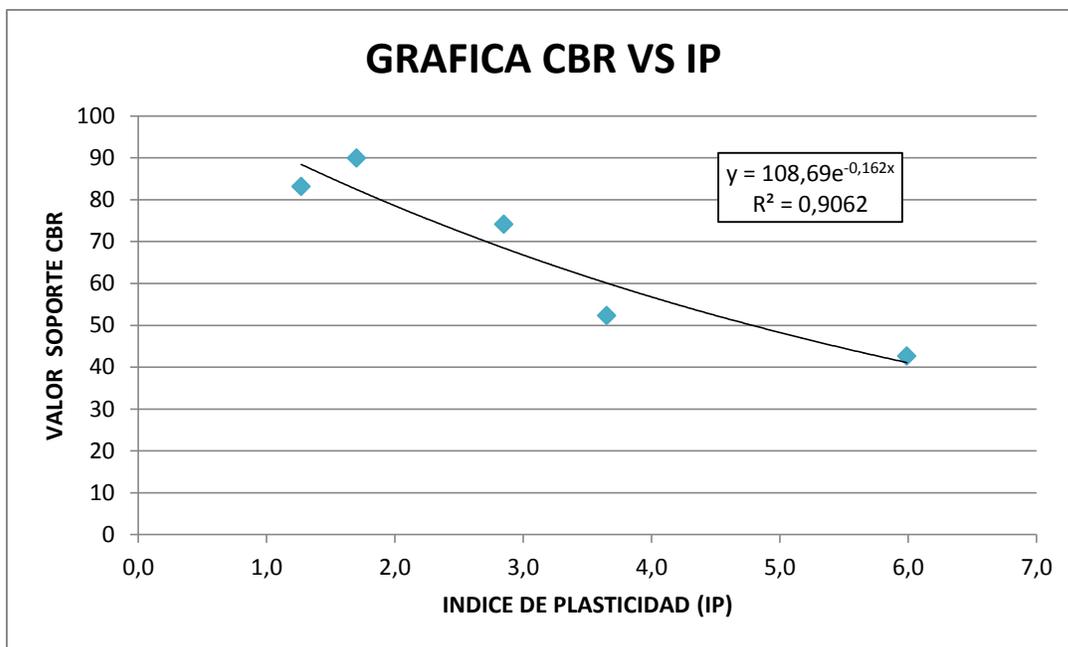


La gráfica donde el Contenido de humedad óptimo es proporcional al incremento del índice plástico es la única que se puede analizar en forma generalizada, ya que una sub-base cuanto mayor cantidad de finos contenga necesitará mayor cantidad de agua para estar en su humedad óptima con el cual podremos obtener la densidad máxima mediante la compactación; esto de acuerdo a la cantidad de material fino que contenga dicha muestra, se puede verificar en la grafica donde la nube de puntos tiene una tendencia casi definida y se ajusta a una ecuación polinómica de 2do grado con una correlación mayor a 0,9. que con el incremento de ensayos esto podría ser mas representativo, podemos obtener valores de contenido de humedad óptimos para valores de 8 y 1 de plasticidad iguales a 6,13 % y 5,2 % respectivamente.

### 3.4.3 Índice de plasticidad vs CBR al 100%.

#### ANALISIS DEL CBR DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICE PLASTICO (PUERTA AL CHACO - CANALETAS)

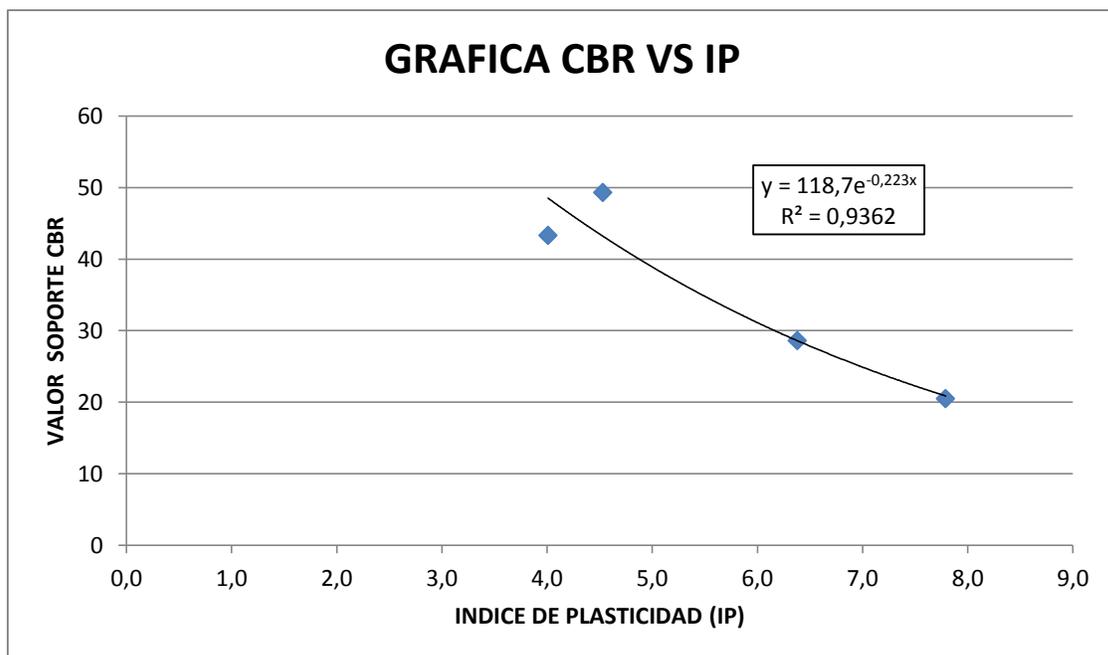
Indice de Plasticidad (IP)	Valor Soppote (CBR) 100 %
1,3	83,1
1,7	89,9
2,9	74,1
3,7	52,3
6,0	42,6



La presente gráfica representa la relación del valor soporte (CBR) vs el índice de plasticidad, donde el material de sub-base es granular arenoso para el proyecto Puerta al Chaco - Canaletas donde el Índice de Plasticidad natural del suelo no permite una cohesión entre las partículas del material pero a medida que va aumentando el valor del Índice de Plasticidad el valor soporte CBR llega a subir para después descender por la elevada presencia de arcilla, donde la relación se ajusta a una ecuación exponencial con una correlación mayor a 0,9. y dando valores de CBR de 92,5 % y 41,6 % para índices de plasticidad de 1 y 6 respectivamente. Donde el ajuste es representativo únicamente para el banco de materiales de extracción que está íntimamente relacionado con las características propias de acuerdo a su formación geológica de la misma.

**ANALISIS DEL CBR DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICE PLASTICO (SAN JACINTO - TEMPORAL)**

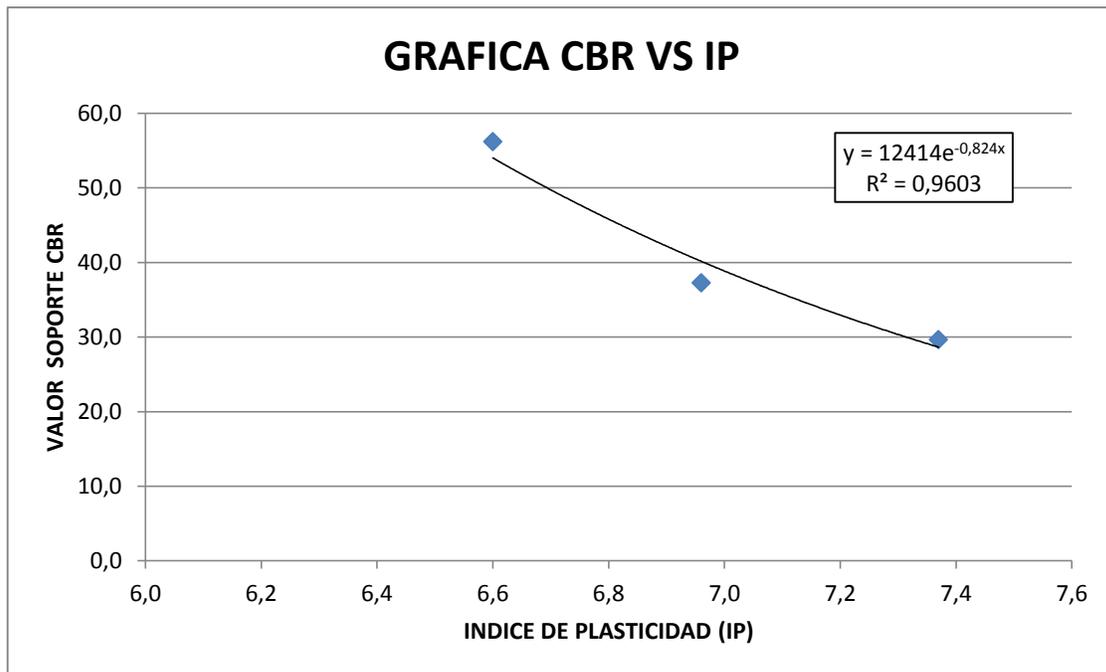
Indice de Plasticidad (IP)	Valor Soporte (CBR) 100 %
4,0	43,3
4,5	49,3
6,4	28,6
7,8	20,5



La relación existente entre el valor soporte (CBR) vs el índice de plasticidad, del material de sub-base para el proyecto San Jacinto - Temporal donde el material tiene naturaleza granular con presencia de pizarras y arena, el Índice de Plasticidad natural del material no permite una cohesión entre sus partículas y a medida que incrementamos el valor del Índice de plasticidad el valor soporte CBR llega a subir en proporción menor para después descender por la elevada presencia de material fino que se ve reflejada en el Índice de Plasticidad del material del proyecto analizado. Los valores obtenidos en los ensayos realizados se ajustan a una ecuación exponencial con una correlación mayor a 0,9. que nos dan valores de CBR de 49,2 % y 20,4 % para valores de índice de plasticidad de 4 y 8 respectivamente. Donde el ajuste es únicamente representativo para el banco de extracción de materiales y está ligado a sus características propias del mismo.

## ANALISIS DEL CBR DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICE PLASTICO (CHOCLOCA - CHAGUAYA)

Indice de Plasticidad (IP)	Valor Sapote (CBR) 100 %
6,6	56,2
7,0	37,3
7,4	29,7

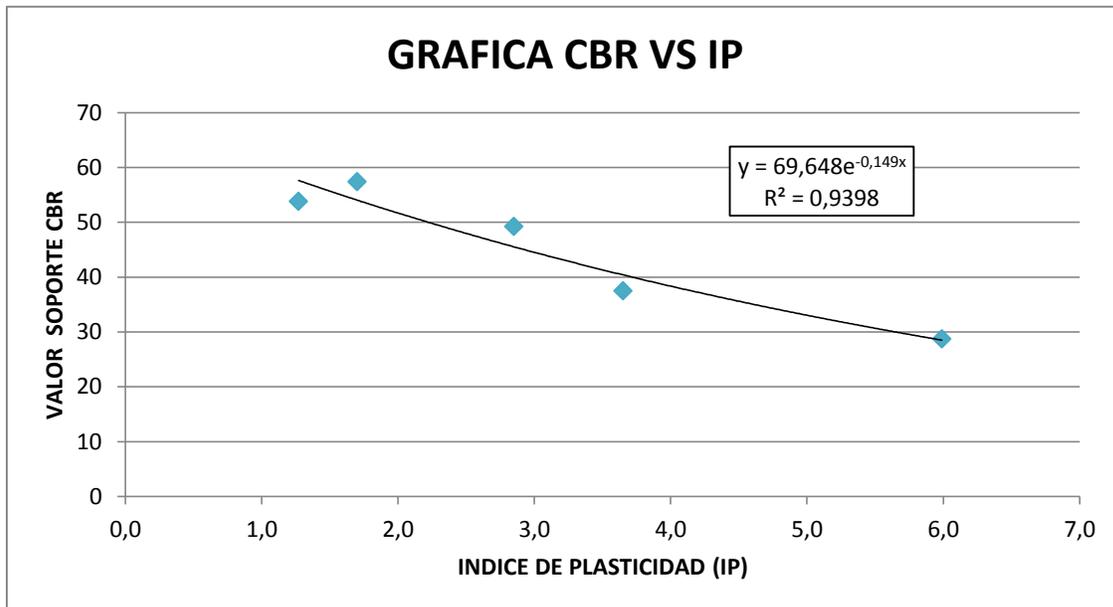


La relación existente entre el valor soporte (CBR) es inversamente proporcional al incremento del valor del índice de plasticidad, para el material del proyecto Chocloca - Chaguaya debido a que este inicialmente contenía un Índice de Plasticidad elevado por la elevada presencia de material arcilloso y pizarras que permitía una cohesión adecuada entre partículas en un principio obteniendo un CBR dentro del rango permitido para materiales de sub-base, y a medida que se incrementa el Índice de Plasticidad este decrece debido a la elevada presencia de material fino. Los datos obtenidos en laboratorio se ajustan a una ecuación exponencial representativa únicamente para el banco de extracción del material, con una correlación mayor a 0,9. donde nos da valores de 60 % y 26 % de CBR para índices plásticos de 6,5 y 7,5 respectivamente.

### 3.4.4 Índice de plasticidad vs CBR al 95%.

#### ANALISIS DEL CBR DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICE PLASTICO (PUERTA AL CHACO - CANALETAS)

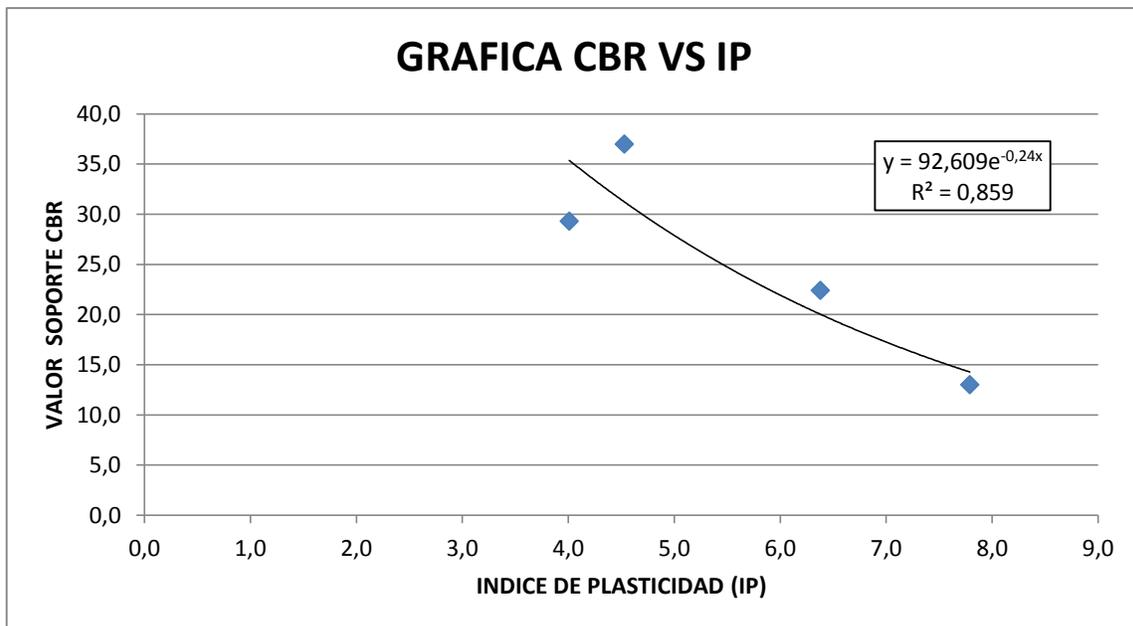
Indice de Plasticidad (IP)	Valor Soporte (CBR) 95 %
1,3	53,8
1,7	57,4
2,9	49,2
3,7	37,5
6,0	28,7



La presente grafica nos muestra la relacion del valor soporte (CBR) vs el índice de plasticidad, donde el material usado para sub-base en el proyecto de Puerta al Chaco - Canaletas es granular arenoso y su Índice de Plasticidad natural del suelo es bajo y no permite una cohesión entre las partículas del material; pero a medida que va aumentando el valor del Índice de Plasticidad el valor soporte CBR llega a subir para después descender por la elevada presencia de material fino que se ve reflejada en el Índice de Plasticidad. Los datos obtenidos en laboratorio se ajusta a una ecuación exponencial representativa unicamente para el banco de donde se extrae el material. con una correlación mayor a 0,9 dando valores de valor soporte CBR de 60 % y 30 % para valores de índice plástico de 1 y 8 respectivamente.

## ANALISIS DEL CBR DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICE PLASTICO (SAN JACINTO - TEMPORAL)

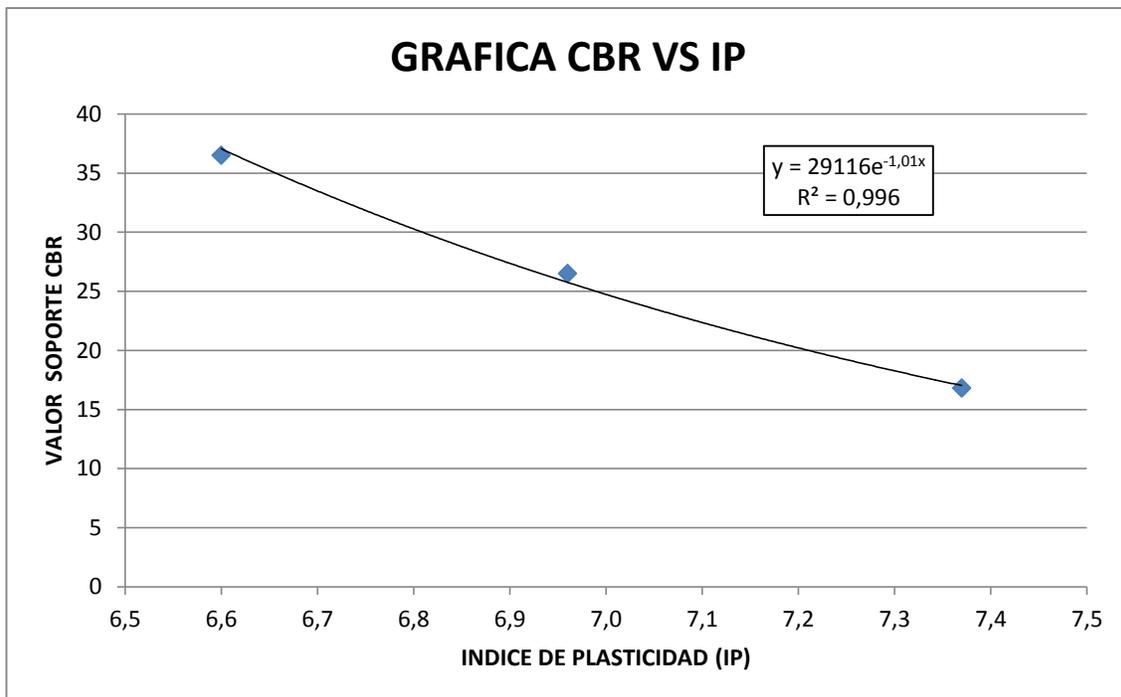
Indice de Plasticidad (IP)	Valor Soporte (CBR) 95 %
4,0	29,3
4,5	37,0
6,4	22,4
7,8	13,0



La variación valor soporte CBR vs índice de plasticidad que se puede observar en el gráfico donde el CBR en primera instancia tiende a subir con el incremento de plasticidad para luego decrecer a medida que aumenta el índice de plasticidad para el material de sub-base del proyecto San Jacinto - Temporal; esto debido a las características propias del banco de donde se extrae el material. Los datos obtenidos en laboratorio presentados en el gráfico se pueden ajustar a una ecuación exponencial, que con un mayor número de puntos se ajustaría de manera mas satisfactoria, donde tenemos valores de capacidad soporte CBR de 35 % y 13,5 % para índices de plasticidad de 4 y 8 respectivamente y el ajuste es representativo unicamente para el banco de extracción de materiales.

## ANALISIS DEL CBR DE LA SUB-BASE CON DIFERENTES VALORES DE INDICE PLASTICO (CHOCLOCA - CHAGUAYA)

Indice de Plasticidad (IP)	Valor Soporte (CBR) 95 %
6,6	36,5
7,0	26,5
7,4	16,8



La relación valor soporte CBR vs índice de plasticidad en el caso del material usado para la conformación sub-base del tramo Chocloca - Chaguaya es inversamente proporcional al incremento de índice plástico debido a que el material de este tramo en estudio tiene un índice de plasticidad elevado en estado natural, y con el incremento de material fino realizado a cada muestra fue elevándose mucho más presentando valores de soporte (CBR) decrecientes en laboratorio. Según los datos obtenidos en laboratorio, la nube de puntos se ajusta a una ecuación exponencial con una correlación mayor a 0,9 representativa únicamente para dicho banco de materiales, donde nos da valores de Soporte CBR de 41 % y 15 % para valores de índice plástico de 6,5 y 7,5 respectivamente.

### 3.5 Resultados.

Terminada la investigación, se pudo obtener los siguientes resultados:

- Los ensayos de contenido de humedad para los distintas muestras usadas para la investigación estuvieron dentro del rango de (1.5 % - 2.2 %) de humedad higroscópica.
- Los ensayos de límite líquido e índice de plasticidad de los materiales usados para la investigación en estado natural estuvieron dentro del rango permitido (máximo 35 para el límite líquido y máximo 8 para el Índice plástico) especificado en la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC)
- Los ensayos para la obtención del índice de plasticidad de las muestras de los diferentes proyectos en estado natural tuvieron diferentes valores, como ser 6.6 de plasticidad para Chocloca – Chaguaya, 1.3 para Puerta al Chaco – Canaletas y 4 para San Jacinto – Temporal.
- La clasificación de los materiales fueron resultado de los ensayos de límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico), ensayos de granulometría y ensayos de contenido de humedad higroscópica. Los materiales de sub-base usados para la investigación fueron materiales granulares teniendo clasificaciones según la norma AASHTO de A-1a(0) y A-2-4(0) y estuvieron dentro del rango para materiales de sub-base especificados en la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).
- Los contenidos de humedad óptimos en todos los ensayos estuvieron en los rangos (5.2 % y 7.8 %) y sus valores máximos y mínimos de sus densidades máximos son (2241 Kg/cm<sup>3</sup> y 2138 Kg/cm<sup>3</sup>).
- Los ensayos de capacidad soporte CBR al 100 % de compactación de los diferentes proyectos usados en la investigación en estado natural estuvieron dentro del rango permitido por la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) (mínimo 40 para capa sub-base).

- La relación densidad máxima vs índice de plasticidad es representativa única y exclusivamente para cada proyecto, con tendencia polinómica de 2do grado. En el proyecto Puerta al Chaco – Canaletas la ecuación del ajuste es  $(y=2.7566x^2 - 30.5868x + 2270.6871)$  con una correlación igual a 0.9618, en el caso del proyecto San Jacinto – Temporal su ecuación es  $(Y=2.823x^2 - 47.18x + 2363)$  con una correlación de 0.983. y en el proyecto de Chocloca – Chaguaya la ecuación es  $(11.61x^2 - 190.8x + 2955)$  con una correlación igual a 1.
- La relación contenido de humedad óptima vs índice de plasticidad tiene una correlación igual a 0.919 ajustada a una ecuación polinómica de 2do grado  $(Y=0.024x^2 + 0.079x + 5.223)$ ; por tanto este ajuste es confiable y generaliza a los materiales que componen la sub-base.
- La relación entre la capacidad soporte (CBR) al 100% de compactación vs Índice de Plasticidad en el caso de cada proyecto donde las tendencias de los ajustes son exponenciales, en el proyecto de Puerta al Chaco - Canaletas la ecuación es  $(Y=108.6e^{-0.16x})$  con una correlación igual a 0.906. El proyecto San Jacinto – Temporal tiene una ecuación  $(Y=118.7e^{-0.22x})$  con una correlación de 0.936. El proyecto de Chocloca – Chaguaya tiene la ecuación  $(Y=12414e^{-0.82x})$  con una correlación de 0.96.
- La relación entre la capacidad soporte (CBR) al 95% de compactación vs Índice de Plasticidad en el caso de cada proyecto las tendencias de los ajustes son exponenciales, en el proyecto de Puerta al Chaco - Canaletas la ecuación es  $(Y=69.64e^{-0.14x})$  con una correlación igual a 0.939. El proyecto San Jacinto – Temporal tiene una ecuación  $(Y=92.6e^{-0.24x})$  con una correlación de 0.859. El proyecto de Chocloca – Chaguaya tiene la ecuación  $(Y=2911e^{-1.01x})$  con una correlación de 0.996

- La relación entre la capacidad soporte (CBR) al 90% de compactación vs Índice de Plasticidad en el caso de cada proyecto las tendencias de los ajustes son exponenciales, pero sus correlaciones no se encuentran cercanos a uno debido a que los puntos se encuentran muy dispersos. En el proyecto de Puerta al Chaco - Canaletas la ecuación es  $(Y=30.53e^{-0.10x})$  con una correlación igual a 0.843. El proyecto San Jacinto – Temporal tiene una ecuación  $(Y=70.56e^{-0.29x})$  con una correlación de 0.641. El proyecto de Chocloca – Chaguaya tiene la ecuación  $(Y=8E6e^{-1.93x})$  con una correlación de 0.817. Cabe hacer saber que estos últimos ajustes de valor soporte (CBR) vs Índice de Plasticidad al 90 % no son fiables debido a que sus datos se encuentran dispersos y la gráfica obtenida no es representativa.

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

Luego del desarrollo del presente proyecto de grado, nos permitimos mencionar las siguientes conclusiones:

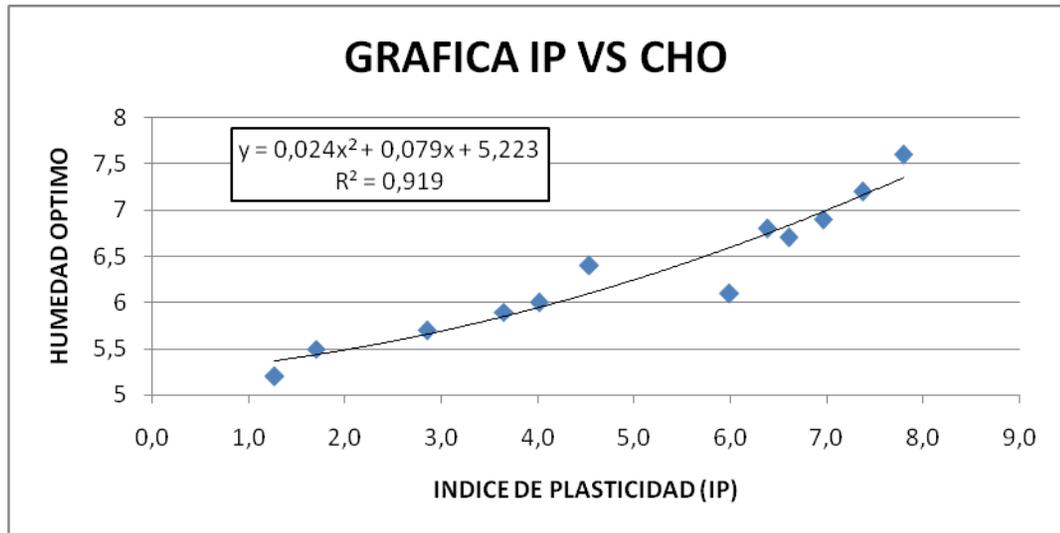
- Terminada la investigación, se pudo concretar la hipótesis planteada de la presente investigación confirmando que el índice de plasticidad en los materiales que componen la capa sub-base es un factor que tiene gran incidencia en la conformación de la misma y en su capacidad soporte (CBR) cuando se construye una carretera. Donde, a mayor valor de índice plástico, la capa sub-base reduce su resistencia.
- Mediante los ensayos realizados, se logró obtener las curvas que relacionan; (Densidad Máxima vs Índice de Plasticidad), (Contenido de Humedad Optimo vs Índice de Plasticidad) y (CBR (capacidad soporte) vs Índice de Plasticidad) para los materiales de cada uno de los proyectos analizados en la investigación.
- Por ser el CBR uno de los últimos ensayos que se realiza a una sub-base se verifico primeramente que los materiales y las distintas muestras con incremento en peso de material fino, usados en la investigación cumpla con las especificaciones técnicas de la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), que nos exige que la granulometría este dentro del rango TM-50a (mostrada en la tabla inferior), limite liquido menor a 35, índice de plasticidad máximo de 8, desgaste de los ángeles menor a 40% y el CBR que tiene que ser mayor o igual a 40, en el caso del proyectos de Chocloca - Chaguaya cumple la especificación de CBR, únicamente en estado natural, en el proyecto de San Jacinto – Temporal el CBR cumple hasta un 5% de incremento en peso de material fino y en el caso del proyecto Puerta al Chaco – Canaletas el CBR cumple hasta un 20% de incremento en peso de material fino.

Tamiz		TM-50a
(mm)	Alternativo	
50	2"	100
37,5	1 ½"	-
25	1"	55 - 100
19	¾"	-
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

Rango granulométrico para Sub Base. Fuente Norma ABC.

- La relación existente entre el valor soporte (CBR) vs Índice de plasticidad, no se puede generalizar para la sub-base en general, Pero sí existe una relación que es propia y única para cada uno de los proyectos tomados en cuenta. Además, está relacionado con las características de los materiales del banco de extracción de materiales.
- En base al análisis realizado a cada una de las gráficas se logro determinar la influencia que tiene el valor del índice de Plasticidad en el ensayo de la Capacidad Soporte (CBR), donde se realizaron ensayos de laboratorio a diferentes muestras de distintos proyectos departamentales; esto se puede apreciar con mayor claridad en las gráficas y tablas correspondientes.
- El índice de Plasticidad es un factor importante y trascendente que influye en la capacidad soporte (CBR) de una sub-base y por ende a la estructura del pavimento.
- Se llegó a la conclusión que el índice de plasticidad de un material de sub-base es inversamente proporcional al valor de su resistencia (CBR), como se puede verificar en las graficas obtenidas; donde a mayor valor de índice plástico menor valor de capacidad soporte (CBR).

- La relación existente entre el Contenido de Humedad Óptimo vs Índice de plasticidad para las muestras en general tiene tendencia polinómica de 2do grado con una correlación de 0.919, donde el ajuste es bueno; la gráfica es representativa para materiales de sub-bases. Los valores extremos alcanzados con esta ecuación son de 6.13 % y 5.2 % de humedad optima para valores de Índices plásticos de 8 y 1 respectivamente.



- Existe una relación que es propia e individual en cada proyecto y banco de extracción de materiales, entre la densidad máxima y el valor del índice de plasticidad donde a mayor valor de índice de plasticidad la densidad máxima decrece y los ajustes de los datos obtenidos en laboratorio son de tendencia polinómica de segundo grado con correlaciones mayores a 0.9. Y no siendo así en forma generalizada para las sub-bases debido a que en la compactación influye distintas variables como ser tipo de material, dureza del material, composición mineralógica del material y contenido de humedad natural.
- Se llegó a la conclusión que en cada proyecto es propia y única la relación existente entre los valores de CBR al 100 % de compactación vs los valores de índices plásticos. Donde el CBR es inversamente proporcional al incremento de plasticidad y la calidad de los ajustes son buenas con tendencia exponencial y correlaciones

mayores a 0.9 que nos indica que las gráficas construidas son representativas únicamente para el banco de donde se extrae el material.

- En cada proyecto es propia y única la relación existente entre la capacidad soporte CBR al 95% de compactación vs el Índice de Plasticidad, donde el CBR es inversamente proporcional al incremento de índice de plasticidad para cada uno de los proyectos analizados, donde los datos obtenidos en laboratorio tienen ajustes de buena calidad con tendencia exponencial y correlaciones cercanos a 1, que nos indica que las gráficas construidas son representativas únicamente para cada uno de los bancos de materiales de donde se extrae el material para cada proyecto.
- Se llegó a la conclusión que el valor soporte (CBR) de un material de sub-base al 90 % de compactación analizando en función al valor del Índice de Plasticidad, tiene una relación dispersa a medida que va aumentando el Índice de Plasticidad y no tiene tendencia definida, como se puede observar en los valores soporte (CBR) que tienen compactaciones de 100 % y 95 %. En ellos los valores obtenidos en laboratorio tienen una continuidad; esto se puede atribuir a diferentes causas entre las cuales está la poca densificación del material que se logra con 12 golpes por capa en la compactación Proctor T-180 y la no homogenización de la muestra al momento de introducir en el molde de CBR antes de realizar la compactación.
- Se llegó a la conclusión que la capacidad soporte (CBR) de la sub-base analizado en función al valor del índice de plasticidad no se puede generalizar para todo tipo de sub-base debido a que este guarda relación únicamente con el banco de extracción de materiales que tienen características únicas; por lo tanto se eliminaron las curvas donde se intentaron realizar tal relación ya que no eran muy representativas porque se trata de proyectos diferentes y diferentes tipos de suelos y se prefirió hacer el análisis a las gráficas individuales de cada proyecto.
- Se pudo evidenciar que a medida que presente la capa sub-base mayor cantidad de material fino, la densidad máxima y la capacidad soporte (CBR) van reduciendo mientras que la humedad óptima va aumentando.

- Para valores de índices de plasticidad menores a 6, en un material de sub-base se verifica que los valores de CBR inicialmente son menores con respecto al valor de CBR cuando se le incrementa un 5% en peso de material fino, debido a que el incremento de plasticidad proporciona una cierta adherencia al material de sub-base que hace que tenga un incremento del valor de CBR en proporción menor. En caso de la variación de los índices plásticos con el incremento de material fino de 6 a 8, los valores de CBR decrecen debido a que tienen una considerada cantidad de material fino.
- Se aclara que en casos de los proyectos: Chocloca – Chaguaya donde las muestras con incrementos de material fino tienen plasticidad mayor a 6,6 y el CBR es menor al 40%, y en el proyecto San Jacinto – Temporal donde las muestras con incremento de material fino tienen plasticidad mayor a 4,5 y su CBR es menor al 40%, ya no se puede considerar como sub-base ya que no cumple con la especificación mínima de CBR, especificada en la norma de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).
- Se hizo hincapié en lo que se refiere a la resistencia de la sub-base medida con el valor soporte CBR en laboratorio, ya que cada banco tiene sus características, sus especificaciones técnicas y estas se tienen que adaptar a las condiciones de cada proyecto.
- La regresión en cada curva demuestra que los valores tienen una correlación casi perfecta ya que los valores obtenidos se acercan a uno. Por lo cual se puede decir que esta investigación tiene validez y coherencia para un estudio de ingeniería.
- Con los resultados y las tablas obtenidas, este proyecto de grado “Análisis del CBR de la sub-base con diferentes valores de índice plástico, se convierte en una guía muy útil y practica a toda persona que necesite realizar ensayos de esta índole.
- Se logró cumplir a cabalidad todos y cada uno de los objetivos, tanto general como específicos que se trazaron en principio para el desarrollo del presente proyecto de grado.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- En la realización de los ensayos, se recomienda tomar muy en cuenta lo que son los procedimientos y los materiales a utilizar en la ejecución, puesto que estos factores hacen variar de una manera notoria en los resultados finales.
- Se debe tener especial cuidado en lo que se refiere a los ensayos de granulometría y límites de Atterberg, puesto que estos factores son muy importantes y producirían una variación en los resultados si es que estos no son utilizados de forma correcta.
- En los ensayos de compactación Proctor T-180 se recomienda que generalmente las variaciones de humedad varíen de dos en dos para tener una variación de las densidades más prolongadas que permitan dibujar la curva de compactación con el mínimo número de puntos.
- Se recomienda, que al momento de realizar la compactación Proctor T-180 se debe homogenizar bien el material antes de introducir en el molde ya sea este para hallar la densidad máxima o el CBR y los golpes por capa debe ser ejecutado por una sola persona y a un solo ritmo para que no varíe la energía de compactación.
- Se recomienda que al momento de ubicar un banco para la extracción de materiales para sub-base los ensayos cumplan con los requisitos mínimos de índice de plasticidad, ya que si no lo fuere este se verá afectado en los ensayos de la Capacidad Soporte (CBR) de dicho material.
- Se recomienda para futuras investigaciones que se realicen sobre el tema, la variación de los incrementos en peso de material fino tienen que ser menores a o igual al 1%, para tener una variación del índice de plasticidad menos prolongada.
- Recomendamos que al hacer un análisis de valor soporte CBR en función de la plasticidad, se debe hacer los estudios individualmente a cada banco de donde se extrae el material para sub-base.