

**CAPITULO I**  
**INTRODUCCION**

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Cuando en el ámbito de la construcción de pavimentos se encuentran suelos débiles para subrasante, lo primero que se piensa es la manera de como solventar este problema.

En gran parte de la ciudad de Tarija se pudo observar este problema que perjudica al crecimiento de los barrios, es de tal manera que se han ido realizando algunas alternativas que puedan mejorar las características del terreno, como un tratamiento superficial simple con la formación de una capa de material granular en las calles y avenidas para poder mejorar la transitabilidad debido a que hay una mayor facilidad de poder contar con este tipo de materiales.

La estabilización de suelos finos aplicada al mejoramiento vial, es una técnica que constituye distintas alternativas desde el punto de vista funcional, ambiental y económico, favoreciendo la utilización del suelo de la zona como parte de la estructura del pavimento, modificando las propiedades físicas y mecánicas características de su comportamiento inicial del suelo.

El autor en este trabajo pretende realizar un análisis mediante un estudio geotécnico de los suelos desfavorables que pueden presentar en la subrasante de las zonas a formar parte de la urbanización, realizando alternativas de mejoramiento de los suelos mediante una estabilización mecánica y química.

De tal forma así brindar una plataforma estable para evitar problemas de fallas estructurales que se pueden presentar en el pavimento debido a la subrasante conformada con suelos inadecuados presentes en los barrios en estudio, y así tener una mejor condición de transitabilidad en sus calles y avenidas.

La elaboración del proyecto es establecido dentro de la teoría, normas y manual para la conformación de la subrasante según especificaciones técnicas del país y bajo procedimientos de ensayos necesarios en laboratorio.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

A medida que transcurre el tiempo y el aumento de población, se ve la necesidad de ampliar la mancha urbana de la ciudad de Tarija, en estos últimos años se ha podido observar que el crecimiento de la población fue aumentando, lo que genera formaciones de nuevos barrios alrededor de la ciudad.

Gran parte de estos barrios presentan problemas de suelo débil con gran presencia de limos y arcillas en la subrasante, el cual llega a ser un problema para el diseño y construcción del pavimento de sus calles y avenidas, entonces se debe mejorar el suelo para garantizar una estabilidad del pavimento y así brindar un flujo seguro y rápido de los vehículos y personas que se trasladan a través de sus vías.

Entonces el suelo mejorado que conforme la subrasante proporcionará una plataforma resistente y así dar una larga vida a la estructura del pavimento ya que los suelos de baja resistencia son considerados inadecuados para la formación de la capa subrasante.

No obstante estos suelos constituyen la mayor parte de los terrenos de la ciudad de Tarija y son los más adecuados para realizar un proceso de estabilización, por lo que el empleo de distintas técnicas puede resultar siendo una solución adecuada para la zona en estudio.

Debido a estos problemas el presente proyecto realiza un análisis de alternativas que brinde solución a los problemas de suelos débiles de fácil aplicación en las calles de tierra que pasen a ser pavimentados.

Tomando en cuenta que se cumplan los requisitos indispensables del mejoramiento de subrasante en vías urbanas y así evitar problemas constructivos y estructurales que pueden generarse en el pavimento.

### 1.3. OBJETIVOS

Con el desarrollo del presente proyecto, se pretende alcanzar los siguientes objetivos.

#### 1.3.1. Objetivo general

- Analizar y proponer alternativas de métodos para el mejoramiento de la subrasante en zonas de suelo desfavorable a urbanizar en la ciudad de Tarija, para poder lograr mejorar la propiedad físicas y mecánicas del suelo natural, tomando en cuenta que se cumplan las condiciones necesarias para la conformación de la capa subrasante y así evitar problemas constructivos y estructurales que se pueden generar en el pavimento.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar las zonas de aplicación del proyecto que presenten suelos desfavorables.
- Realizar un estudio geotécnico de las zonas en estudio.
- Analizar el comportamiento del CBR y Expansión del suelo mejorado con el suelo natural.
- Obtener el porcentaje óptimo de material para la estabilización de la subrasante bajo la condición de especificación técnica.
- Determinar la altura de conformación de la capa subrasante mejorada.
- Realizar el análisis económico de la provisión y conformación de la capa subrasante natural y mejorada puesta en obra.

## 1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

En este proyecto se contempla el análisis de los suelos finos mediante un estudio geotécnico con ensayos básicos cuyo procedimiento y equipos a ser utilizados en laboratorio estarán regidos bajo las especificaciones de normas ASTM o AASHTO, Que están plasmados en el Manual técnico para el diseño de carreteras en Bolivia (volumen 4 “Manual de ensayo de suelos y materiales”), y con el equipo disponible en el Laboratorio de la universidad autónoma JUAN MISAEL SARACHO.

Se clasifica el suelo de acuerdo al método AASHTO ya que este método está destinado principalmente a clasificar los suelos según su adaptabilidad para ser usados en la construcción de pavimentos en carreteras y caminos.

El mejoramiento de la subrasante será realizando alternativas de estabilización como el método de mezcla suelo-suelo granular, suelo-cal y por sustitución del suelo, los porcentajes a introducirson: 0 %; 2%; 4% y 6% en relación al peso de la muestra para la cal y 40%,60% y 80% para el método suelo-suelo granular y así obtener la cantidad optima necesaria de tal forma que cumpla con la condición mencionada en el manual de especificaciones técnicas de la ABC, para para brindar una subrasante estable en la construcción del pavimento.

Una vez ejecutados los ensayos de laboratorio se realizará un análisis, evaluación de la resistencia, expansión y plasticidad del suelo de la subrasante en su estado natural con el suelo sometido a un proceso de mejoramiento.

Finalmente se realiza un análisis económica del proceso de conformación de la capa subrasante puesta en obra cumpliendo con las recomendaciones indicadas en las especificaciones técnicas de la ABC.

La investigación bibliográfica teórica será referente al tema de las características y las propiedades físicas, mecánicas y estabilización, especialmente referida a suelos débiles.

## **CAPITULO II**

# **ESTADO DE CONOCIMIENTO**

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 SUELOS

#### 2.1.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

El suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Es una capa delgada que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento.

**Los minerales** provienen de la roca madre, que se deshace lentamente. También pueden ser aportados por el viento y el agua, que los arrastran desde otras zonas erosionadas.

**La materia orgánica** es el producto de la descomposición de vegetales y animales muertos. Puede almacenar gran cantidad de agua y es rica en minerales.

**Agua y aire** ocupan los poros, espacios entre las partículas de suelo que se producen por las irregularidades de su forma y tamaño.

La proporción de los componentes determina una serie de propiedades físicas y mecánicas del suelo.

“El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales, por esto los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar el agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga y otros más.” BRAJA

#### 2.1.2 TIPOS DE SUELOS

Los tipos comunes de suelo que se puede observar son los siguientes:

**La arena y la grava** son tipos de suelo de grano grueso, que poseen poca o ninguna cohesión, son fáciles de identificar por medio de una inspección visual y se distinguen, generalmente hablando, por su relativa estabilidad bajo cargas rodantes cuando se encuentran confinados, por su alta permeabilidad y su falta de capacidad para

contraerse o expandirse en cantidades que provoquen daño cuando cambian el contenido de humedad.

Por lo general el termino grava se aplica a bancos naturales, ríos o depósitos de grava formados en su mayoría por partículas redondas,

**Limo** es el termino aplicado a los suelos de grano fino de poca o mediana plasticidad ,de tamaño intermedio entre arena y arcilla, en general, posee poca cohesión, experimenta una considerable contracción y expansión con los cambios de contenido de humedad y posee una cantidad variable de estabilidad bajo cargas rodantes.

Los limos orgánicos contienen cantidades apreciables de material orgánico descompuesta y en general, son altamente compresibles e inestables.

**Las arcillas** se distinguen por la presencia de granos muy finos, ya que muchas arcillas están compuestas principalmente de partículas coloidales, en general las arcillas poseen una plasticidad que varía de mediana a alta, tienen considerable resistencia cuando están secas, sufren cambios extremos en volumen cuando cambian el contenido de humedad y son prácticamente impermeables al flujo de agua.

Las arcillas expansivas son aquella arcilla susceptible de producir grandes cambios de volumen, en directa relación con los cambios en la humedad del suelo: se expanden con la humedad y se contraen al secarse.

Los cambios de volumen pueden afectar de manera muy negativa a las cimentaciones y a las obras de diseño.

**La turba** es un suelo principalmente compuesto por material vegetal en proceso de descomposición, su alto contenido de agua, sus naturales leñosa y su alta compresibilidad hace indeseables en extremo el empleo de este material en los cimientos.

### 2.1.3 CARACTERÍSTICAS DE UN SUELO FINO

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.

### **Propiedades**

Las principales peculiaridades de los suelos finos en su comportamiento como material estructural derivadas de su estructura y composición se pueden resumir en los siguientes puntos:

- a) Comportamiento diferente según el nivel de humedad
- b) Afinidad por el agua, manifiesta en mayor o menor grado según su mineralogía
- c) Inestabilidad volumétrica
- d) Baja resistencia y capacidad portante
- e) Baja permeabilidad
- f) Compresibilidad dependiente del tiempo de aplicación de la carga

Los suelos finos en ingeniería civil son, probablemente, los materiales geológicos más contradictorios desde el punto de vista de su utilidad en Ingeniería Civil. Son fuente inagotable de problemas de estabilidad en buen número de obras, pero constituyen por sí mismas un material de valiosas propiedades ingenieriles.

Están formados fundamentalmente por arcillas, la arcilla está constituida fundamentalmente por silicato de aluminio hidratado, es un tipo de suelo que cuando está húmedo o mojado, resulta pegajoso pero cuando está seco es muy fino y suave, dado que la arcilla está formada por partículas diminutas de menos de 0.005mm de diámetro

### **2.1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS**

Los suelos se encuentran en la naturaleza con características variadas, que agrupando las mismas en rangos bien definidos, podemos establecer una clasificación de suelos que servirán para identificar los materiales que utilizamos dentro de la construcción civil.

Los granos que conforman el suelo y tienen diferente tamaño, van desde los grandes que son los que se pueden tomar fácilmente con las manos, hasta los granos pequeños, los que no se pueden ver a simple vista.

Dada la gran variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, la mecánica de Suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos.

**Figura 2.1 Sistemas de clasificación de suelos**



*Fuente: “Universidad católica de Valparaíso”, Escuela en ingeniería de construcción.*

Los métodos más comunes de clasificación de suelos, empleado en la ingeniería de Fundación son: sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) y ASSTHO

#### 2.1.4.1 Sucs

(Sistema unificado de clasificación de suelos)

También llamado sistema de clasificación *ASTM*.

La clasificación es basada en las propiedades de plasticidad y en la distribución del tamaño de grano, según esta última, el sistema divide el suelo en dos grandes categorías:

**Suelos Grueso granulares:** Son aquellos materiales en los cuales el porcentaje retenido en la malla No.200 es superior al 50%. Dentro de ellos están las fracciones de arena y grava

**Suelos Finos granulares:** Son los suelos en los cuales en 50% o más pasa la malla No.200. En estos suelos se incluyen las fracciones limo y arcilla

### Cuadro 2.1 Clasificación de suelos sistema unificado

Símbolo	G	S	M	C	O	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos Orgánicos y arcilla	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduados	Mal graduados

Fuente: “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, Braja. M Das. Quinta Edición

GW: Grava bien gradada, mezclas gravosas, poco o ningún fino.

GP: Grava mal gradada, mezclas grava – arena, poco o ningún fino.

GM: Grava limosa, mezclas grava, arena, limo.

GC: Grava arcillosa, mezclas grava – arena arcillosas.

SW: Arena bien gradada.

SP: Arena mal gradada, arenas gravosas, poco o ningún fino.

SM: Arenas limosas, mezclas arena – limo.

SC: Arenas arcillosas, mezclas arena – arcilla.

ML: Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, limo arcilloso, poco plástico, arenas finas limosas, arenas finas arcillosas.

CL: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras (pulpa)

#### 2.1.4.2 Aashto

(American Association of State High-way and Transportation Officials)

Está destinada principalmente a clasificar los suelos de acuerdo a su adaptabilidad para ser usados en la construcción de pavimentos en carreteras y caminos. El sistema *AASHTO* se usa principalmente para clasificación de las capas de carreteras. No se usa en la construcción de cimentaciones.

Este sistema describe un procedimiento para clasificar suelos en siete grupos principales: desde A-1 hasta A-7

Suelos con 35% o menos de fino

A – 1 Gravas y arenas

A – 2 Gravas limosas o arcillosas, Arenas limosas o arcillosas

A – 3 Arenas finas

Suelos con más de 35% de fino

A – 4 Suelos limosos

A – 5 Suelos limosos

A – 6 Suelos arcillosos

A – 7 Suelos arcillosos

Para A-7-5,  $PI < LL-30$

Para A-7-6,  $PI > LL-30$

Basado en el tamaño del grano (granulometría), en la plasticidad (límite líquido e índice de plasticidad). Para evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para subrasante de un camino, se desarrolló también un número denominado índice de grupo (IG).

El sistema más apropiado para clasificar los suelos para estudio de calles y carreteras es el AASHTO

### Cuadro 2.2 Correlación de tipos suelos AASHTO y SUCS

Clasificación de Suelos AASHTO AASHTO M-145	Clasificación de Suelos SUCS ASTM –D-2487
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A – 2	GM, GC, SM, SC
A – 3	SP
A – 4	CL, ML
A – 5	ML, MH, CH
A – 6	CL, CH
A – 7	OH, MH, CH

*Fuente: “US Army Corps of Engineers*

### 2.1.4.3 Índice de grupo (IG)

El índice de grupo incluyendo el grupo de clasificación, se usa para determinar la calidad relativa de suelos de terraplenes, material de sub-rasante, sub-bases y bases.

El índice de grupo se determina a través de la evaluación en cada grupo, mediante el cálculo de la fórmula empírica:

Establecido en el año 1973, sistema AASHTO

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd \quad (2.1)$$

Donde: IG= índice de grupo.

a= %pasa N°200 – 35% (Si %N°200>75, se anota 75, si es<35, se anota 0)

b= %pasa N°200 – 15% (Si %N°200>55, se anota 55, si es<15, se anota 0)

c= Límite líquido – 40% (Si LL>60, se anota 60, si es<40, se anota 0)

d= Índice de Plasticidad – 10% (Si IP>30, se anota 30, si es<10, se anota 0)

Condicionando que cualquier factor que pudiese salir negativo; éste se asume con el valor de cero.

#### Cuadro 2.3 Clasificación de suelo según el índice de grupo

Índice de Grupo	Suelo de Subrasante
IG > 9	Muy Pobre
IG está entre 4 a 9	Pobre
IG está entre 2 a 4	Regular
IG está entre 1 – 2	Bueno
IG está entre 0 – 1	Muy Bueno

*Fuente: Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos*

## 2.1.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL SUELO

### 2.1.5.1 Humedad

El contenido de humedad se define como la relación expresada en porcentaje, entre el peso de agua que llena los poros y el peso del suelo después del secado, es decir la cantidad de agua presente dentro de una muestra de suelo.

#### Fórmula

$$w(\%) = \frac{PA}{PSS} * 100 \quad (2.2)$$

Donde:

$W(\%)$ = Contenido de humedad en porcentaje.

$PA$ = Peso del agua presente en el suelo.

$PSS$ = Peso del suelo seco

Existen dos formas en la cual se presenta el agua y son:

**El agua libre.-** es la que circula a través del suelo sin dificultad alguna y debido a la gravedad puede ser drenada.

**El agua retenida.-** es la que se encuentra retenida dentro del suelo y su formación se define de dos maneras:

**Agua Higroscópica.-** es la que absorbe un suelo de la humedad del aire.

**Agua capilar.-** es la retenida por efecto de la tensión superficial.

### 2.1.5.2 Peso específico de los sólidos

El peso específico relativo de una sustancia es la razón de su peso al peso de igual volumen de agua.

**El peso específico relativo de una masa** de suelo o roca (que incluye aire, agua y sólidos) se denomina peso de la masa o peso específico aparente; se designa por  $G_m$  y se puede expresar con la siguiente fórmula:

$$G_m = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{W}{V * \gamma_w} \quad (2.3)$$

Donde:

$G_m$  = El peso específico relativo de una masa de suelo

$\gamma$  = Peso específico de los sólidos g/cm<sup>3</sup>

$\gamma_w$  = Peso específico del agua a 4°C , g/cm<sup>3</sup>

$w$  = Peso del sólido, gr

$V$  = Volumen del espécimen, cm<sup>3</sup>

**El peso específico relativo de los sólidos  $\gamma_s$**  (con la exclusión del aire y el agua), se expresa por:

$$\gamma_s = \frac{W}{V * \gamma_w} \quad (2.4)$$

El peso específico relativo de los sólidos de un suelo se determina en laboratorio haciendo uso de un frasco volumétrico y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s + W_{fsw}} \quad (2.5)$$

$\gamma$  = Peso específico relativo del suelo.

$W_s$  = Peso del suelo seco.

$W_{fw}$  = Peso del frasco lleno de agua a la temperatura del ensayo.

$W_{fsw}$  = Peso del frasco con agua y suelo a la temperatura del ensayo.

### 2.1.5.3 Granulometría

La variedad en el tamaño de las partículas del suelo, casi es ilimitada; por definición, los granos de mayor tamaño son los que se pueden mover con gran facilidad, mientras que los más finos son tan pequeños que no se puede apreciar con un microscopio corriente. Las partículas producidas por la meteorización mecánica rara vez son de diámetro inferior a 0.001 mm y generalmente, son mucho mayores. Para clasificar por tamaño de partículas gruesas, el procedimiento más expedito es el del tamizado. Sin embargo, al aumentar la finura de las partículas, el tamizado se hace cada vez más difícil teniéndose entonces que recurrir al procedimiento de sedimentación.

Los ensayos de granulometría tienen por finalidad determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño. La distribución de las partículas con tamaño superior a 0.075 se determina mediante tamizado, con una serie de mallas normalizadas, en la ingeniería un método común para mostrar gráficamente las características textuales de un suelo es por medio de una curva de distribución del tamaño de partículas llamada curva granulométrica.

**Figura 2.2 Máquina tamizadora con juego de tamices**



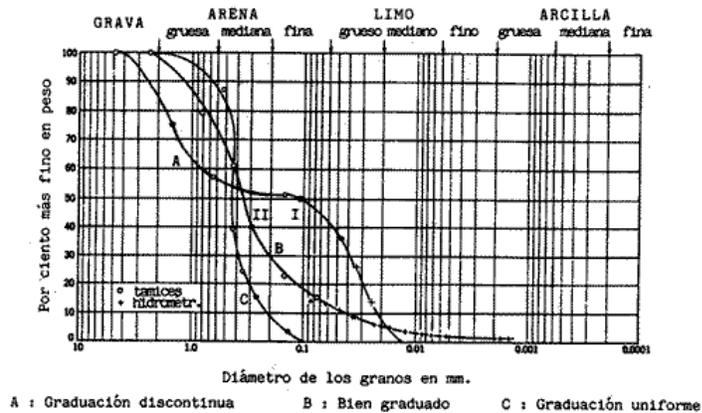
*Fuente: ELE International. Testing Equipment for Construction Materials Catálogo2007.*

**Cuadro 2.4 Tamaño nominales de aberturas de los tamices**

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
75	( 3" )
63	( 2 ½" )
50	( 2" )
37,5	( 1 ½" )
25	( 1" )
19	( ¾" )
9,5	( 3/8" )
4,75	( N° 4 )
2	( N° 10 )
0,425	( N° 40 )
0,075	( N° 200 )

*Fuente: "manual de la ABC –sección suelos"*

**Figura 2.3 Curva característica de distribución granulométrica**



Fuente: “Ingenieria de carreteras”, Paul H. Wright.

La curva A: Corresponde a una graduación discontinua

B: corresponde a un suelo bien graduado

C: corresponde a un suelo de graduación uniforme

La curva se dibuja en papel semilogarítmico. Con la escala aritmética (ordenadas) los porcentajes en peso de partículas. En escala logarítmica (abscisas) los tamaños de los granos en milímetros. Esta clasificación es necesaria en geotecnia, pero no suficiente.

Se complementa siempre la granulometría con el ensayo de Límites de Atterberg, que caracterizan la plasticidad y consistencia de los finos en función del contenido de humedad.

A partir de la curva de distribución granulométrica, se pueden obtener diámetros característicos como el D10, D85, D60, etc. La letra D se refiere al tamaño del grano o diámetro aparente, de la partícula de suelo y el subíndice (10, 85, 60) denota el porcentaje de material más fino. Por ejemplo, D10 = 0.15 mm, significa que el 10% de los granos de la muestra son menores en diámetro que 0.15 mm; el diámetro D10 es llamado “tamaño efectivo de un suelo”.

Una indicación de la variación o rango del tamaño de los granos presentes en la muestra se obtiene mediante el “Coeficiente de uniformidad”  $C_u$ , definido como:

$$C_u = \frac{D_{60} \text{ (2.6)}}{D_{10}}$$

Un valor grande de este parámetro, indica que los diámetros D60 y D10, difieren en tamaño apreciablemente.

No asegura sin embargo, que no exista un vacío de gradación, como el que se presenta cuando faltan por completo o solamente existe una muy pequeña cantidad de diámetros de un determinado tamaño.

El “Coeficiente de curvatura”  $C_c$ , es una medida de la forma de la curva entre el D60 y el D10, y se define de la siguiente forma:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60}D_{10}} \quad (2.7)$$

Valores de  $C_c$  muy diferentes de uno indican que falta una serie de diámetros entre los tamaños correspondientes al D60 y el D10. Los diámetros correspondientes al D15 y al D85 pueden utilizarse para determinar la capacidad del suelo para ser utilizado en diseño de filtros para una presa o para recubrir los agujeros de tubería perforada como sistema de sub-drenaje dentro de un suelo.

#### 2.1.5.4 Análisis granulométricos por hidrómetro

Los hidrómetros están calibrados para mostrar la cantidad de suelo que aún está en suspensión en cualquier tiempo dado,  $t$ . el diámetro máximo de las partículas de suelo aun en suspensión en el tiempo  $t$  se determina mediante la ley de Stokes.

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (2.8)$$

Donde:

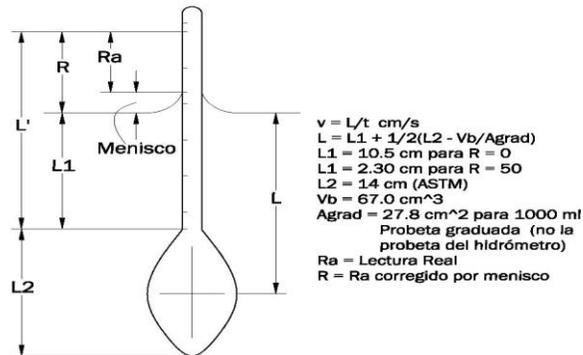
D = Diámetro de partículas

L= Profundidad efectiva de caída de las partículas en un tiempo dado

T = Tiempo en minutos.

K = constante de las características del suelo

**Figura 2.4 Dimensiones y términos del hidrómetro**



Fuente: Joseph E. Bowles. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil.

### 2.1.5.5 Plasticidad de suelo

La plasticidad es la propiedad que tiene el suelo para cambiar de forma (dentro de un rango de humedad dado) y mantener sin perder volumen ni romperse cuando se someten a fuerzas de compresión.

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos.

El nombre de estos es debido al científico sueco Albert Mauritz Atterberg. (1846-1916).

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente líquido.

Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

#### 2.1.5.5.1 Límite líquido (LL)

El límite líquido está definido, como el contenido de humedad en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado plástico para pasar al estado líquido o semilíquido, en donde el suelo toma las propiedades y apariencias de una suspensión.

Puesto que no existe una separación muy clara entre los estados de consistencia semilíquido, plástico y semisólido, se ha ideado el procedimiento estándar para la

determinación de éste límite; el cual se denomina “método mecánico” el que ideó *Casagrande* y también denominado “Copa de *Casagrande*”.

**Figura 2.5**Copa de Casagrande

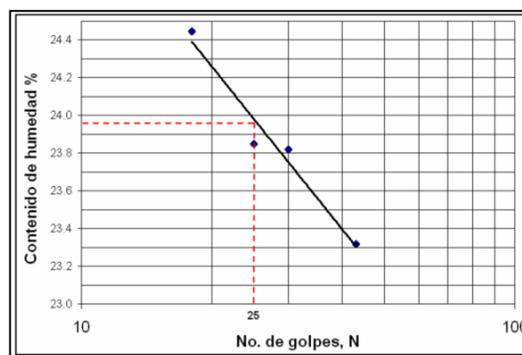


*Fuentes: ELE International. Testing Equipment for Construction Materials Catálogo 2007.*

Para formar el gráfico con una abscisa semilogarítmica, en la cual se ubicará el número de golpes y en la ordenada una escala aritmética donde se ubica el porcentaje de humedad (%H).

Los puntos obtenidos tienden a alinearse sobre una recta, lo que permite la determinación de la ordenada para la abscisa  $N = 25$  golpes. Y este porcentaje de humedad se denomina como límite líquido.

**Figura 2.6**Gráfico del límite líquido



*Fuente: “mecánica de suelos ,tomo 1”,Juarez Badillo Rodriguez.*

### 2.1.5.5.2 Límite plástico (LP)

El límite plástico está definido como el contenido de humedad, en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado semisólido y el estado plástico; en el estado semisólido el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado y en el estado plástico el suelo se comporta plásticamente. Arbitrariamente, también se define como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro se rompe o se agrieta, cuando se enrolla a un diámetro aproximado de tres milímetros al rodarse con la palma de la mano sobre una superficie lisa.

### Figura 2.7 Equipo para la determinación del límite plástico



*Fuente: Humbolt. Testing Equipment for Construction Materials Catálogo 2007*

### 2.1.5.5.3 Índice de plasticidad (IP)

El Índice de Plasticidad (IP) es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil.

Representa la variación de humedad que puede tener un suelo que se conserva en estado plástico, índice de plasticidad depende generalmente de la cantidad de arcilla en el suelo.

El IP se mide por dos pruebas simples en la mecánica de suelo: el límite líquido y el límite plástico; la diferencia entre los dos es el Índice de Plasticidad.

Viene definido por la relación:

$$IP = LL - LP \quad (2.9)$$

Dónde:

IP: Índice de plasticidad.

LL: Limite líquido.

LP: Limite plástico.

### Cuadro 2.5 Clasificación de los suelos según su índice de plasticidad (IP)

Si $IP = 0$	Si no es posible determinar uno de los dos límites (LL o LP), o si la diferencia es negativa (IP), el suelo se clasifica como No Plástico (NP).
Si $IP < 7$	El suelo tiene una baja plasticidad
Si $7 < IP < 17$	El suelo es medianamente plástico
Si $IP > 17$	Suelo altamente plástico

Fuente: Joseph E. Bowles. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*.

#### 2.1.5.6 Compactación

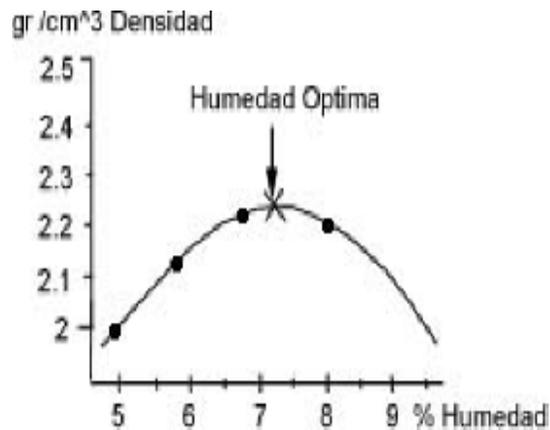
La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos, lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades ingenieriles.

La falta de adecuada compactación, es causa de muchas fallas en los pavimentos. La estabilidad de una obra vial exige entre otras, que los terraplenes y las diferentes capas de rotura se hallan debidamente compactados. Esta compactación deberá realizarse mediante equipos especiales como ser: aplanadoras, rodillos lisos, rodillos neumáticos, rodillos pata de cabra, vibro compactadores, etc.

A fin de que el material alcance al compactarse mayor densidad posible en obra, debiere tener una humedad adecuada en el momento de la compactación. Esta humedad previamente determinada en laboratorio, se llama “HUMEDAD ÓPTIMA” y la

densidad obtenida se conoce con el nombre de “DENSIDAD MÁXIMA”.  
Esto está dado por la siguiente gráfica.

**Figura 2.8** Curva de compactacion



*Fuente: “Ingeniería de carreteras”, Paul H. Wright.*

En la actualidad existen distintos métodos para reproducir en laboratorio las condiciones de compactación en obra.

El primero y más difundido es debido al Dr. R. R. Proctor (1933) y es conocido como **Ensayo Proctor Estándar**. La prueba consiste en compactar el suelo a emplear en tres capas dentro de un molde de forma y dimensiones normalizadas, por medio de 25 golpes en cada una de ellas con un pisón de 2,5 [kg] de peso, que se deja caer libremente desde una altura de 30,5 [cm]

En tiempos de la Segunda Guerra Mundial se introdujo el **Ensayo Proctor Modificado** (AASHTO T-180), como respuesta a las exigencias de subrasantes más densas en aeropistas, demandadas por los pesados equipos de aviación militar que se desarrollaron por entonces. Este ensayo modificó el Estándar aumentando el número de capas de 3 a 5; el número de golpes en cada una de ellas se llevó de 25 a 55; el peso del pisón se elevó a 4,5 [kg] y la altura de caída a 45,7 [cm].

**Figura 2.9** Equipo de compactación “Protor estándar y modificado”



*Fuentes: ELE International. Testing Equipment for Construction Materials Catálogo 2007.*

### **Densidad del suelo húmedo**

$$D_{SH} = \frac{P_{SH}}{V} \quad (2.10)$$

Donde:

$D_{SH}$  = Densidad del suelo húmedo gr/cm<sup>3</sup>

$P_{SH}$  = Peso del suelo húmedo. gr

$V$  = Volumen del suelo. cm<sup>3</sup>

### **Porcentaje de humedad**

$$w(\%) = \frac{PA}{PSS} * 100 \quad (2.11)$$

Donde:

$W(\%)$  = Contenido de humedad en porcentaje

$PA$  = Peso del agua presente en el suelo gr

$PSS$  = Peso del suelo seco gr

### **Densidad del suelo seco**

$$D_{SS} = \frac{D_{sh}}{1 + \frac{w\%}{100}} \quad (2.12)$$

Donde:

$D_{SS}$  = Densidad del suelo seco gr/cm<sup>3</sup>

$D_{SH}$  = Densidad del suelo húmedo gr/cm<sup>3</sup>

$W(\%)$ = Contenido de humedad en porcentaje.

#### 2.1.5.6.1 Ventajas de la compactación

**Aumenta la capacidad para soportar cargas:** Los vacíos producen debilidad del suelo e incapacidad para soportar cargas pesadas. Estando apretadas todas las partículas, el suelo puede soportar cargas mayores debidas a que las partículas mismas que soportan mejor.

**Impide el hundimiento del suelo:** Si la estructura se construye en el suelo sin afirmar o afirmado con desigualdad, el suelo se hunde dando lugar a que la estructura se deforme (asentamientos diferenciales). Donde el hundimiento es más profundo en un lado o en una esquina, por lo que se producen grietas o un derrumbe total.

**Reduce el escurrimiento del agua:** Un suelo compactado reduce la penetración de agua. El agua fluye y el drenaje puede entonces regularse.

**Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo:** Si hay vacíos, el agua puede penetrar en el suelo y llenar estos vacíos. El resultado sería el esponjamiento del suelo durante la estación de lluvias y la contracción del mismo durante la estación seca.

**Impide los daños de las heladas:** El agua se expande y aumenta el volumen al congelarse. Esta acción a menudo causa que el pavimento se hinche, y a la vez, las paredes y losas del piso se agrieten. La compactación reduce estas cavidades de agua en el suelo.

#### 2.1.5.7 Capacidad portante del suelo

Es la resistencia característica de un suelo natural o mejorado a efecto de cuna carga ejercida sobre ella.

Los ensayos de resistencia o de respuesta se deben realizar sobre muestras representativas de los suelos predominantes, reproduciendo las condiciones de humedad y densidad que se espera prevalezcan en servicio.

El ensayo más utilizado es el CBR, el cual es una medida de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante bajo condiciones de humedad y densidad controladas, que tiene aplicación en el diseño y en la evaluación de pavimentos asfálticos

### 2.1.5.7.1 Método del CBR

El ensayo más utilizado es el **CBR (Relación de Soporte California)**, el cual es una medida de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante bajo condiciones de humedad y densidad controladas, que tiene aplicación en el diseño y en la evaluación de pavimentos asfálticos

El porcentaje *CBR* (o simplemente *CBR*), está definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado penetre a una profundidad determinada, una muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la fuerza necesaria para que el pistón penetre a esa misma profundidad y con igual velocidad, una probeta con una muestra estándar de material triturado. La expresión que define al *CBR* es la siguiente:

$$(2.1) \quad \% \text{ CBR} = \frac{\text{carga unitaria del ensayo} \times 100}{\text{carga unitaria patrón}}$$

Se expresa por el índice portante CBR en % del valor de referencia. Cuanto más elevado es el CBR más capacidad portante tiene el suelo.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico.

**Figura 2.10 Prensa hidráulica de carga para CBR**



*Fuentes: ELE International. Testing Equipment for Construction Materials Catálogo 2007.*

La prueba de *CBR* comprende tres ensayos fundamentales:

- Determinación de la densidad y humedad de la muestra compactada.
- Determinación de las propiedades expansivas del material, porcentaje de hinchamiento (expansión)
- Determinación de la resistencia a la penetración

### 2.1.5.8PH del suelo

El PH es una medida de la concentración de hidrógeno expresado en términos logarítmicos. Los valores del pH se reducen a medida que la concentración de los iones de hidrógeno incrementan, variando entre un rango de 0 a 14. Los valores por debajo de 7.0 son ácidos, los valores superiores a 7.0 son alcalinos y/o básicos, mientras que los que rondan 7.0 son denominados neutrales.

## 2.2 GENERALIDADES SOBRE LOS PAVIMENTOS

Todos hemos tenido la oportunidad de observar un pavimento, ya sea en largas caminatas en la vía o simplemente al conducir nuestro automóvil, sin embargo solo vemos una inmensa capa asfáltica o de concreto, pero un pavimento no solo es esa capa externa y observable, es toda un estructura compleja, que necesita un diseño especial, aquí se pretende dar un visión muy simple de lo que es un pavimento.

**Figura 2.11** Capas de un pavimento



*Fuente: "Subrasante características", proyecto para el camino Cap.III*

## 2.2.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

Un pavimento es una estructura conformada por una serie de capas, de diferentes espesores y materiales de diferentes calidades, las cuales al interactuar unas con otras ofrecen un grado de resistencia al paso de los vehículos.

## 2.2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

Según el Manual Centroamericano para diseño de Pavimentos contemplado en SIECA (Secretaría de Integración Económica Centroamericana), éste se divide en flexibles, semirrígidos o semiflexibles, pavimentos rígidos y articulados (adoquines). Los pavimentos más comunes son los pavimentos flexibles y pavimentos rígidos.

### 2.2.2.1 Pavimento flexible

#### **Sub-rasante.**

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno.

El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que esta debe cumplir con los requisitos de resistencia e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, entre otros parámetros.

#### **Sub-base.**

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento.

La sub-base debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento. Se utiliza además como capa de drenaje y controlador de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares.

**Base.**

Es la capa de pavimento que tiene como función primordial, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito, a la sub-base y a través de ésta a la subrasante, y es la capa sobre la cual se coloca la capa de rodadura.

**Superficie de rodadura.**

Capa superior de la estructura del pavimento construida de mezcla asfáltica.

**2.2.2.2 Pavimento rígido****Sub-rasante y sub-base.**

En los pavimentos rígidos, la sub-rasante y sub-base cumplen las mismas funciones que en los Pavimentos Flexibles, y pueden ser generadas de igual manera, tal como se describió anteriormente.

**Superficie de rodadura.**

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la sub-base y sub-rasante, dado que no usan capa de base.

**2.3 SUBRASANTE****2.3.1 INTRODUCCIÓN**

Cuando en el ámbito de la construcción de caminos se encuentran suelos inestables, lo primero que se piensa es la manera de cómo resolver este problema y a menudo se soluciona con el desalojo de todo el material plástico generando así un mayor costo.

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos. Los suelos inestables pueden crear problemas significativos en las estructuras y pavimentos. Con el diseño y técnicas de construcción apropiados, el tratamiento transforma a los suelos inestables en materiales aptos para el emplazamiento del pavimento.

### 2.3.2 DEFINICIÓN

La subrasante es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento, es decir el suelo que sirve como fundación al asiento directo sobre la cual se coloca la estructura, y que puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, física y química.

El espesor del pavimento sea flexible o rígido dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que esta debe cumplir con los requisitos de resistencia e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, entre otros parámetros.

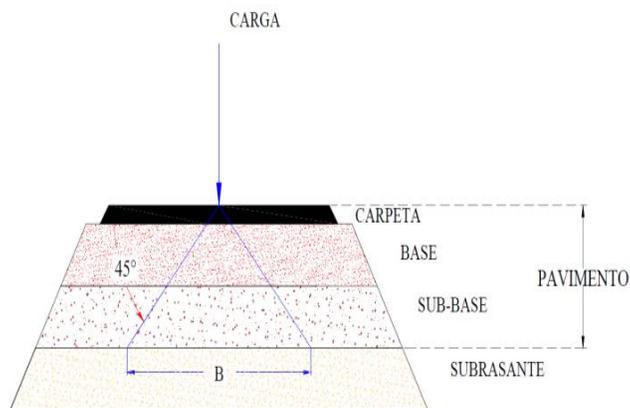
### 2.3.3 FUNCIONES DE LA SUBRASANTE

Las principales funciones de la capa subrasante son:

- Recibir y resistir las cargas del tránsito que le son transmitidas por el pavimento
- Transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén

Estas dos funciones son estructurales

**Figura 2.12** Transmisión de cargas en capas inferiores



*Fuente: “Subrasante características”, proyecto para el camino Cap.III*

### 2.3.4 CLASIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE

La clasificación de la subrasante de acuerdo al porcentaje de CBR del suelo, está representado en el siguiente cuadro.

**Cuadro 2.6 Clasificación de la subrasante**

C.B.R.	CLASIFICACION
0 - 5	Subrasante muy mala
5 - 10	Subrasante mala
11 - 20	Subrasante regular o buena
21 - 30	Subrasante muy buena
31 - 50	Subbase buena
51 - 80	Base buena
81 - 100	Base muy buena

*Fuente: “Vías de comunicación”, Ing. Carlos Crespo Villalaz, Tercera edición*

### 2.3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA SUBRASANTE

#### 2.3.5.1 Registros de excavación

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

Dependiendo de la forma de obtención, pueden clasificarse de forma general en dos tipos:

- **Muestras alteradas:** Una muestra alterada se define como aquella ha sufrido una alteración tal que ha perdido la estructura de las propiedades del terreno en su estado natural.
- **Muestras inalteradas:** Son aquellas muestras obtenidas en las cuales es posible preservar la estructura natural del terreno "in situ".

### 2.3.5.2 Métodos para estudios de superficies

Los métodos más usados para los estudios de superficie que conducen al reconocimiento del perfil estratigráfico son:

#### **Las calicatas**

Las calicatas, zanjas, rozas, pozos, etc., consisten en excavaciones realizadas mediante medios mecánicos convencionales, que permiten la observación directa del terreno a cierta profundidad, así como la toma de muestras y la realización de ensayos en campo. Las calicatas son uno de los métodos más empleados en el reconocimiento superficial del terreno, y dado su bajo coste y rapidez de realización, constituyen un elemento habitual en cualquier tipo de investigación en el terreno. Sin embargo, cuentan con las siguientes limitaciones:

- La profundidad no suele exceder de 4m
- La presencia de agua limita su utilidad.
- El terreno debe poderse excavar con medios mecánicos.

#### **Los sondeos**

Este método de exploración debe usarse en aquellos casos en que el reconocimiento del perfil estratigráfico necesario que se deberá estudiar, no pueda ser realizado mediante calicatas, ya sea porque se requiere reconocer el perfil en una profundidad importante, o bien por presencia de agua.

Los suelos finos, exentos de gravas, pueden ser bien estudiados mediante sondeo.

El tamaño y tipo de la muestra requerida depende de los ensayos que se vayan a efectuar y del porcentaje de partículas gruesas en la muestra, y del equipo de ensayo a ser usado. Con las muestras obtenidas en la forma descrita, se efectuarán ensayos en laboratorio y finalmente con los datos obtenidos se pasará a la fase de gabinete, para consignar en forma gráfica y escrita los resultados obtenidos.

### 2.3.5.3 Muestras de suelo por cuarteo manual

Mediante este procedimiento se puede dividir las muestras de suelos obtenidas en el campo, para obtener proporciones que sean representativas y que tengan los tamaños

adecuados para los diferentes ensayos que se necesita desarrollar.

Se coloca la muestra traída de campo, sobre una superficie dura, limpia y nivelada, donde no se pierda ni se adicione material, Luego dividir en 4 partes, de las cuales se guarda 1, volver a mezclar y repetir el cuarteo hasta llegar al tamaño final indicado. Embolsar e identificar.

### 2.3.5.3.1 Selección del método

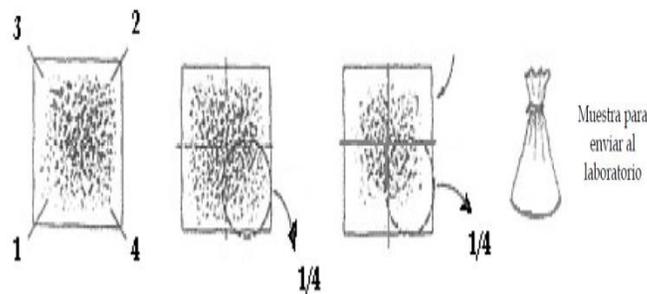
Dentro de los procedimientos para la preparación de muestras por cuarteo, se aplican los siguientes métodos:

Método A.- Cuarteo manual sobre muestras que pesan más de 10 kg, que se encuentran relativamente secas.

Método B.- Cuarteo manual sobre muestras que pesan menos de 10 kg.

Método C.- Utilizando los cuarteadores mecánicos cuando se trata de muestras que están más secas que la condición de "saturadas superficialmente secas"; o muestras de agregados que previamente al cuarteo se secan a temperaturas inferiores a las establecidas para los ensayos a que se someterán.

**Figura 2.13 Procedimiento por cuarteo manual**



*Fuente: "Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos", Juan Carlos Hernández canales*

Una vez realizado la obtención de la muestra por cuarteo se realiza la caracterización del suelo a nivel de subrasante mediante los ensayos mencionados en el punto de propiedades físicas y mecánicas del suelo.

## **2.4 ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE**

### **2.4.1 INTRODUCCIÓN**

La estabilización de un suelo es el proceso mediante el cual, se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos mejorar las propiedades físicas de un suelo de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, obteniéndose una capa de asiento estable y durable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.

El principal fin de la estabilización es aumentar la resistencia mecánica, haciendo que el suelo presente mayor trabazón entre partículas y asegurando que las condiciones de humedad del suelo varié dentro de los rangos adecuados, con esto se lograra tres objetivos importantes: adecuada estabilidad ante las cargas, durabilidad de la capa y una variación volumétrica mínima

La estabilización del suelo también es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien disminuir su índice de plasticidad.

### **2.4.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LA SUBRASANTE**

#### **2.4.2.1 Tipo de suelo y sus propiedades**

La mayoría de los tipos de suelos se analizan a partir de su clasificación en sistemas de uso general que se basan en la textura y la plasticidad, el tamaño y la distribución granulométrica de sus partículas, propiedades que tienen una influencia significativa en el comportamiento de los suelos bajo carga.

#### **2.4.2.2 Humedad y densidad**

Influyen en la resistencia y en el comportamiento bajo carga repetida de los suelos de

la subrasante. Durante la construcción, los suelos de subrasante pueden ser compactados a una densidad y humedad específicas, que permiten establecer valores de resistencia para el diseño del pavimento. Sin embargo, tanto el contenido de humedad como la densidad pueden cambiar durante la construcción o después de ella.

### **2.4.3 PROPIEDADES A MEJORAR EN LA SUBRASANTE CON LA ESTABILIZACIÓN**

Las propiedades a mejorar son:

#### **2.4.3.1 Resistencia**

Esta propiedad se refiere a la capacidad que tiene el suelo de soportar cargas continuas o de tráfico, para no sufrir fallas y deformaciones inadmisibles en su estructura.

El incremento de resistencia aumenta la estabilidad y la capacidad de carga, en general, todas las formas de estabilización química revisadas anteriormente, pueden mejorar en mayor o menor grado la resistencia del suelo; pero mucho depende de la cantidad de materia orgánica que contiene el mismo, ya que el efecto de la materia orgánica en el suelo estabilizado por medios químicos, reduce la reacción con el aditivo empleado y disminuye considerablemente la resistencia normalmente adquirida.

#### **2.4.3.2 Plasticidad**

La plasticidad del suelo está relacionada con el concepto de límites de Atterberg, el cual es muy conocido en la mecánica de suelos. Estos parámetros relacionan la capacidad que tiene el suelo cohesivo para adsorber agua sobre la superficie de sus partículas, ya que cuanto mayor es la cantidad de agua que contiene un suelo, menor es la interacción entre sus partículas adyacentes y más se aproxima el suelo en su comportamiento al de un material líquido; por lo tanto, una alteración en los valores de estos límites indicara una modificación del agua adsorbida por el suelo.

Diversos autores han demostrado que puede lograrse un cambio de los límites de Atterberg, modificando químicamente la capacidad del mineral de arcilla para captar las moléculas de agua. En ese sentido, la estabilización química se ha usado con gran eficacia para modificar esta propiedad.

#### 2.4.3.3 Estabilidad del volumen

La expresión se refiere por lo general a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad, proporciona el control de los procesos de hinchamiento-colapso causados por la variación de humedad.

Cuando un suelo saturado se seca, éste disminuye de volumen visiblemente, fenómeno al cual se denomina comúnmente como retracción. Esta pérdida de volumen se debe a la desecación ocurrida en el suelo, que provoca una modificación en la tensión capilar del menisco formado en cada poro de la superficie.

#### 2.4.3.4 Durabilidad

Se entiende por durabilidad, a la propiedad que tiene el suelo de mantener las propiedades mecánicas en el tiempo y ofrecer resistencia al intemperismo, la erosión o abrasión del tráfico.

Esta propiedad suele estar muy relacionada con los suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento y puede afectar tanto a los suelos naturales como a los materiales estabilizados, por ello, es importante el tratamiento adecuado de la misma para alcanzar una buena estabilización del suelo analizado.

La forma de estabilización más empleada para elevar la durabilidad del suelo es la estabilización química; sin embargo debemos aclarar que esta técnica en algunos casos ha tenido malos resultados a consecuencia de diseños inadecuados, y también a una mala elección del agente estabilizador, o un serio error en su uso. Por ello, es importante recalcar la importancia de la investigación de los materiales estabilizados antes de la aplicación de cualquier sistema de mejoramiento de suelos.

#### 2.4.3.5 Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad que indica la mayor o menor facilidad que tiene el agua de fluir a través de los vacíos del suelo, estando sujeta a un gradiente hidráulico determinado. Esta propiedad depende de una serie de factores y propiedades físicas del suelo, algunas de ellas como la temperatura, viscosidad del agua, el tamaño, la forma

y el área de los conductos a través de los cuales circula el agua, son factores determinantes en esta propiedad.

La reducción de la permeabilidad y por lo tanto de la circulación de agua, mejora la estabilidad.

Los métodos de estabilización tales como la compactación y el uso de algunas sustancias químicas, pueden modificar significativamente la permeabilidad.

## **2.4.4 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EN SUBRASANTES**

### **2.4.4.1 Estabilización física**

Se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo.

#### **2.4.4.1.1 Estabilización por combinación de suelos**

La estabilización por combinación de suelos considera la combinación o mezcla de los materiales del suelo existente con materiales de préstamo.

Para obtener un nuevo material de mayor calidad y que cumpla con las exigencias deseadas, como la disminución de la plasticidad y el aumento de resistencia y trabajabilidad.

#### **2.4.4.1.2 Estabilización por sustitución del suelo**

Cuando se prevea la construcción de la subrasante mejorada solamente con material adicionado, pueden presentarse dos situaciones, sea que la capa se construya directamente sobre el suelo natural existente o que éste deba ser excavado previamente y reemplazado por el material de adición.

### **2.4.4.2 Estabilización química**

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas, dentro de este grupo de estabilización las más comunes son: cal y cemento

#### 2.4.4.2.1 Estabilización con cal

El suelo-cal se obtiene por mezcla íntima de suelo, cal y agua. La cal que se utiliza es Óxido cálcico (cal anhidra o cal viva).

Los suelos más apropiados para estabilizar con cal son los de granulometría fina de cierta plasticidad.

En cortes e incluso en terraplenes, donde se evidencien suelos finos, resulta conveniente mejorar el suelo con un pequeño porcentaje de cal para proteger la explanación y formar una plataforma para la construcción de la capa de rodadura. Al mezclar el suelo con cal éste se vuelve más friable y granular. Al aumentar su límite plástico y humedad óptima de compactación permite su puesta en obra con mayor facilidad.

La efectividad de los agentes estabilizadores debe cumplir con lo indicado en el siguiente cuadro:

**Cuadro 2.7 Aditivo estabilizador según el tipo de suelo**

TIPO DE SUELO	Arcillas Finas	Arcillas Gruesas	Limos finos	Limos Gruesos	Arenas Finas	Arenas Gruesas
Tamaño de partícula (mm)	< 0,0006	0,0006 - 0,002	0,002 - 0,01	0,01 - 0,06	0,06 - 0,4	0,4 - 2,0
Estabilidad volumétrica	Muy pobre	Regular	Regular	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
CAL	SI	SI	SI			
CEMENTO	NO	NO	NO	NO	SI	SI
ASFALTO					SI	SI

*Fuente: norma técnica CE.020, estabilización de suelos y taludes*

#### 2.4.4.2.1 Ventajas del uso de cal como estabilizador en suelos finos

El tratamiento de suelos finos con cal permite obtener una serie de ventajas técnicas y económicas que se citan a continuación.

- a) El empleo de la cal incrementa la capacidad portante de los suelos aumentando su CBR.
- b) Otra ventaja muy importante de la estabilización con cal frente al empleo de otros conglomerantes, es que no presenta un fraguado rápido, lo cual permite una gran flexibilidad en la organización de las distintas fases de ejecución: extendido, mezclado y compactado.
- c) Permite consistencia estable de los suelos bajo el efecto de las lluvias prolongadas.
- d) Favorece al secado de los suelos muy húmedos.
- e) Reduce la plasticidad.
- f) Beneficia la compactación de los suelos con humedades muy altas.
- h) Reducción de cambios volumétricos (expansión).

#### 2.4.4.2.2 Estabilización con cemento

El material llamado suelo-cemento se obtiene por la mezcla íntima de un suelo suficientemente disgregado con cemento, agua y otras eventuales adiciones, seguida de una compactación y un curado adecuados. De esta forma, el material suelto se convierte en otro endurecido, mucho más resistente a corto plazo, mejora su durabilidad y permite su mejor aprovechamiento.

#### 2.4.4.3 Estabilización mecánica

Con la Estabilización Mecánica de Suelos se pretende mejorar el material del suelo existente, sin cambiar la estructura y composición básica del mismo.

Como herramienta para lograr este tipo de estabilización se utiliza la compactación, con la cual se reduce el volumen de vacíos presentes en el suelo.

## 2.4.5 PROCEDIMIENTO GENERAL DE CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTABILIZACIÓN PUESTA EN OBRA

La forma general de ejecutar una estabilización consiste principalmente en realizar los pasos básicos mencionados en los siguientes párrafos. Estos pasos de construcción se muestran gráficamente en la Figura 2.14

**Figura 2.14 Procedimiento de construcción de la estabilización**



*Fuente: Guía para la estabilización de rutas no pavimentadas, Ing. Fabián Elizondo Arrieta*

Como primer paso la distribución y regulación homogénea del suelo deberá ser ejecutada mediante la motoniveladora y su disgregación utilizando el equipo pulvemixer.

La distribución del material estabilizante se ejecuta mediante la colocación correctatomado en cuenta el porcentaje óptimo de material para su estabilización según la especificación técnica optado para el proyecto.

La mezcla y homogeneización de suelo-estabilizante será realizado con el pulvemixer hasta que la mezcla presente coloración uniforme demostrando la homogeneización en todo el espesor de la capa.

La operación de compactación deberá realizarse de manera que la plataforma en ejecución sea uniformemente compactada en todo su ancho de la vía.

Después de concluir la compactación, se realizara la conformación final de la superficie, para cumplir con los requerimientos geométricos del proyecto, mediante la eliminación de relieves con el empleo de la motoniveladora

La capa concluida de acuerdo con la especificación deberá ser sometida a un procedimiento de curado, debiendo para este fin ser protegida contra la pérdida rápida de humedad durante un periodo de siete días, el curado se realizara mediante la imprimación en la superficie de la capa con material bituminoso a razón de 0.6 -1.2 lt/m<sup>2</sup> o asfaltos emulsificador de rotura lenta con una cantidad típica de emulsión que varía entre 0.3 – 0.9 lt/m<sup>2</sup>.

La imprimación se aplica sobre la superficie perfectamente limpia y exenta de materiales extraños. Los caminos terminados pueden ser abiertos al tráfico transcurriendo el periodo de curado.

#### **2.4.6 RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTABILIZACIÓN PUESTA EN OBRA**

La operación de homogeneización deberá ser ejecutada lo más rápido posible con el objetivo de evitar pérdida de cal debido al viento.

Ningún equipo, excepto el usado para la distribución, podrá transitar sobre la cal dispersada antes de que ella sea mezclada al suelo.

El equipo de compactación deberá tener dimensiones, forma y peso adecuado de modo que permita obtener la densidad requerida para la mezcla.

La superficie de la capa deberá ser compactada y conformada hasta que se muestre lisa y exenta de partes sueltas o surcos.

Con los suelos finos deben emplearse preferentemente rodillos de pata de cabra y compactadoras de neumático.

## MARCO NORMATIVO

El presente proyecto se realiza bajo las siguientes normas:

Norma AASHTO (American Association of State Highway and Transport Oficial).

Norma ASTM (American Society for Testing and Materials)

Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la A.B.C.

Manual de ensayos de suelos y materiales, volumen 4 de la A.B.C.

## MARCO REFERENCIAL

Lista de las zonas con sus respectivos barrios que entrarán a ser parte de la mancha urbana de la ciudad de Tarija, Información proporcionado por ordenamiento territorial de la ciudad de Tarija.

**GOBIERNO AUTONOMO MUNICIPAL  
DE LA CIUDAD DE TARIJA Y LA PROVINCIA CERCADO**  
DIRECCION GENERAL DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL

**TARIJA  
CAPITAL**

**INFORME TÉCNICO PER-B6-EU-07-2016**

**A:** UNIV. DAVID CALLIZAYA MARTINEZ  
**INTERESADO**

**VÍA:** ARQ. WILSON SANTIAGO ARMELLA CHARA  
**JEFE - UNIDAD DE PLANIMETRÍAS ESPECIALES Y REORDENAMIENTOS**  
DR. FABIAN HORACIO RODRIGUEZ VELASCO  
**DIRECTOR GENERAL DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL**

**DE:** ARQ. EDGAR UGARTE FLORES  
**TÉCNICO DE LA DGOT**

**REF:** INFORMACION DE LOS BARRIOS NUEVOS QUE ENTRARAN A LA  
URBANIZACION EN LA CIUDAD DE TARIJA.  
**C.I. 740/2016**

**FECHA:** Tarija, 14 de Marzo del 2016

**ANTECEDENTES**  
- Carta dirigida al Dr. Horacio Rodriguez Velasco, por parte del Univ. David Callizaya Martinez, ingresada en la Unidad de Planimetrías Especiales y Reordenamientos en fecha 07 de Marzo del 2016, la misma que expresa solicitud de información (datos, planos) de los barrios nuevos que entrarán a la urbanización en la ciudad de Tarija.

**ANÁLISIS CONCLUSIVO**  
- El siguiente listado pertenece a los barrios que iniciaron solicitud de planimetría en esta unidad, actualmente se viene trabajando en todos ellos mediante el análisis técnico y legal de la documentación presentada por cada uno de los mismos:

ZONA	BARRIO	ZONA	BARRIO
TURUMAYO	LOS TAJIBOS	PAMPA GALANA	TARIJENOS EN PROCESO
	14 DE ENERO		C.M.L.E. (ORG. MUJERES LUIS ESPINAL)
	EL PRADO		SANTA ROSA
	LA MONTES		VALLE HERMOSO
BARRANCAS	26 DE AGOSTO (PRIVADO)	TORRECIllAS	MONTE CRISTO
	26 DE AGOSTO II		JUANA AZURDUY DE PADILLA
	3 DE OCTUBRE		TRO DE ABRIL
	UNIDAD Y FORTALEZA		COBACON DE JESUS
	LAS BARRANCAS		INDEPENDENCIA 4 DE JULIO
	7 DE OCTUBRE		ASOCIACION JUSTO JUEZ
	NUEVA ESPERANZA		MONTE SUD
26 DE AGOSTO	MONTE REY		
TARIJA NUEVA	LA HUERTA		
ALTO 15 DE JUNIO II	CASA VIEJA		
CHAPACOS II	EUCALIPTOS		
EL PORTILLO	PORTILLO JARDIN		

Es lo que se informa para fines consiguientes.

Arq. Edgar Ugarte Flores  
Técnico de la DGOT

Arq. Wilson Armella Chara  
Jefe - Unidad de Planimetrías Especiales y Reordenamientos

Dr. Fabián Horacio Rodríguez V.  
Director de la DGOT

Nota: se adjunta imágenes impresas para mayor referencia.

"CONSTRUYENDO TARIJA"  
Tel: (091) 66-43208 - 99  
Fax: 81  
de territorial

Banda, Mercado San Martín / 1er Piso  
Bolivia

## ANTECEDENTES

El acelerado crecimiento de la ciudad obliga a buscar soluciones para que no se cree el caos y el mismo sea acorde a un ordenamiento territorial.

El Gobierno nacional promulgó en julio de 2012 la Ley 247 de Regularización del Derecho Propietario, norma que instruye a todos los municipios establecer los nuevos trazos de sus perímetros urbanos.

El director de Ordenamiento Territorial de la Alcaldía de Cercado, Horacio Rodríguez, informó que la mancha urbana de la capital de Tarija se extenderá en más de 2.000 hectáreas.

Actualmente la mancha urbana en la ciudad de Tarija es de cerca de 8.000 hectáreas y vamos a llegar a más de 10.000 hectáreas con la ampliación.

El área urbana está estructurada en función a trece distritos y ochenta y tres barrios, cada uno con características propias. El proceso de urbanización se ha dado de forma muy acelerada a partir del año 2000. A la fecha los distritos de mayor densificación son del 1 al 9, de los cuales los cinco primeros del centro de la ciudad han logrado una ocupación del 100%, tal como muestra la figura 1 en Anexos I

El crecimiento de la mancha se ha expandido de manera espontánea sin el acompañamiento de una norma urbanística actualizada, otro factor determinante es el gran flujo migratorio para el cual la ciudad no estaba ni está preparada.

Como se puede observar en la Figura 2 en Anexo I, en el año 1967 la mancha urbana cubría un territorio de 237 Has y había una población de 27.221 habitantes localizados en 4 barrios (El Molino, San Roque, Las Panosas y La Pampa).

A partir de la década de los 70 se inicia una fuerte migración del norte del país hacia el valle tarijeño; ante lo cual, se elabora el “Plan de Desarrollo Urbano de Tarija y su Área de Influencia”, pero en la década de los 90 dicho Plan queda rebasado por la constante llegada de inmigrantes. En las últimas décadas, Tarija ha vivido profundos cambios que han alterado los rasgos centrales de la tranquila y pequeña ciudad de antes.

**CAPITULO III**  
**RELEVAMINETO DE LA**  
**INFORMACION**

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Una característica que presenta la ciudad de Tarija es que gran parte de ella está constituida por suelos limosos y arcillosos de granulometría muy fina, de plasticidad elevada y con alto potencial de expansión. Estos suelos representan al grupo con características casi similares, los cuales son muy propios de los terrenos suburbanos de la ciudad de Tarija. Además, dichos suelos son los más problemáticos e inadecuados para la construcción de pavimentos y en la construcción de estructuras de vivienda, pero también tales suelos son los más apropiados para la aplicación de una estabilización según la bibliografía existente, razón por la cual fue hecha su selección para su empleo en este proyecto.

Para ello es de gran importancia obtener muestras que puedan representar adecuadamente a la zona de estudio.

En cuanto al relevamiento podemos establecer que se desarrollará en dos etapas, la primera etapa de campo y la segunda etapa de laboratorio y gabinete.

La primera etapa consiste en reconocer en campo el lugar preciso de donde se extraerá la muestra en la cantidad suficiente para realizar tanto la caracterización como el estudio para ello se debe tener en cuenta la accesibilidad a la zona de donde se extraerá la muestra a una adecuada profundidad establecida en dicho proyecto basado en las normas de construcción de carreteras de Bolivia.

La segunda etapa es realizada en Laboratorio de Suelos y Hormigones de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” y en el laboratorio del servicio departamental de caminos (SE.DE.CA.) de la ciudad de Tarija, donde se realizarán todas las pruebas necesarias para lograr los objetivos propuestos en este en la ejecución de este proyecto, con los materiales y equipos adecuados, para un posterior procesamiento de datos.

## 3.2 IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE PROYECTO

### 3.2.1 Ubicación geográfica del proyecto

El proyecto se realiza en la ciudad de Tarija (provincia Cercado) que constituye la capital del departamento de TARIJA (Bolivia), está ubicado al extremo sur del país.

**Figura 3.1** Ciudad de Tarija



*Fuente: elaboración propia*

## 3.3 EXPLORACIÓN Y MUESTREO

### 3.3.1 Información general del área de estudio

Los terrenos circundantes al área de muestreo presentan una escasa vegetación, Además los suelos que presentan son de naturaleza orgánica e inorgánica y están compuestos principalmente por limos y arcillas. Asimismo los terrenos presentan variación de desnivel y un alto grado de erosión con áreas relativamente planas.

La reacción del suelo con la mezclasuelo-cal o suelo-suelo granular, está influenciada por varios factores, principalmente por el tipo de suelo y la mineralogía del mismo. Sin

embargo, también se estableció que puede predecirse una buena reactividad si el suelo presenta un considerable índice plástico, ya que varios autores encontraron que en los suelos de mediana a elevada plasticidad se obtienen cambios significativos en sus propiedades físicas y mecánicas con la adición de cal o con suelo granular.

### 3.3.2 Ubicación de las zonas de estudio

Para ubicar las zonas de estudio de dicho proyecto se basa en el número y su localización de los nuevos barrios en proceso de formar parte de la mancha urbana de la ciudad, cuya información fue proporcionada por ORDENAMIENTO TERRITORIAL de la ciudad de Tarija.

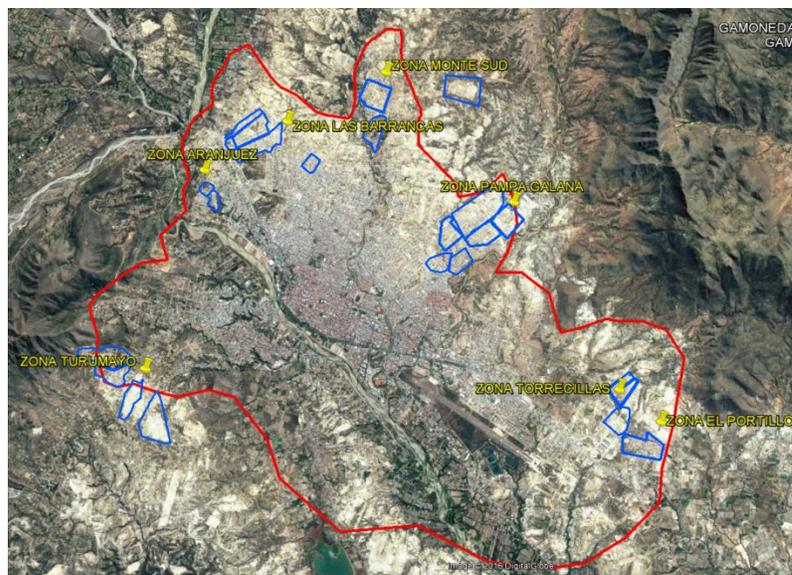
Los barrios nuevos con solicitud de urbanización son los siguientes:

- |                           |                              |
|---------------------------|------------------------------|
| 1) Los Tajibos            | 16) Tarijeños en Progreso    |
| 2) 14 de Enero            | 17) O.M.L.E                  |
| 3) El Prado               | 18) Santa Rosa               |
| 4) Los Montes             | 19) Valle Hermoso            |
| 5) 26 de Agosto (privado) | 20) Monte Cristo             |
| 6) 26 de Agosto II        | 21) Juana Azurduy de Padilla |
| 7) 3 de Octubre           | 22) 1ro de Abril             |
| 8) Unidad y Fortaleza     | 23) Corazón de Jesús         |
| 9) 7 de Octubre           | 24) Independencia 4 de Julio |
| 10) Nueva Esperanza       | 25) Asociación Justo Juez    |
| 11) 26 de Agosto          | 26) Monte Sud                |
| 12) Tarija Nueva          | 27) Monte Rey                |
| 13) Alto 15 de Junio II   | 28) La Huerta                |
| 14) Chapacos II           | 29) Casa Vieja               |
| 15) Portillo Jardín       | 30) Eucaliptos               |

### 3.3.3 Obtención de la muestra

La muestra se considera el total de los barrios nuevos a formar parte de la mancha urbana y así poder obtener una muestra representativa de toda la zona en estudio.

**Figura 3.2 Ubicación de los barrios en cada zona de la ciudad**



*Fuente. Elaboración propia*

La ubicación de los barrios en cada punto de la ciudad, se encuentra en más detalle en la figura 2, en la parte de anexo I.

### 3.3.4 criterios de muestreo y registro de excavación

Se obtiene la muestra representativa inalterada del suelo para la caracterización física mediante sondeos de pozos a exploración a cielo abierto de cada barrio, a través de perforaciones a 0.80 m de profundidad para evitar que contenga material orgánico y son transportadas cumpliendo las especificaciones del manual de la ABC (sesión suelos) al laboratorio, en donde fueron analizadas mediante pruebas convencionales estandarizadas, necesarias para hacer realidad este proyecto.

El sondeo para la obtención de la muestra se realizara con herramientas ordinarias como ser pico, barreta, pala etc.

**Figura 3.3 Obtención de la muestra de suelo mediante el sondeo**



*Fuente: Elaboración propia*

Para la el estudio de la determinación de la resistencia y control de la expansión se toma como muestra un suelo de características distintas a las identificadas mediante los sondeos y que presenten mayor índice de grupo, ya que es el factor que indica la calidad de la subrasante, por lo cual trabajamos con el tipo de suelo más desfavorable en la zona de estudio.

La muestra se obtiene mediante una calicata a una profundidad de 1 m, aunque en el “manual de ensayos de suelos y materiales, en su sección suelos” indica que la profundidad mínima para el estudio de la subrasante es de 1.5 m, Se asume 1 metro de profundidad debido a que las calles ya se encuentran en su mayoría a nivel de subrasante, están en un proceso de aprobación tanto de su planimetría como altimetría.

**Figura 3.4 Obtención de la muestra mediante Calicatas**



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.4 PROCEDENCIA DEL MATERIAL ESTABILIZANTE

#### 3.4.1 Procedencia de la cal

Para la elaboración del proyecto se usa el aditivo de procedencia de las canteras de la zona EL PUENTE aproximadamente 110 Km de la carretera Tarija-Potosí del departamento de Tarija.

**Figura 3.5 Cal hidratada**



*Fuente: Elaboración propia*

#### 3.4.2 Procedencia del suelo granular

El banco de extracción del material se ubica en la zona de monte sud, siendo este banco muy cercano a la ciudad lo cual favorece en el costo de su debido transporte a las zonas de aplicación.

**Figura 3.6 Ubicación del banco de suelo granular**



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.5 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE LA SUBRASANTE MEJORADA

Los suelos empleados en la ejecución de la capa desubrasante mejorada deben presentar las siguientes características indicado en el manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC.

- 1)  $CBR \geq 20 \%$  se asume  $CBR = 20$  para el diseño de una subrasante muy buena
- 2) Expansión  $< 2\%$

### 3.6 ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Todas las muestras fueron extraídas del área de estudio y transportadas cumpliendo las especificaciones del manual de la ABC (sesión suelos) al laboratorio de suelos y hormigones de la U.A.J.M.S., en donde fueron analizadas mediante pruebas convencionales estandarizadas, necesarias para hacer realidad este proyecto.

#### 3.6.1 Muestras de suelo por cuarteo manual

Mediante este procedimiento se dividió las muestras de suelos obtenidas en el campo, para obtener proporciones que sean representativas y que tengan los tamaños adecuados para los diferentes ensayos que se necesita desarrollar.

**Figura 3.7 Cuarteo manual de las muestras**



*Fuente: elaboración propia*

Se colocó la muestra de estudio, sobre una bandeja donde no se pierda ni se adicione material, Luego dividir en 4 partes, de las cuales se guarda 1, volver a mezclar y repetir el cuarteo hasta llegar al tamaño final indicado, embolsar e identificar.

### 3.6.2 Caracterización física

**Cuadro 3.1** Caracterización física del suelo

<b>CARACTERIZACIÓN</b>	<b>ENSAYO</b>	<b>NORMATIVA</b>
<b>FÍSICA</b>	Contenido de humedad	ASTM D2216
	Determinación del peso específico relativo de los suelos	AASHTO T100
	Análisis granulométrico	AASHTO T88
	Análisis granulométrico por hidrómetro	ASTM D422
	Determinación del límite líquido	AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	AASHTO T90

*Fuente: Elaboración propia.*

La obtención del contenido de humedad se realiza por el método de horno, siendo el método más confiable para la obtención de estos resultados.

El análisis granulométrico se realiza por el método del lavado, ya que las muestras en estudio presentan características de suelo fino, siendo este método el más recomendable a ser utilizado para este ensayo.

La determinación del límite líquido se obtiene mediante la ecuación logarítmica determinada de la gráfica de porcentaje de humedad vs. Numero de golpes.

El número de golpes en del límite líquido se determina dentro de un rango de 15 a 35 golpes para tener una mayor precisión para la elaboración de la gráfica.

### 3.6.3 Caracterización mecánica

**Cuadro 3.2 Caracterización mecánica del suelo natural**

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
<b>Mecánica</b>	Ensayo de compactación (Proctor estándar T -99) (Proctor modificado T -180)	AASHTO T272
	Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	AASHTO T193

*Fuente: Elaboración propia.*

La compactación en laboratorio es realizada con el equipo de Proctor Estándar T-99 para suelos finos y Proctor modificado T-180 para el suelo granular de banco, cada método se realiza con sus respectivas especificaciones ya citadas en el capítulo II.

Los resultados de C.B.R. que se utilizan son correspondiente al 95% de la densidad seca máxima del ensayo de compactación

### 3.6.4 Caracterización química

**Cuadro 3.3 Caracterización química del suelo natural**

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
<b>Químico</b>	Determinación del PH	ASTM G51

*Fuente: Elaboración propia*

La determinación de PH se realiza de los suelos naturales y de la cal hidratada.

### 3.6.5 Preparación de la mezcla suelo-cal

La dosificación utilizada para este trabajo es de 2% ,4% y 6 % de cal referido siempre al peso del suelo seco ya que en este rango mediante estudios se comprueba el porcentaje adecuado para la estabilización, estos valores son asumidos según la sugerencia que propone el manual de estabilización de suelo tratado con cal (La Asociación Nacional de Cal, publicado en 1965).

**Figura 3.8** Mezcla suelo-cal



*Fuente: elaboración propia*

### **3.6.6 Preparación de la mezcla suelo-suelo granular**

En este método se lo introduce en porcentajes de 40%, 60% y 80% al suelo natural para poder obtener el porcentaje óptimo que cumpla con las condiciones de diseño de la subrasante, tomando estos porcentajes en base a la referencia del proyecto de grado de “Análisis de alternativas de estabilización de la subrasante para la zona del barrio el constructor” de autor Pedro Fernando López Martínez.

**Figura 3.9** Mezcla suelo- suelo granular



*Fuente: elaboración propia*

### 3.7 PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Es importante hacer notar que para la caracterización tanto del suelo solo, como la del suelo- cal son los mismos ensayos, con los procedimientos establecidos en el manual de ensayos de suelos y materiales de la A.B.C.

#### 3.7.1 Contenido de Humedad

Consiste en obtener una muestra húmeda representativa del material obtenido en campo con las condiciones adecuadas de extracción y transporte al laboratorio, colocarlo la muestra de suelo en un recipiente (mejor si tiene tapa), pesar el recipiente vacío y luego el recipiente más la muestra húmeda obteniendo así un peso del material más el recipiente, luego llevarla al horno a temperatura  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) en la mayoría de los casos, el secado de una muestra durante la noche (16 horas), es suficiente, sacar del horno y pesar nuevamente el material, obteniendo un peso seco del material más el recipiente, si obtiene el porcentaje de humedad dentro de un suelo en su estado natural mediante la ecuación (2.4) mencionado en el capítulo II del presente proyecto.

**Figura 3.10** Taras con la muestra de suelo



*Fuente: elaboración propia*

### 3.7.2 Determinación del Peso Específico de los Suelos

Este ensayo se realiza en dos etapas la primera etapa consiste en la calibración del frasco y la segunda el ensayo con la muestra de suelo.

#### Calibración del frasco

Primero se debe lavar el frasco con agua jabonosa y luego enjuagar con agua hasta eliminar el jabón, para luego enjuagar con jabón para eliminar los restos de agua.

Posteriormente limpiar y secar el frasco y determinar su peso luego, llenar el frasco con agua hasta la mitad de su volumen, para posteriormente introducir el frasco en un baño maría y someterlo al incremento del calor. El baño maría se aplica hasta que la temperatura dentro del frasco esté alrededor de los 60 °C, sacar el frasco del baño maría y complementar el agua a temperatura ambiente hasta 5 mm de la marca de enrase.

En este punto leer la temperatura tratando de que el termómetro se introduzca al centro del frasco, luego llenar agua con una pipeta hasta la parte inferior del menisco que coincida con la marca de enrase.

Pesar el frasco con el agua hasta el enrase y anotar este dato, para bajar la temperatura del agua, se debe hacer enfriar el frasco en baño maría frío. Posteriormente realizar cinco pesadas del frasco con agua a cinco diferentes temperaturas entre los rangos de 15 a 30°C manteniendo siempre la parte inferior del menisco en la marca de enrase y el termómetro en el centro del frasco.

#### Peso específico de la muestra de suelo

El peso específico relativo se determina mediante la siguiente ecuación (2.7):

$$\gamma = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}}$$

Donde:

$\gamma$  = peso específico relativo del suelo

$W_s$ = peso del suelo seco

$W_{fw}$ = peso del frasco lleno de agua

$W_{fsw}$ = el peso del frasco con suelo y agua

El peso del frasco lleno de agua hasta el enrase es función de la temperatura de prueba, este valor generalmente se extrae de la curva de calibración. Luego de calculados los pesos específicos se debe ajustar estos datos a una temperatura patrón de 20 °C, cuya densidad de agua es: 0,99791

Para realizar el ensayo se debe limpiar y secar el frasco calibrado, pesar 80 gramos de muestra de suelo con una humedad natural, luego colocar el suelo en un plato, añadir agua y mezclar hasta formar una pasta suave.

Colocar dentro del frasco la pasta y batir hasta que se forme una suspensión uniforme, se debe extraer todo el aire atrapado dentro de los suelos,. Para ello se debe mover el frasco con mucho cuidado, someter el frasco con agua y suelo a variación de temperatura dentro de un baño maría, hasta que alcance una temperatura de 60 °C, llenar el frasco con agua a temperatura ambiente hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de enrase del frasco. Pesar el frasco y medir la temperatura en el centro del frasco, someter a un enfriamiento el frasco para repetir unas tres veces a diferentes temperaturas en los rangos de 15° a 30°. Posteriormente realizar los cálculos con los datos obtenidos.

### **3.7.3 Análisis Granulométrico por Tamizado Método de Lavado**

Para el análisis granulométrico de los suelos se utilizó el método del lavado, debido a que son suelos finos y así evitar pérdida de material fino al realizar dicha práctica.

Se toma una muestra representativa de 500 gr previamente secado en horno y se dejó reposar en agua hasta que se sature completamente durante 24 hr.

**Figura 3.11** Suelos en proceso de saturación



*Fuente: elaboración propia*

Sin perder material se introduce la muestra en el tamiz N°200 y se realiza el lavado del suelo hasta que el agua pasante toma aspecto más claro.

**Figura 3.12** Lavado del suelo fino



*Fuente: Elaboración propia*

Después es secado la muestra y tamizado nuevamente por las mallas N°40 y N°200 se obtiene los pesos retenidos en cada tamiz para graficar la curva granulométrica en un sistema de coordenadas ortogonales; en las abscisas, a escala logarítmica, se indican las aberturas de los tamices y en las ordenadas, a escala lineal, los valores de los porcentajes que pasan en cada tamiz, obtenidos de acuerdo a lo calculado en porcentaje del retenido en cada tamiz.

### 3.7.4 Análisis Granulométrico por Hidrómetro

El tamaño aproximado de la muestra que se debe usar para el análisis por el hidrómetro varía con el tipo de suelo que va a ser ensayado. La cantidad requerida para suelos arenosos es de 75 a 100 g y para limos y arcillas de 50 a 60 g (Peso seco). El peso exacto de la muestra en suspensión puede ser determinado antes o después del ensayo. Las muestras de estos suelos deben ser conservadas con su contenido de humedad natural, y ensayadas sin ser secadas al horno.

Se debe dejar la muestra en remojo por una noche hasta que los terrones de suelo se hayan desintegrado.

Transferir la muestra con agua, de la cápsula a un vaso de, lavando cualquier residuo que quede en la cápsula con agua destilada o desmineralizada. Agitar el vaso de dispersión durante el tiempo de un minuto.

Se transfiere la suspensión a un cilindro de sedimentación de 1000 ml. La suspensión debe ser llevada a la temperatura que se espera prevalecerá en el laboratorio durante el ensayo.

Un minuto antes de comenzar el ensayo, hay que tomar el cilindro de sedimentación y tapándolo con la mano, agítase la suspensión vigorosamente durante varios segundos, con el objeto de remover los sedimentos del fondo y lograr una suspensión uniforme. Continúese agitando hasta completar un minuto volteando el cilindro hacia arriba y hacia abajo alternativamente. Terminada la agitación colocar sobre una mesa y poner en marcha el cronómetro, si hay espuma sacar con un papel absorbente e introducir el hidrómetro, lentamente teniendo cuidado al introducir y al sacar el hidrómetro de no perturbar la sedimentación, Observar y anotar las dos primeras lecturas de hidrómetro, al minuto, y a los dos minutos después de haber colocado el cilindro sobre la mesa. Estas lecturas deben realizarse en el tope del menisco. Inmediatamente después de realizar la lectura de los 2 minutos, extraer cuidadosamente el hidrómetro de la suspensión y colocar en un cilindro graduado con agua limpia. Si el hidrómetro se deja

mucho tiempo en la suspensión, parte del material que se está asentando se puede adherir al bulbo, causando errores en las lecturas.

### Figura 3.13 Lectura con el hidrómetro



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.7.5 Plasticidad

Obtención del límite líquido y el límite plástico se trabaja con una muestra de 150 gr pasantes por el Tamiz N°40, colocando dentro de un plato se pasa a introducir una cantidad de agua de tal forma se logre formar una pasta de consistencia suave como mantequilla.

La muestra es colocado sobre el equipo de casa grande tratando siempre que esté de forma horizontal, con el ranurador se corta la muestra y se empieza accionar la copa de casa grande al ritmo de dos golpes por segundo midiendo el número de golpes hasta que se produzca una unión de aproximadamente de 1.27 cm, una vez verificado la unido se toma una muestra y se obtiene el contenido de humedad a su respectivo número de golpe para poder graficar la recta de W% vs Numero de golpes (escala logarítmica) y obtener el límite líquido.

**Figura 3.14** Ensayo del límite líquido



*Fuente: Elaboración propia*

El límite plástico es obtenido de la misma muestra utilizado para el LL, se adiciona un poco de suelo para hacer una pasta más seca y formar los rollitos aproximadamente de diámetro de 3 mm sobre una base de vidrio, se obtiene el %W de humedad cuando se observe fisuras en los rollitos.

**Figura 3.15** Fisuras en el rollito de suelo



*Fuente: Elaboración propia*

### **3.7.6 Ensayo de Compactación (ProctorEstandar T-99)**

Se debe preparar el suelo aproximadamente 15 kg, desintegrando los terrones y

grumos hasta que pase el tamiz N° 4, y desechar lo retenido en este tamiz, una vez preparado la muestra se debe calcular su contenido de humedad, antes de compactarlo.

Dividir el materiales en cinco partes iguales de 3000 gramos cada uno, depositar en fuentes y lavadores ya que en cada uno se incrementará agua en diferentes porciones; para suelos cohesivos se recomienda comenzar con un porcentaje de humedad variando entre porcentajes 6% a 17%, para esto se debe aplicar el incremento de la humedad de acuerdo al siguiente ejemplo:

Siendo el contenido de humedad calculado de 2%, para llegar a 4% nos faltaría otro 2%, entonces, pesamos el material para el primer molde por con 3000 gramos. Y asumiendo que en este peso se encontraría al 100% de agua, por lo que se trataría de 3000 cm<sup>3</sup> (ya que la densidad del agua se asume 1gr/cm<sup>3</sup>), por simple regla de tres

Se pesa el molde con la base y sin collarín y se determina su volumen, una vez calculado los porcentajes requeridos de humedad se procede a incrementar tales cantidades de agua al suelo mezclando y homogeneizando la muestra, para luego introducir al molde compuesto con su extensión o collarín, en cinco capas iguales compactando cada capa a 25 golpes.

Una vez completada la compactación se retira el collarín y se enraza con la regla metálica hasta dejar una superficie lisa hasta la altura del molde, luego se pesa el molde con su base con el suelo compactado y enrazado, registrando en la planilla de cálculos. Seguidamente se retira el molde de su base y se extrae tres muestras del corazón del suelo compactado, para determinar el contenido de humedad real del suelo compactado.

Luego de esto, realizar los cálculos y graficar la curva de densidades en el eje de las ordenadas y porcentaje de humedad en el eje de las abscisas, para obtener una ecuación y obtener la humedad óptima que será donde se dé la máxima densidad de compactación.

### **Figura 3.16 Compactación con Protor Estandrar T-99**



*Fuente: elaboración propia*

### **3.7.7 Determinación de la Relación de Soporte del Suelo en Laboratorio (CBR)**

Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como Razón de Soporte de California (CBR) que evalúa la capacidad de soporte de suelos de sub-rasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, bases y capas de rodadura granulares.

El ensayo de esta práctica se realiza tanto del suelo natural como de los suelo con porcentajes de cal en peso para determinar el valor óptimo de estabilización para cada tipo de suelo.

La cantidad de muestra total para el ensayo son de 15 Kg, que son fraccionado en tres partes de 5 kg para realizar la compactación con el contenido de humedad optima y la densidad máxima seca obtenido de acuerdo al Método Protor Estandrar T-99, se compacta 3 moldes en un rango de 90%, 95% y 100% de la densidad máxima seca, es decir que se compacta con niveles de energía de 12 golpes ,25 golpes y 56 golpes,

Para cada molde se coloca el disco espaciador sobre la placa base con papel filtro sobre ella y se procede a compactar el primer molde con cinco capas y con una energía de 12

golpes por cada capa, de igual forma el segundo molde se compacta con una energía de 25 golpes y el tercer molde a 56 golpes.

Para poder observar la variación de volumen del suelo se somete al molde con el suelo compactado a una saturación en un recipiente con agua durante cuatro días para luego poder observar el cambio de volumen con el equipo de extensómetro.

### Figura 3.17 Lectura de las cargas en la prensa hidráulica



*Fuente: elaboración propia*

Luego con los datos procesados y los resultados de éstos, se graficará la curva CARGA vs PENETRACIÓN y DENSIDAD SECA vs C.B.R.

### 3.7.8PH del suelo

Se toma una muestra de 60 gr de cada suelo en su estado natural para luego ser llevadas al laboratorio de química de la U.A.J.M.S. para su respectivo estudio.

## **CAPITULO IV**

# **ANÁLISIS DERESULTADOS**

## 4.1 INTRODUCCIÓN

En esta parte del capítulo se describe el procedimiento de cálculo y se analizan los resultados obtenidos en este proyecto en base a los estudios convencionales y no convencionales realizados en el laboratorio de suelos para realizar conforme a los métodos de estudio de las principales propiedades físicas y mecánicas del suelo natural.

Así como también los resultados obtenidos de la aplicación de los métodos de estabilización que fueron descritos anteriormente y enmarcándose dentro de las limitaciones establecidas en el alcance de trabajo que fue expuesto en el capítulo primero.

## 4.2 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Para el procesamiento de los datos y los respectivos cálculos, todos fueron realizados en gabinete una vez completados los ensayos requeridos según lo plasmados en el Manual técnico para el diseño de carreteras en Bolivia (volumen 4 “Manual de ensayo de suelos y materiales”), todos los cálculos son operaciones matemáticas establecidas en la norma.

Los datos obtenidos fueron de dos maneras: Datos en valores para los cálculos matemáticos y los datos de observación para un análisis y comparaciones del comportamiento del suelo, Todos los datos deben ser los necesarios y los que nos indica la norma.

Concluido con el procesamiento de los datos y toda la información recabada del laboratorio se obtienen los resultados de los diferentes ensayos de caracterización y estudio que se presentan más adelante.

## 4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA MEDIANTE SONDEOS A H= 0.80 M DE

CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO DE LOS BARRIOS												
N°	BARRIO	% DE HUMEDAD	GRANULOMETRÍA			LÍMITES			CLASIF AASHTO	DESCRIPCIÓN		
			N° 10	N° 40	N° 200	LL	LP	IP				
1	Los Tajibos	15,38	99,56	91,48	67,30	25,22	19,68	5,54	A-4 (6)	suelo limoso inorgánico moderadamente plástico		
2	14 de Enero	8,54	99,80	90,70	61,70	22,66	15,60	7,05	A-4 (5)	suelo limoso inorgánico moderadamente plástico		
3	El Prado	10,53	100,00	99,45	98,26	38,7	26,73	11,97	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
4	La Montes	12,87	100,00	99,80	98,84	33,56	19,61	13,95	A-6 (10)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
5	26 de Agosto (Privado)	7,53	100,00	98,62	96,26	33,73	21,40	12,33	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
6	26 de Agosto II	8,46	100,00	95,78	91,9	23,91	15,47	8,45	A - 4 (8)	suelo limoso inorgánico moderadamente plástico		
7	3 de Octubre	8,84	100,00	99,78	99,27	33,15	20,37	12,77	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
8	Unidad y Fortaleza	8,39	100,00	99,30	97,64	36,97	24,84	12,12	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
9	7 de Octubre	12,5	100,00	99,58	91,65	38,35	25,43	12,92	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
10	Nueva Esperanza	10,77	99,67	95,35	68,43	23,60	17,71	5,89	A-4 (7)	suelo limoso inorgánico moderadamente plástico		
11	26 de Agosto	8,56	100,00	99,27	96,40	35,93	23,67	12,26	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
12	Tarija Nueva	9,27	100,00	99,81	95,08	46,56	29,92	16,63	A-7-6 (12)	Arcilla inorgánica de alta plasticidad		
13	Alto 15 de Junio II	12,6	100,00	97,35	91,5	33,09	20,52	12,57	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
14	Chapacos II	9,73	100,00	99,53	98,27	33,04	20,37	12,67	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
15	Portillo Jardín	13,64	99,82	97,05	87,32	30,42	21,34	9,07	A - 4 (8)	suelo limoso inorgánico moderadamente plástico		
16	Corazón de Jesus	12,85	100,00	99,61	96,85	33,54	21,77	11,76	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
17	Independencia 4 Julio	12,76	100,00	99,01	96,48	37,97	22,38	15,58	A - 6 (10)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
18	Asociación Justo Juez	6,28	100,00	99,59	97,46	27,98	18,38	9,61	A - 4 (8)	suelo limoso inorgánico moderadamente plástico		
19	Monte Sud	11,45	100,00	99,64	98,91	33,15	21,87	11,28	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
20	Monte Rey	9,47	100,00	99,56	97,73	34,6	20,1	14,5	A-6 (10)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
21	La Huerta	8,59	99,74	99,25	96,62	31,61	24,4	7,21	A - 4 (8)	suelo limoso inorgánico moderadamente plástico		
22	Eucaliptos	6,94	99,51	96,11	80,14	28,87	23,77	5,10	A - 4 (8)	suelo limoso inorgánico moderadamente plástico		
23	Casa Vieja	15,38	99,56	91,03	58,34	25,56	20,13	5,43	A - 4 (5)	suelo limoso inorgánico moderadamente plástico		
24	Tarijeños en Progreso	10,7	100,00	98,89	94,91	36,83	24,93	11,91	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
25	O.M.L.E	8,94	100,00	99,60	98,8	34,21	23,02	11,19	A-6 (8)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
26	Santa Rosa	7,09	100,00	96,66	91,59	36,00	20,20	15,80	A-6 (10)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
27	Valle Hermoso	8,68	100,00	99,68	98,93	54,59	26,93	27,66	A-7-6 (18)	Arcilla inorgánica de alta plasticidad		
28	Monte Cristo	7,54	100,00	99,58	98,48	56,29	32,34	23,95	A-7-5 (17)	Arcilla inorgánica de alta plasticidad		
29	Juana Azarduy de Padilla	6,51	99,92	97,94	95,37	35,60	22,22	13,38	A-6 (9)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico		
30	1° de Abril	9,13	100,00	99,64	98,81	51,46	29,31	22,15	A-7-6 (15)	Arcilla inorgánica de alta plasticidad		

## LOS BARRIOS

### Cuadro 4.1 Resultados de la caracterización del suelo de los barrios

*Fuente: elaboración propia*

#### Análisis de resultados

Se puede apreciar que el contenido de humedad varía de moderadamente a considerablemente de un lugar de muestreo con respecto a otro, esto debido a que cada zona se encuentra a distintas altitudes y distintas condiciones atmosféricas, ya que en algunos la lluvia puede formar grandes charcos y en otras solo un escurrimiento superficial, el cual es un factor que hace variar la evaporación en el suelo.

Haciendo un análisis de la parte granulométrica se pudo observar que todas las muestras tienen más del 35 % del total que pasan el tamiz 200, el cual nos indica que se tratan de suelos finos de característica limos y arcillas.

#### 4.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICA - MECÁNICA DEL SUELO NATURAL

Una vez obtenido los resultados de la caracterización del suelo de cada barrio, se toma como muestra de suelo a 1m de profundidad del barrio Portillo jardín, Monte Rey, Monte Cristo y Valle Hermoso

##### 4.4.1 Contenido de humedad y peso específico relativo

Se utiliza la ecuación 2.4 descrita en el capítulo II.

### Cuadro 4.2 Resultados de contenido de humedad y peso específico relativo

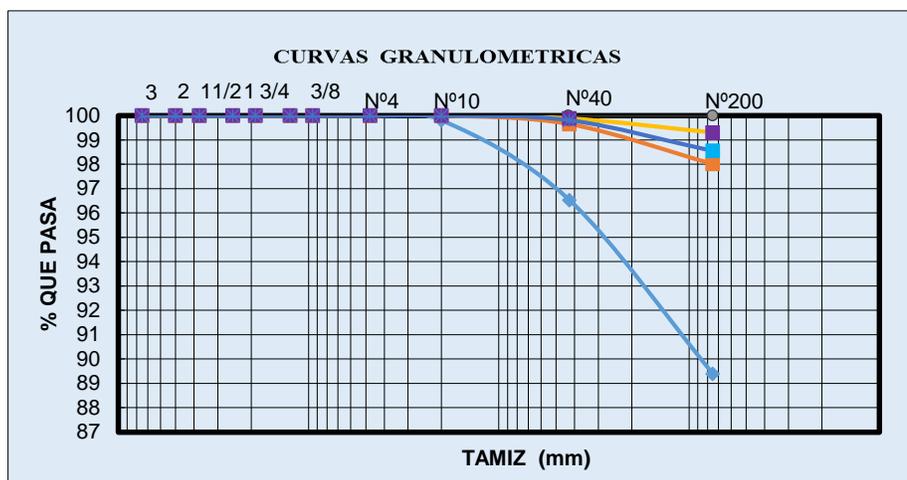
Barrio	CALICATA	W (%)	$\gamma$
Monte Rey	1	8,37	2.72
Valle Hermoso	2	7,59	2.75
Monte Cristo	3	10,54	2.74
Portillo Jardín	4	9.35	2.69

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.4.2 Granulometría

En base a las ecuaciones citadas en el capítulo II se realiza el ensayo granulométrico por el método del lavado al tratarse de suelos finos, dando los siguientes resultados:

Gráfico 4.1 Curvas granulométricas de los cuatro suelos



Fuente: Elaboración propia

- |   |   |
|---|---|
| <span style="color: blue;">■</span> Suelo de Calicata 4   | <span style="color: yellow;">■</span> Suelo de Calicata 3 |
| <span style="color: orange;">■</span> Suelo de Calicata 1 | <span style="color: purple;">■</span> Suelo de Calicata 2 |

#### Análisis de resultados

Observando los resultados comprobamos que los suelos obtenidos mediante el muestreo de calicatas son de naturaleza finos con contenido de limos y arcilla debido a que todos pasan más del 35% del total por el tamiz N°200, utilizando la tabla 1 del Anexo I para la clasificación.

En el gráfico 4.1 se puede observar la característica de cada tipo de suelo, donde el suelo A-4 tiene una cierta amplitud al tener menor porcentaje que pasa el tamiz N°200 debido a que es un suelo limoso a diferencia de los otros suelos, las curvas granulométricas de las arcillas no presentan gran amplitud entre ellas por lo que estos suelos tendrían casi las mismas características granulométricas.

#### 4.4.3 Granulometría por Hidrómetro

Este ensayo es necesario debido a que estamos trabajando con suelos finos y se debe conocer más a detalle de los porcentajes de limo y arcilla presentes en la muestra.

#### Cuadro 4.3 Resultados de práctica del hidrómetro

CALICATA	HIDROMETRO	
	Arcilla (%)	Limo (%)
1	12.15	87.85
2	15.27	84.73
3	15,78	87.22
4	9.14	90.86

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.4 Plasticidad

#### Cuadro 4.4 Resultados de los límites de plasticidad

LIMITES					
Barrio	CALICATA	LL	LP	IP	IG
Monte rey	1	35,95	21,29	14,66	10
Valle hermoso	2	53,68	26,44	27,24	18
Monte cristo	3	57,14	34,33	22,81	17
Portillo jardín	4	25,25	15.52	9.73	8

Fuente: Elaboración propia

#### Análisis de resultados

En este cuadro se observan los resultados de los límites de Atterberg donde se nota la variación de plasticidad de moderada a altamente plásticos de acuerdo a la naturaleza de cada suelo, en las muestras 2 y 3 que son suelos arcillosos se puede verificar que sus índices de plasticidad se encuentran por encima de 17 clasificándolos de plasticidad alta

A diferencia de la muestra 1 y 4 que tienen un índice de plasticidad que entra dentro del rango 7- 17 de clasificación de plasticidad moderada según el cuadro 2.5 del Capítulo II.

#### 4.4.5 Clasificación del suelo

Se usa la tabla 1, indicada en el Anexo I

#### Cuadro 4.5 Resultados de clasificación de los suelos

Barrio	CALICATA	CLASIFICACION	DESCRIPCION
Monte rey	1	A-6(10)	Arcilla inorgánica moderadamente plástico
Valle hermoso	2	A-7-6(18)	Arcilla inorgánica de alta plasticidad
Monte cristo	3	A-7-5(17)	Arcilla inorgánica de alta plasticidad
Portillo jardín	4	A-4(8)	Limo inorgánico moderadamente plástico

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.6 Compactacion

#### Cuadro 4.6 Resultados del ensayo de compactación

SUELO	PROCTOR ESTANDAR T-99	
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	Humedad Óptima (%)
A-7-6(18)	1.70	16.83
A-7-5(17)	1.77	17.23
A-6(10)	1.85	15.04
A-4(8)	1.99	12.39

Fuente: Elaboración propia

#### Análisis de resultados

Se puede observar en los resultados que la densidad máxima correspondiente al suelo limoso A-4 es el más elevado y en los suelos arcillosos hay un descenso de la densidad a partir del suelo A-6(10), el cual indica que a mayor plasticidad que posee el suelo menor es el valor de la densidad máxima respecto a los cuatro suelos estudiados.

Los resultados de humedad optima son valores que se encuentra dentro del rango establecido para de cada tipo de suelo según su característica y que a medida de que el suelo posee más partículas finas fino se puede verificar que requiere mayor cantidad de agua.

#### 4.4.7 Relación de Soporte del Suelo (CBR)

**Cuadro 4.7 Resultados del ensayo de C.B.R. laboratorio**

SUELO	C.B.R. de laboratorio	
	C.B.R (%)	EXP. (%)
A-7-6(18)	1.80	4.91
A-7-5(17)	1.40	4.11
A-6(10)	3.10	3.41
A-4(8)	6.40	2.49

Fuente: Elaboración propia

#### Análisis de resultados

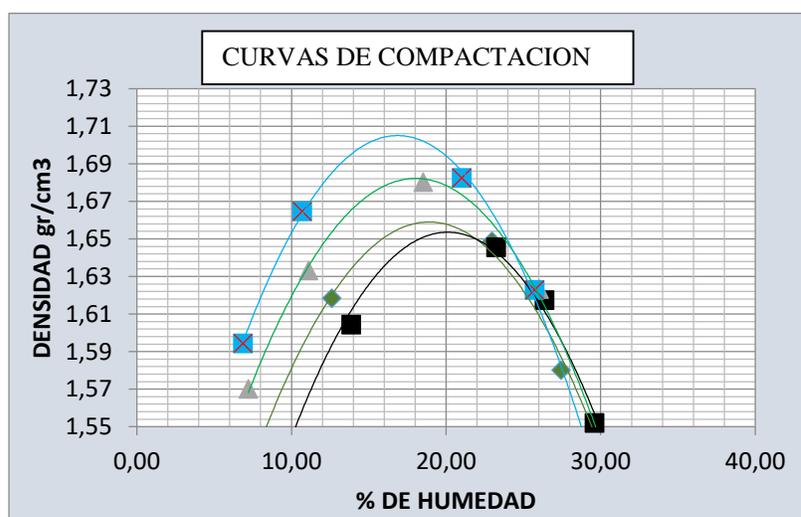
Los suelos tienen baja resistencia para la conformación de la subrasante, de tal modo que necesariamente deben ser mejorados sus propiedades físicas y mecánicas para cumplir con la capacidad portante (CBR) mayor o igual al 20% según la especificación técnica para el proyecto.

### 4.5 MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE SUELO - CAL

#### 4.5.1 Compactación

##### 4.5.1.1 Suelo A-7-6

**Gráfico 4.2 Curvas de compactación con porcentajes de cal –suelo A-7-6**



Fuente: Elaboración propia

- Suelo A-7-6(18) natural
  - Suelo A-7-6(18) al 2% de cal
- Suelo A-7-6(18) al 4% de cal
  - Suelo A-7-6(18) al 6% de cal

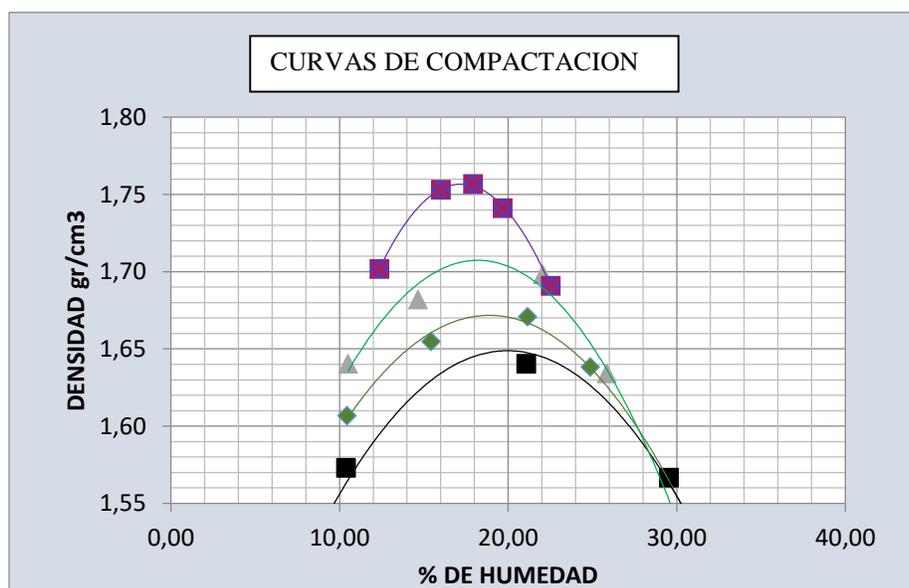
**Cuadro 4.8 Resultados de la humedad óptima y densidad máxima- suelo A-7-6**

SUELO A-7-6(18)		
% DE CAL	C.H.O. (%)	D. MAX (gr/cm <sup>3</sup> )
0	16,83	1,70
2	18,11	1,68
4	18,97	1,66
6	20,12	1,65

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.5.1.2 Suelo A-7-5

**Gráfico 4.3 Curvas de compactación con porcentajes de cal – suelo A-7-5**



- Suelo A-7-5(17) natural
  - Suelo A-7-5(17) al 2% de cal
- Suelo A-7-5(17) al 4% de cal
  - Suelo A-7-5(17) al 6% de cal

*Fuente: Elaboración propia*

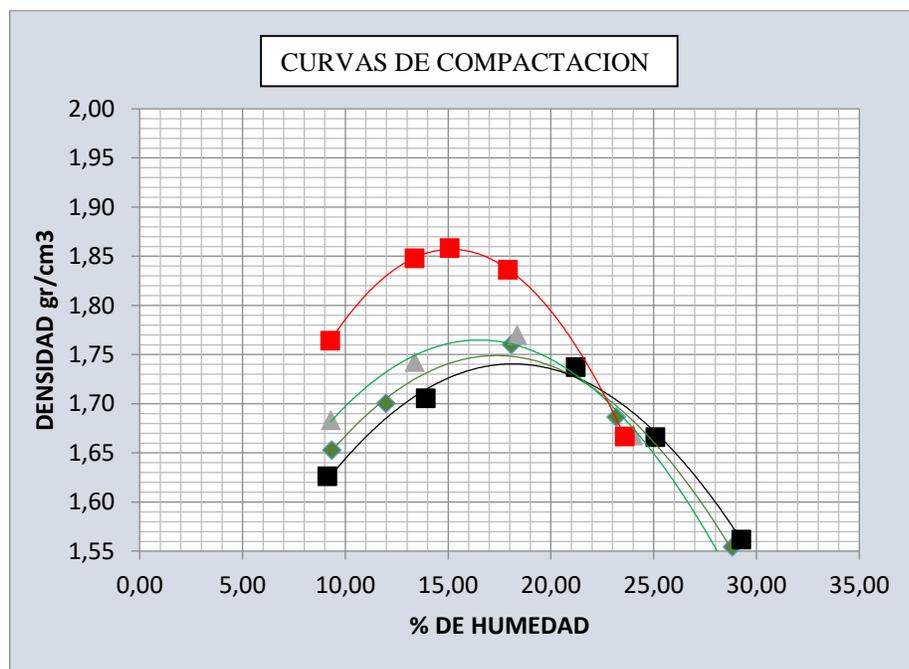
Cuadro 4.9 Resultados de la humedad óptima y densidad máxima-suelo A-7-5

SUELO A-7-5(17)		
% DE CAL	C.H.O. (%)	D. MAX (gr/cm <sup>3</sup> )
0	17,23	1,77
2	18,18	1,71
4	18,93	1,67
6	19,86	1,65

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.1.3 Suelo A-6

Gráfico 4.4 Curvas de compactación con porcentajes de cal – suelo A-6



Fuente: Elaboración propia

- Suelo A - 6(10) natural
- Suelo A - 6(10) al 4% de cal
- Suelo A - 6(10) al 2% de cal
- Suelo A - 6(10) al 6% de cal

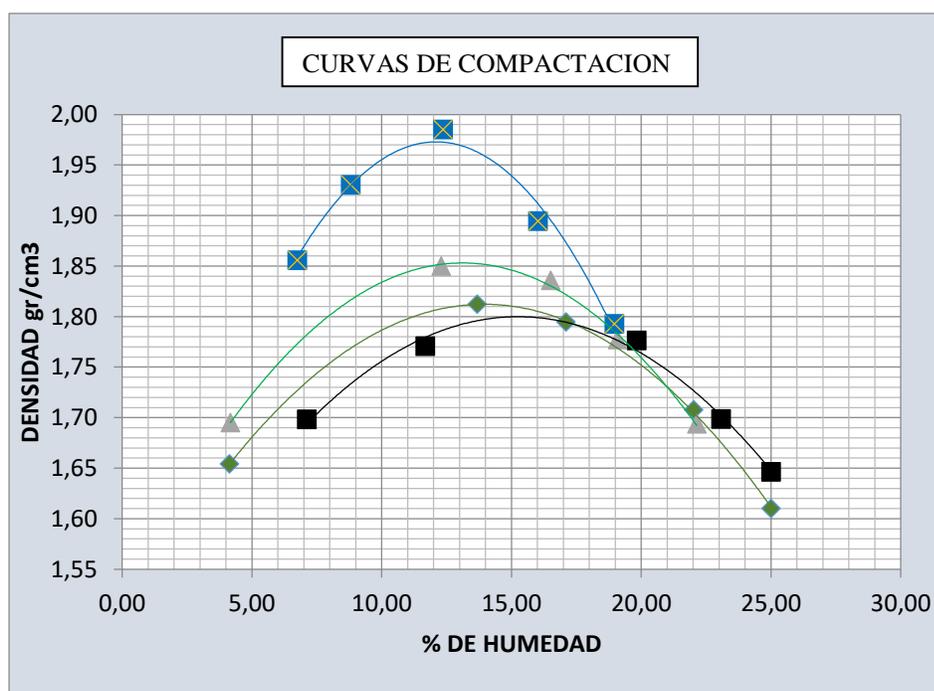
Cuadro 4.10 Resultados de la humedad óptima y densidad máxima-suelo A-6

SUELO A-6(10)		
% DE CAL	C.H.O. (%)	D. MAX (gr/cm <sup>3</sup> )
0	15,04	1,85
2	16,48	1,76
4	17,35	1,75
6	18,16	1,74

Fuente: *Elaboración**propia*

## 4.5.1.4 Suelo A-4

Gráfico 4.5 Curvas de compactación con porcentajes de cal – suelo A-4

Fuente: *Elaboración propia*

- Suelo A - 4(8) natural
- Suelo A-4(8) al 4% de cal
- Suelo A - 4(8) al 2% de cal
- Suelo A-4(8) al 6% de cal

Cuadro 4.11 Resultados de la humedad óptima y densidad máxima-suelo A-4

SUELO A-4(8)
--------------

% DE CAL	C.H.O. (%)	D. MAX (gr/cm <sup>3</sup> )
0	12,39	1,99
2	13,14	1,85
4	13,97	1,81
6	15,25	1,80

*Fuente: Elaboración propia*

### **Análisis de resultados**

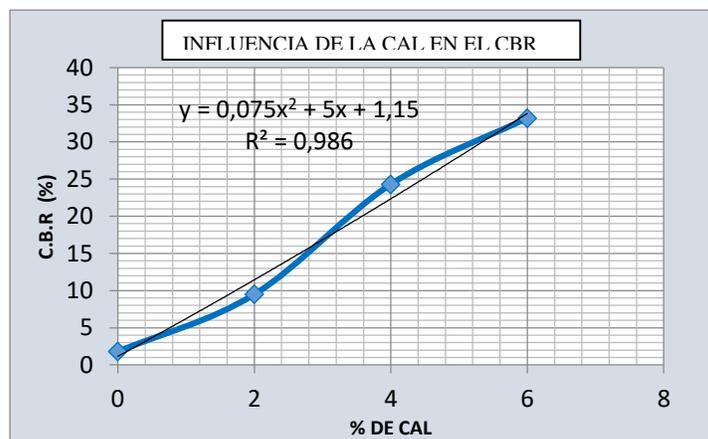
Se puede apreciar que el contenido de humedad óptima va aumentando en forma creciente a medida que se va introduciendo cada porcentaje de cal como se muestra en los gráficos de cada tipo de suelo.

Este efecto de la cal en la humedad óptima del suelo es desde un punto de vista favorable para los trabajos in situ de estabilización de suelos, ya que permitirá la compactación aun en materiales muy húmedos o saturados debido a lluvias inesperadas.

## **4.5.2 Capacidad de soporte (CBR)**

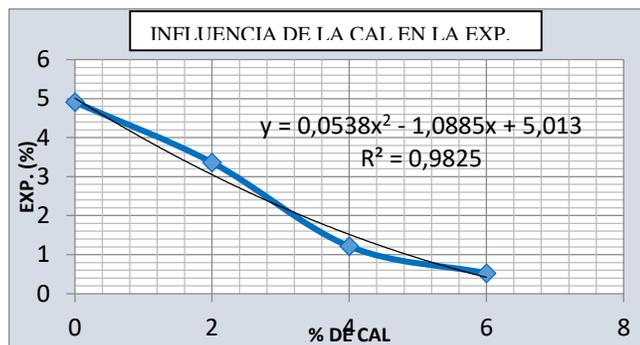
### **4.5.2.1 Suelo A-7-6**

**Gráfico 4.6 Curva de CBR con porcentajes de cal – suelo A-7-6**



*Fuente: Elaboración propia*

**Gráfico 4.7** Curva de expansión con porcentajes de cal-suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4.12** Resultados de CBR y EXP. con porcentajes de cal-suelo A-7-6

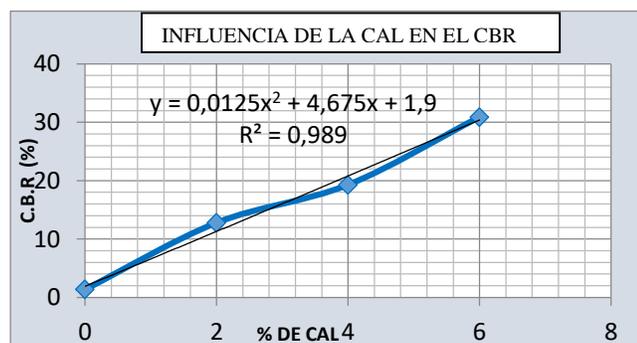
SUELO A-7-6(18)		
% DE CAL	C.B.R (%)	EXP (%)
0	1,80	4,91
2	9,50	3,36
4	24,30	1,21
6	31,1	0,52

Fuente: Elaboración propia

En base a la gráfica 4.6 y 4.7 determinamos que 3.86 % de cal se obtiene un CBR de 21.03 % y una EXP. 1.61% el cual satisface con la especificación técnica, y tiene un aumento de su resistencia en un 91.44% con el porcentaje óptimo de cal con respecto al suelo natural.

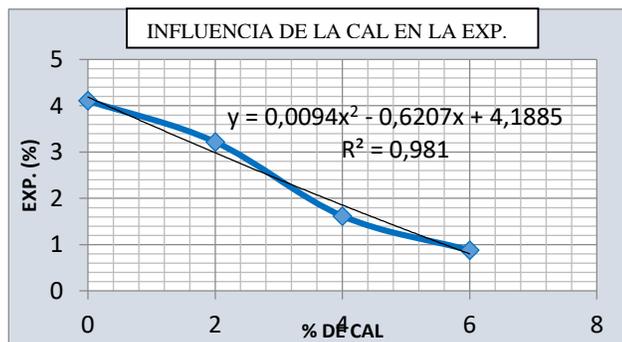
#### 4.5.2.2 Suelo A-7-5

**Gráfico 4.8** Curva de CBR con porcentajes de cal-suelo A-7-5



Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 4.9** Curva de expansión con porcentajes de cal- suelo A-7-5



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4.13** Resultados de CBR y EXP. con porcentajes de cal-suelo A-7-5

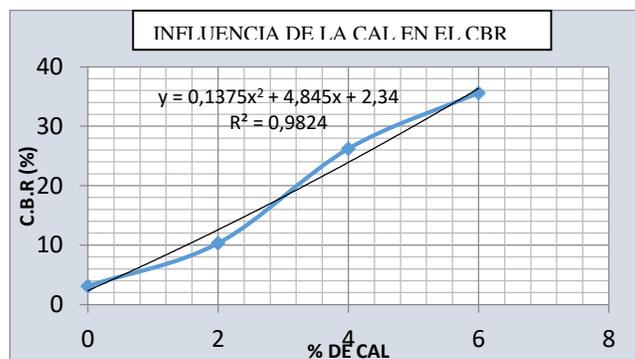
SUELO A-7-5(17)		
% DE CAL	C.B.R (%)	EXP (%)
0	1,40	4,11
2	12,80	3,22
4	19,30	1,62
6	30,90	0,88

Fuente: Elaboración propia

En base a la gráfica 4.8 y 4.9 determinamos que 4.14% de cal se obtiene un CBR de 21.05 % y una EXP. 1.78% el cual satisface con la especificación técnica, y tiene un aumento de su resistencia en un 93.35% con el porcentaje óptimo de cal con respecto al suelo natural.

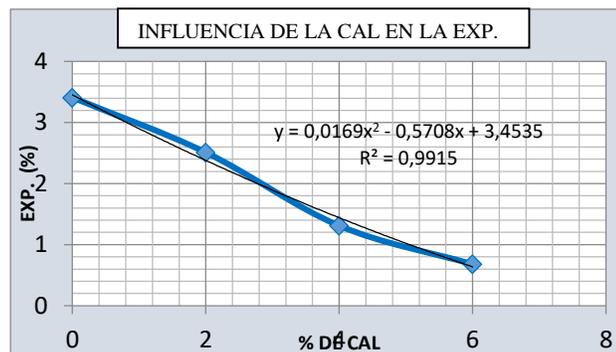
#### 4.5.2.3 Suelo A-6

**Gráfico 4.10** Curva de CBR con porcentajes de cal-suelo A-6



Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 4.11** Curva de expansión con porcentajes de cal-suelo A-6



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4.14** Resultados de CBR y EXP. con porcentajes de cal-suelo A-6

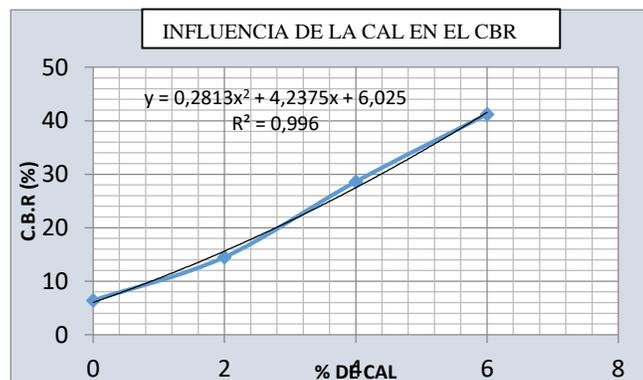
SUELO A-6(10)		
% DE CAL	C.B.R (%)	EXP (%)
0	3,10	3,41
2	10,30	2,51
4	26,20	1,31
6	35,60	0,68

Fuente: Elaboración propia

En base a la gráfica 4.10 y 4.11 determinamos que 3.51% de cal se obtiene un CBR de 21.04 % y una EXP. 1.69% el cual satisface con la especificación técnica, y tiene un aumento de su resistencia en un 85.27% con el porcentaje óptimo de cal con respecto al suelo natural.

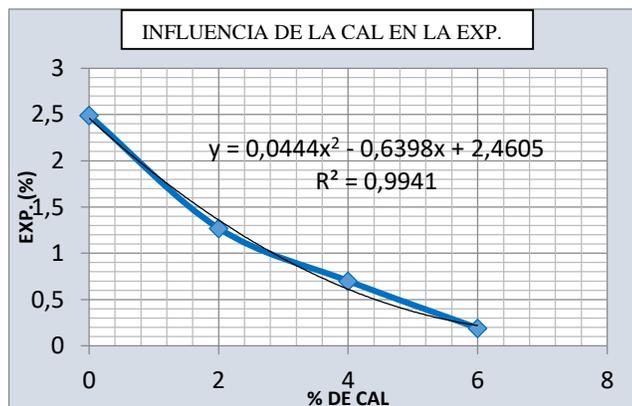
#### 4.5.2.4 Suelo A-4

**Gráfico 4.12** Curva de CBR con porcentajes de cal-suelo A-4



Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 4.13 Curva de expansión con porcentajes de cal-suelo A-4**



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4.15 Resultados de CBR y EXP. con porcentajes de cal-suelo A-4**

SUELO A-4(8)		
% DE CAL	C.B.R (%)	EXP (%)
0	6,40	2,49
2	13,30	1,27
4	28,6	0,70
6	41,2	0,19

Fuente: Elaboración propia

En base a la gráfica 4.12 y 4.13 determinamos que 2.97% de cal se obtiene un CBR de 21.09% y una EXP. 1.01% el cual satisface con la especificación técnica, y tiene un aumento de su resistencia en un 69.65% con el porcentaje óptimo de cal con respecto al suelo natural.

### Análisis de resultados

Con relación a las propiedades mecánicas del suelo, todas estas se ven influenciadas significativamente con la adición de cal hidratada.

La influencia de la cal en los valores del CBR del suelo se puede apreciar mucho mejor en la gráficas el cual de una mejor apreciación de cómo va aumentando ampliamente la resistencia a medida que se incrementa el porcentaje de cal hidratada en cada tipo de suelo.

La expansión del suelo disminuye significativamente con la adición de cal, que registran valores de expansión o hinchamiento que alcanzan las mezclas con diferentes contenidos de cal y que con cantidades pequeñas se producen cambios considerables.

#### 4.5.3 Plasticidad de la mezcla suelo – cal

**Cuadro 4.16 Influencia de la cal al porcentaje óptimo en la plasticidad**

Suelo	LL	LP	IP	% Óptimo de cal
A-7-6(18)	41,8	29	13,1	3,86
A-7-5(17)	69,8	56	14,19	4,14
A-6(10)	44,9	37,3	7,5	3,51
A-4(8)	33,6	28,4	5,19	2,97

*Fuente: Elaboración propia*

#### **Análisis de resultados**

Los resultados reflejan cómo se reduce la plasticidad de cada suelo en relación con el que se encuentra en su estado natural con la proporción de cal que hace cumplir con las exigencias de la especificación técnica utilizada para este proyecto.

### 4.6 MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE POR SUSTITUCIÓN DEL SUELO

Una vez procesado los datos de práctica del suelo granular de banco se tiene las siguientes características de clasificación.

**Cuadro 4.17 Resultados de clasificación de los suelos**

SUELO	CLASIFICACION	DESCRIPCION
1	A-2-4(0)	Arena limosa con grava

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.6.1 Compactación

**Cuadro 4.18 Resultados del ensayo de compactación**

SUELO	PROCTOR ESTANDAR T-99	
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	Humedad Óptima (%)
A-2-4(0)	2.083	7.8

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.2 Relación de Soporte del Suelo (CBR)

**Cuadro 4.19 Resultados del ensayo de C.B.R. laboratorio**

SUELO	C.B.R. de laboratorio	
	C.B.R (%)	Expansión (%)
A-2-4(0)	32.7	0.17

Fuente: Elaboración propia

#### Análisis de resultados

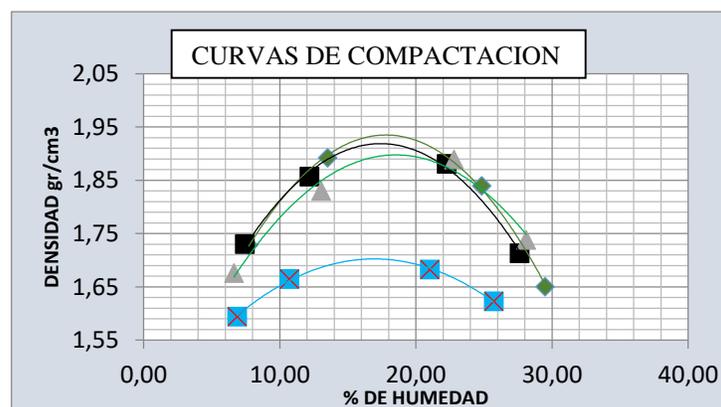
Se puede observar que el suelo tiene un CBR elevado, de tal modo cumple con la condición de resistencia y expansión definida para dicho proyecto.

### 4.7 MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE SUELO – SUELO GRANULAR

#### 4.7.1 Compactación

##### 4.7.1.2 Suelo A-7-6

**Gráfico 4.14 Curvas de compactación con porcentajes de suelo granular-suelo A-7-6**



- Suelo A-7-6(18) natural
  - Suelo A-7-6(18) mezcla al 40%
- Suelo A-7-6(18) mezcla al 60%
  - Suelo A-7-6(18) mezcla al 80%

Fuente: Elaboración propia

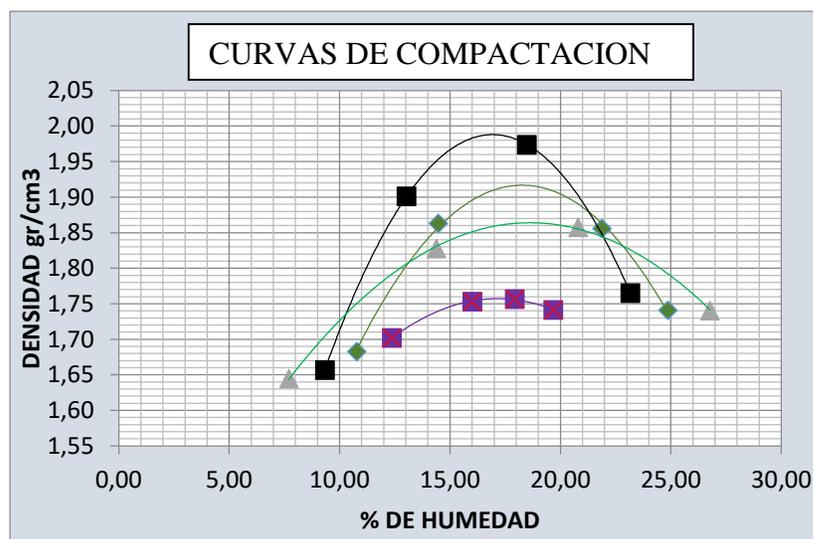
#### Cuadro 4.20 resultados de la humedad óptima y densidad máxima-suelo A-7-6

SUELO A-7-6(18)		
% DE SUELO GRANULAR	C.H.O. (%)	D. MAX (gr/cm <sup>3</sup> )
0	16,83	1,70
40	18,54	1,90
60	17,82	1,94
80	17,39	1,92

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.1.3 Suelo A-7-5

#### Gráfico 4.15 Curvas de compactación con porcentajes de suelo granular-suelo A-7-5



- Suelo A-7-5(17) natural
  - Suelo A-7-5(17) mezcla al 40%
- Suelo A-7-5(17) mezcla al 60%
  - Suelo A-7-5(17) mezcla al 80%

Fuente: Elaboración propia

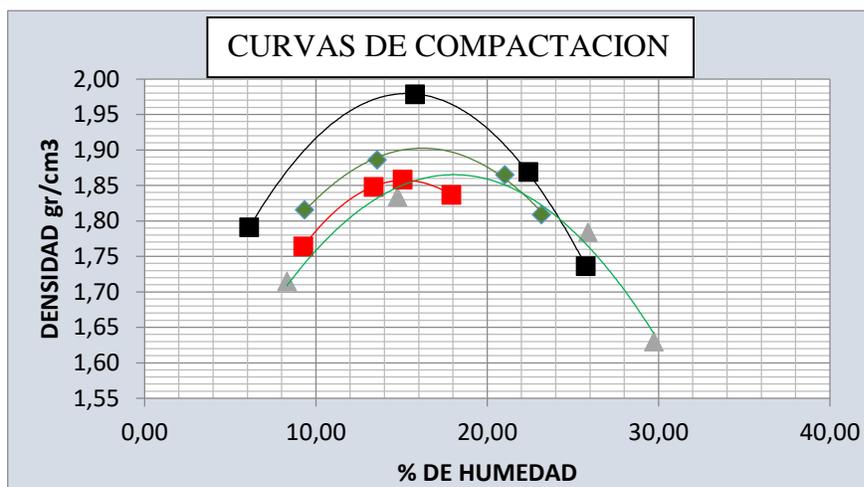
Cuadro 4.21 Resultados de la humedad óptima y densidad máxima-suelo A-7-5

SUELO A-7-5(17)		
% DE SUELO GRANULAR	C.H.O. (%)	D. MAX (gr/cm <sup>3</sup> )
0	17,23	1,77
40	18,68	1,87
60	18,26	1,92
80	17,85	1,98

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.1.4 Suelo A-6

Gráfico 4.16 Curvas de compactación con porcentajes de suelo granular-suelo A-6



- Suelo A - 6(10) natural
- Suelo A - 6(10) mezcla al 60%
- Suelo A - 6(10) mezcla al 40%
- Suelo A - 6(10) mezcla al 80%

Fuente: Elaboración propia

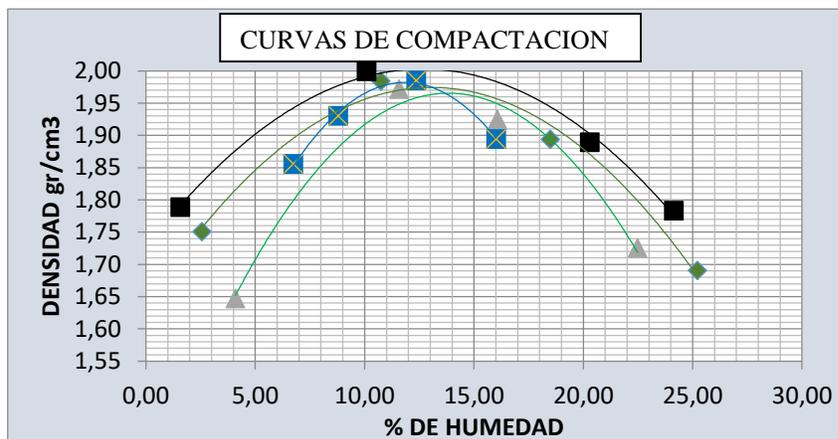
Cuadro 4.22 Resultados de la humedad óptima y densidad máxima-suelo A-6

SUELO A-6(10)		
% DE SUELO GRANULAR	C.H.O. (%)	D. MAX (gr/cm <sup>3</sup> )
0	15,04	1,85
40	17,91	1,87
60	16,20	1,90
80	15,30	1,98

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.1.5 Compactación del Suelo A-4

Gráfico 4.17 Curvas de compactación con porcentajes de suelo granular-suelo A-4



- Suelo A - 4(8) natural
- Suelo A-4(8) mezcla 60%
- Suelo A - 4(8) mezcla al 40%
- Suelo A-4(8) mezcla 80%

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.23 Resultados de la humedad óptima y densidad máxima-suelo A-4

SUELO A-4(8)		
% DE SUELO GRANULAR	C.H.O. (%)	D. MAX (gr/cm³)
0	12,39	1,99
40	13,85	1,97
60	13,04	1,98
80	12,82	2,01

Fuente: Elaboración propia

#### Análisis de resultados

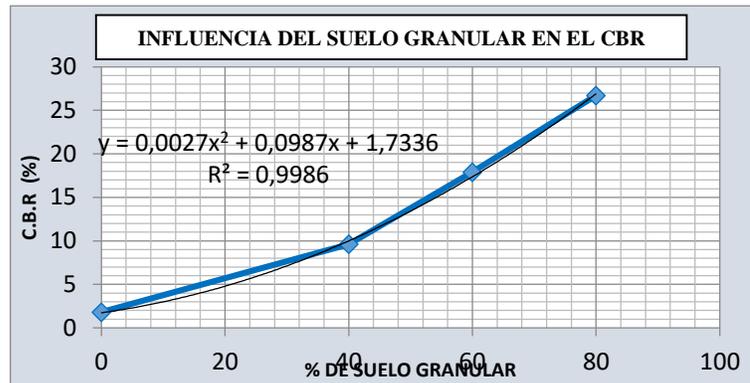
Se puede apreciar que hay un aumento del contenido de humedad óptima al introducir el 40% del suelo granular y que a partir de ahí va disminuyendo debido a que ya no tiene tantas partículas finas dando una mayor facilidad de recubrimiento con el agua.

Se puede observar como la densidad sufre alteraciones y van aumentando a medida que se va introduciendo porcentajes de suelo granular, lo que nos indica que el suelo va aumentando su resistencia al cambiar sus propiedades.

## 4.7.2 Capacidad de soporte (CBR)

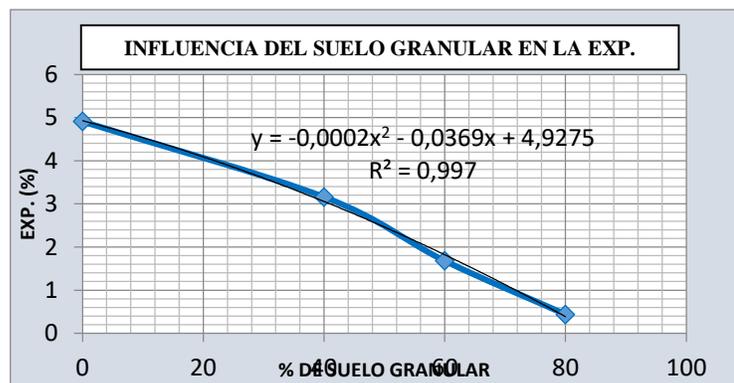
### 4.7.2.1 Suelo A-7-6

Gráfico 4.18 Curva de CBR. con porcentajes de suelo granular-suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.19 Curva de expansión con porcentajes de suelo granular-suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.24 Resultados de CBR y EXP. a distintos porcentajes-suelo A-7-6

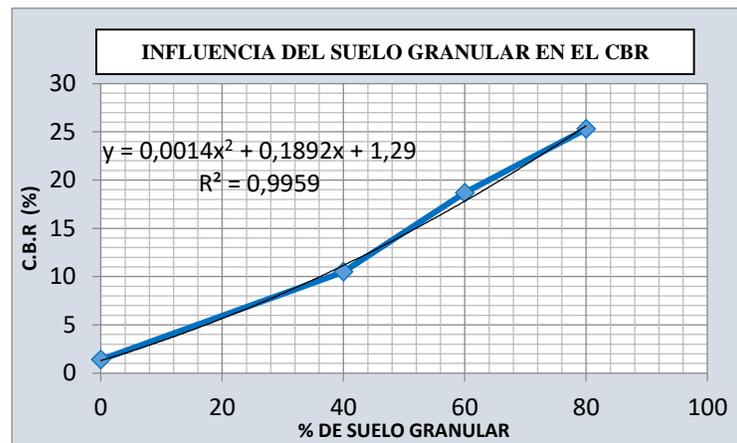
SUELO A-7-6(18)		
% DE SUELO GRANULAR	C.B.R	EXP.
0	1,80	4,91
40	9,60	3,16
60	17,90	1,68
80	26,70	0,44

Fuente: Elaboración propia

En base a la gráfica 4.18 y 4.19 determinamos que 66% de suelo granular se obtiene un CBR de 20.1 % y una EXP. 1.74% el cual satisface con la especificación técnica, y tiene un aumento de su resistencia en un 91.04% con el porcentaje óptimo de suelo granular con respecto al suelo natural.

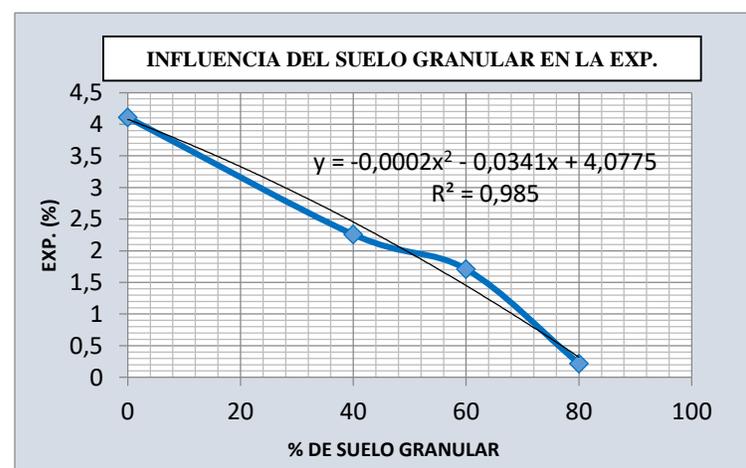
#### 4.7.2.2 Suelo A-7-5

Gráfico 4.20 Curva de CBR con porcentajes de suelo granular-suelo A-7-5



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.21 Curva de expansión con porcentajes de suelo granular-suelo A-7-5



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4.25 Resultados de CBR y EXP. a distintos porcentajes-suelo A-7-5**

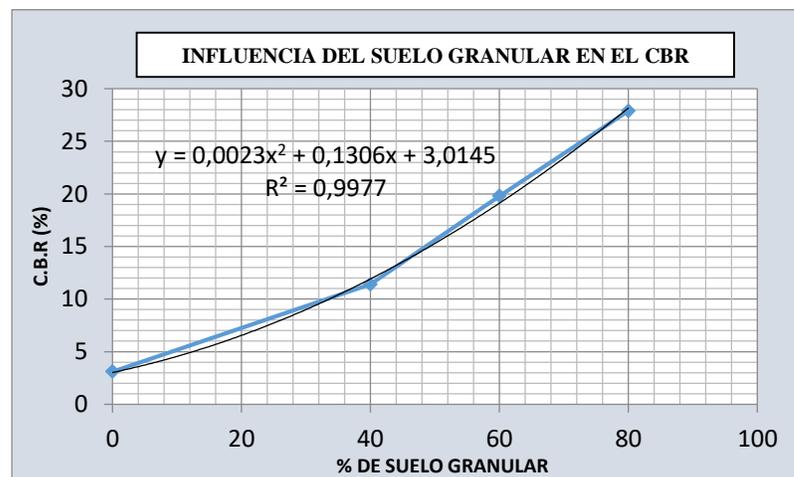
SUELO A-7-5(17)		
% DE SUELO GRANULAR	C.B.R	EXP.
0	1,40	4,11
40	10.50	2.26
60	18.70	1.71
80	25.30	0.22

*Fuente: Elaboración propia*

En base a la gráfica 4.20 y 4.21 determinamos que 68 % de suelo granular se obtiene un CBR de 20.6 % y una EXP. 0.96% el cual satisface con la especificación técnica, y tiene un aumento de su resistencia en un 93.20% con el porcentaje óptimo de suelo granular con respecto al suelo natural.

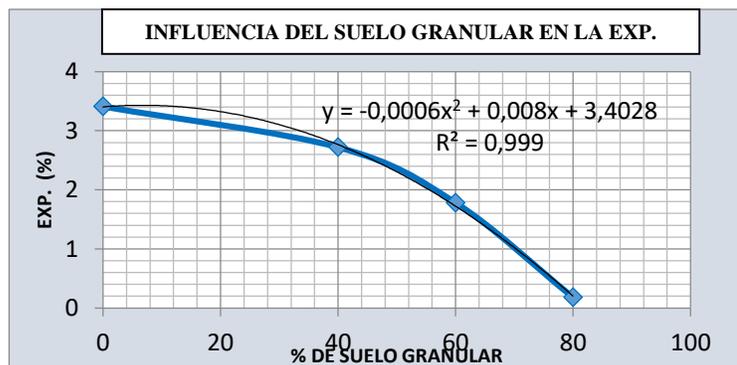
#### 4.7.2.3 Suelo A-6

**Gráfico 4.22 Curva de CBR con porcentajes de material granular-suelo A-6**



*Fuente: Elaboración propia*

**Gráfico 4.23** Curva de expansión con porcentajes de suelo granular-suelo A-6



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4.26** Resultados de CBR y EXP. a distintos porcentajes-suelo A-6

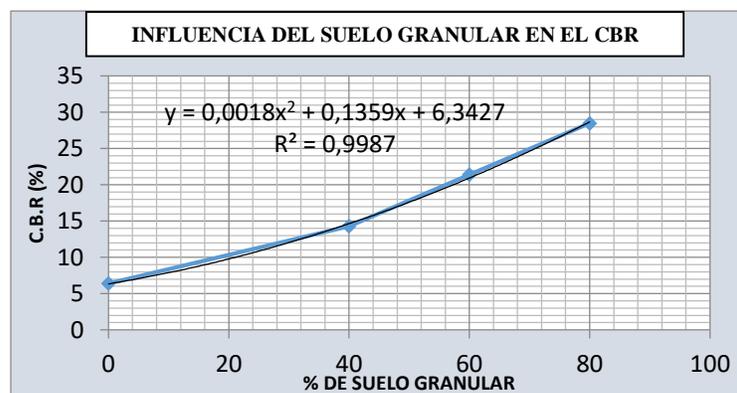
SUELO A-6(10)		
% DE SUELO GRANULAR	C.B.R	EXP.
0	3.10	3,41
40	11.40	2,72
60	19.80	1,78
80	27.90	0,18

Fuente: Elaboración propia

En base a la gráfica 4.22 y 4.23 determinamos que 63% de material granular se obtiene un CBR de 20.4 % y una EXP. 1.66% el cual satisface con la especificación técnica, y tiene un aumento de su resistencia en un 84.80% con el porcentaje óptimo de suelo granular con respecto al suelo natural.

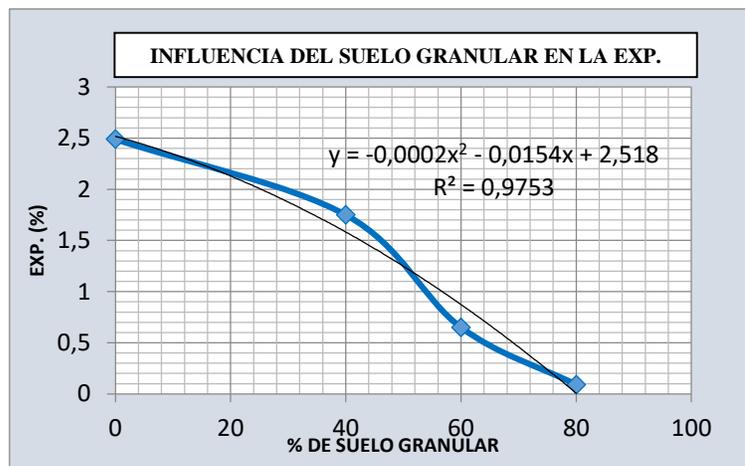
#### 4.7.2.4 Suelo A-4

**Gráfico 4.24** Curva de CBR con porcentajes de suelo granular-suelo A-4



Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 4.25** Curva de expansión con porcentajes de suelo granular-suelo A-4



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4.27** Resultados de CBR y EXP. a distintos porcentajes-suelo A-4

SUELO A-4(8)		
% DE SUELO GRANULAR	C.B.R	EXP.
0	6.40	2.49
40	14.30	1.75
60	21.40	0.65
80	28.50	0.09

Fuente: Elaboración propia

En base a la gráfica 4.24 y 4.25 determinamos que 59% de suelo granular se obtiene un CBR de 20.6% y una EXP. 1.03% el cual satisface con la especificación técnica, y tiene un aumento de su resistencia en un 68.93% con el porcentaje óptimo de suelo granular con respecto al suelo natural.

### **Análisis de resultados**

En los valores del CBR se puede observar en las graficas cómo va aumentando la resistencia a medida que se incrementa el porcentaje de suelo granular en cada tipo de suelo y así mismo hay una reducción de la expansión de cada suelo.

Analizando los cuatro suelo se puede observar que el suelo limoso A-4(8) tiene un mayor aumento de resistencia con respecto a los demás, es debido a que este suelo tiene mayores partículas gruesas en su estado natural.

#### Cuadro 4.28 Resultados obtenidos del mejoramiento suelo-suelo granular

Suelo	CBR de diseño	EXP. de diseño (%)	EXP. obtenido (%)	CBR obtenido (%)	% Optimo de suelo granular
A-7-6(18)	20	< 2	1.74	20.1	66
A-7-5(17)	20	< 2	0.96	20.6	68
A-6(10)	20	< 2	1.66	20.4	63
A-4(8)	20	< 2	1.03	20.6	59

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.3 Plasticidadde la mezcla suelo – suelo granular

#### Cuadro 4.29 Influencia del suelo granular en la plasticidad al porcentaje optimo

Suelo	LL	LP	IP	% Optimo de suelo granular
A-7-6(18)	33.22	18.96	14.26	66
A-7-5(17)	31.9	19.5	12.43	68
A-6(10)	23.35	17.98	5.37	63
A-4(8)	20.03	15.95	6.07	59

Fuente: Elaboración propia

#### Análisis de resultados

Los resultados reflejan cómo hay una reducción de la plasticidad de cada suelo en relación al suelo en su estado natural, debido a la incorporación del material granular de banco al porcentaje óptimo que hace cumplir con las exigencias de la especificación técnica utilizada para este proyecto.

## 4.8 ANÁLISIS DE ALTURA DE LA CAPA SUBRASANTE

### 4.8.1 Método del CBR

El diseño se realiza para un tránsito mediano con una carga por rueda de 9000 lb

**Cuadro 4.30 Resultados de alturas de la subrasante mejorada-Método CBR**

SUELO	Espesor del pavimento con la subrasante natural (cm)	Espesor del pavimento con la subrasante mejorada (cm)	Altura de la subrasante mejorada (cm)	Altura de la subrasante por sustitución del suelo (cm)
A-7-6(18)	60	18	42	46
A-7-5(17)	63	18	45	49
A-6(10)	46	18	28	32
A-4(8)	32	18	14	18

*Fuente: elaboración propia*

Una vez obtenido los resultados, se puede apreciar que la menor altura de la subrasante mejorada es del suelo A-4, esto debido a que es un suelo con mejores características de resistencia respecto a los suelos arcillosos, los cuales al ser de mala calidad presentan mayor altura de la subrasante mejorada.

Haciendo un análisis económico de las alturas de subrasante mejorada se observa que el suelo A-7-5 y A-7-6 tendrían un mayor costo en la conformación de la subrasante debido a que presentan mayor altura, lo que genera mayor trabajo en la obra ya que se tendría que hacer más de dos capas compactadas para poder llegar a esa altura, tomando en cuenta que en las especificaciones técnicas de la ABC recomienda que el espesor de las capas compactadas no deberá pasar de los 20 cm.

Las alturas obtenidas debido a un proceso de mejoramiento de los suelos, nos ayuda en brindar una plataforma estable al pavimento y así evitar que se puedan presentar fallas estructurales al pasar el tiempo.

Además al presentar mayor resistencia la subrasante nos ayudara a tener espesores menores de la capa base, sub base y rodadura.

#### 4.9 COSTO DE PROVISIÓN Y CONFORMACIÓN DE LA SUBRASANTE NATURAL Y MEJORADA

**Cuadro 4.31 P.U. de la subrasante natural y mejorada del suelo A-7-6**

SUELO A-7-6(18)		P.U. (Bs)	% óptimo de estabilización
<i>Fuente:</i>	Subrasante natural	17.35	-
	Subrasante por sustitución con suelo granular	137.10	-
	Subrasante suelo - cal	63.69	3.86
	Subrasante suelo - suelo granular	83.21	66

*elaboración propia*

**Cuadro 4.32 P.U. de la subrasante natural y mejorada del suelo A-7-5**

SUELO A-7-5(17)		P.U. (Bs)	% óptimo de estabilización
	Subrasante natural	17.35	-
	Subrasante por sustitución con suelo granular	137.10	-
	Subrasante suelo - cal	66.87	4.14
	Subrasante suelo - suelo granular	85.20	68

*Fuente: elaboración propia*

**Cuadro 4.33 P.U. de la subrasante natural y mejorada del suelo A-6**

SUELO A-6(10)		P.U. (Bs)	% óptimo de estabilización
	Subrasante natural	17.35	-
	Subrasante por sustitución con suelo granular	137.10	-
	Subrasante suelo - cal	59.03	3.51
	Subrasante suelo - suelo granular	80.21	63

*Fuente: elaboración propia*

Cuadro 4.34 P.U. de la subrasante natural y mejorada del suelo A-4

SUELO A-4(8)		P.U. (Bs)	% óptimo de estabilización
Fuente:	Subrasante natural	17.35	-
	Subrasante por sustitución con suelo granular	137.10	-
	Subrasante suelo - cal	52.22	2.97
	Subrasante suelo - suelo granular	76.22	59

elaboración propia

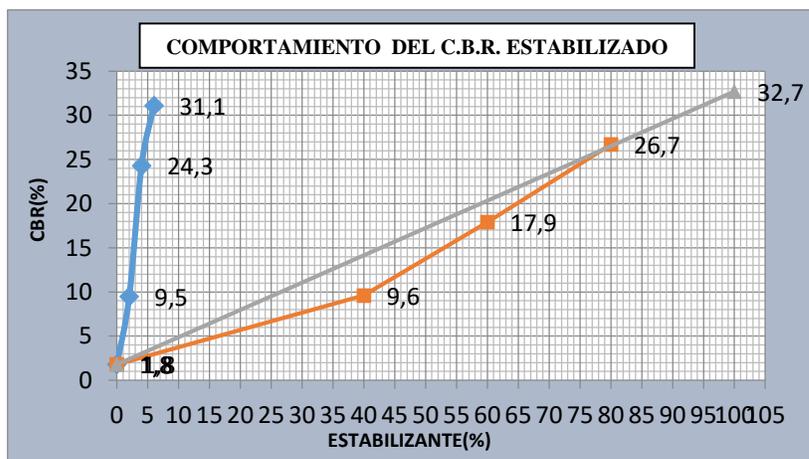
### Análisis de resultados

De acuerdo a los métodos realizados de mejoramiento puesto en obra con su respectivo porcentaje óptimo se puede apreciar que en los cuatro suelos en estudio el método más económico para la conformación de la subrasante es el suelo mejorado con cal teniendo un menor en su costo con relación a los demás métodos.

## 4.10 EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL

### 4.10.1 Evaluación técnica

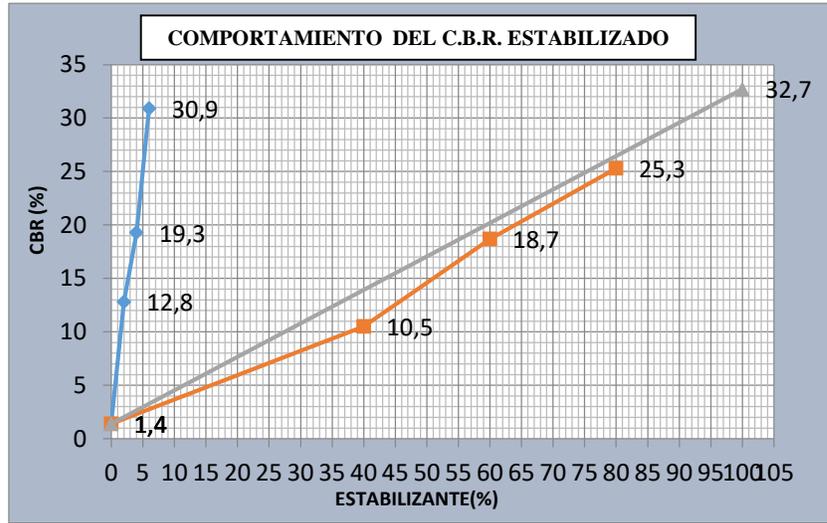
Gráfico 4.26 CBR vs % de estabilizantes del suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

- Suelo-cal
- Suelo-suelo granular
- Suelo granular de banco

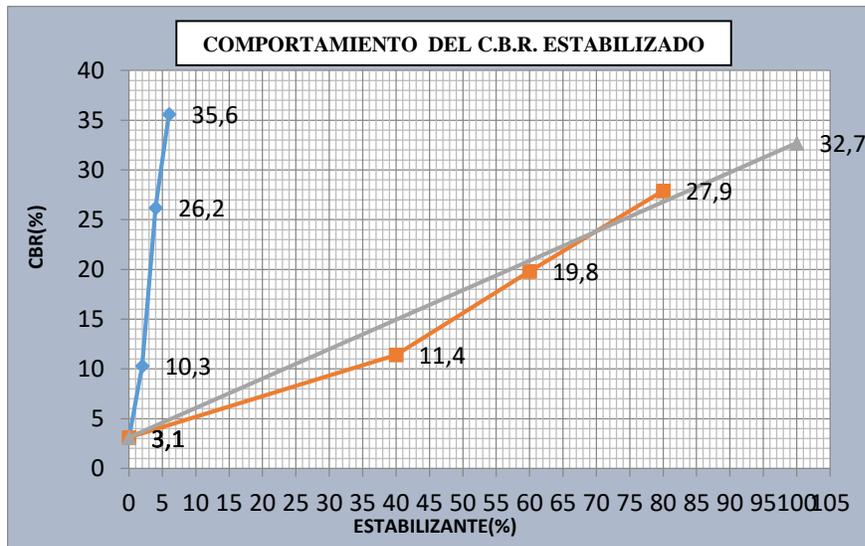
**Gráfico 4.27 CBR vs % de estabilizantes del suelo A-7-5**



Fuente: Elaboración propia

- Suelo-cal
- Suelo-suelo granular
- Suelo granular de banco

**Gráfico 4.28 CBR vs % de estabilizantes del suelo A-6**



Fuente: Elaboración propia

- Suelo-cal
- Suelo-suelo granular
- Suelo granular de banco

**Gráfico 4.29 CBR vs % de estabilizantes del suelo A-4**



Fuente: Elaboración propia

- Suelo-cal
- Suelo-suelo granular
- Suelo granular de banco

En las gráficas se puede apreciar como la alternativa de mejoramiento suelo-cal presenta un mayor valor de CBR con relación a los otros métodos en los suelos A-4 y A-6, aumentando considerablemente su resistencia con pequeños porcentajes de cal, lo cual ofrece subrasante de elevada calidad y hace que reduzcan los espesores de la estructura del pavimento.

En los suelos A-7-5 y A-7-6 el método que mayor valor de CBR presenta es la obtenida por la sustitución del suelo natural por un suelo granular de banco, seguida del mejoramiento suelo-cal.

Observando el comportamiento del CBR en los cuatro suelos en estudio se puede apreciar que el método de mejoramiento suelo – cal es el brinda resultados muy eficientes en la resistencia por la buena reacción de la cal con los suelos finos con cantidades pequeñas.

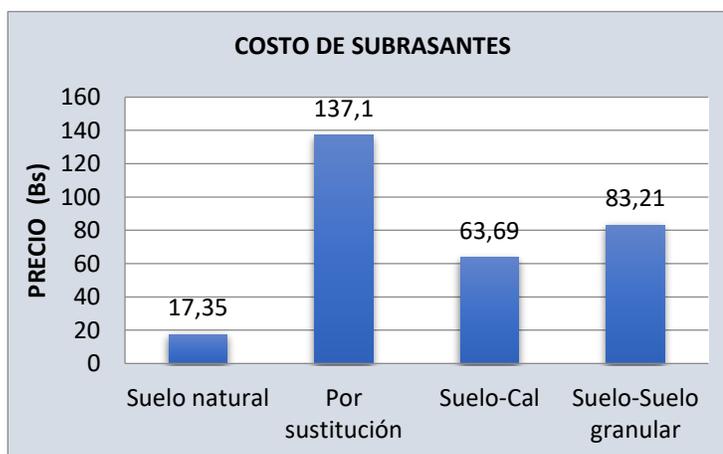
#### 4.10.2 Evaluación económica

**Cuadro 4.35 P.U. de cada método de estabilización -suelo A-7-6**

SUBRASANTE	P.U. (Bs)	Incremento del costo en relación a la subrasante natural
<b>SUELO A -7-6(18)</b>		
Subrasante natural	17.35	
Subrasante por sustitución con suelo granular	137.10	87.35 %
Subrasante suelo - cal	63.69	72.76%
Subrasante suelo - suelo granular	83.21	79.15%

*Fuente: Elaboración propia*

**Gráfico 4.30 Evaluación económica del suelo A-7-6**



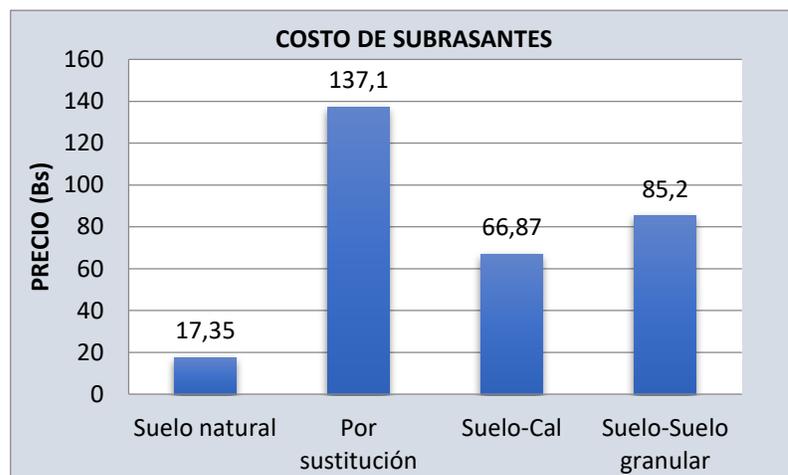
*Fuente: Elaboración propia*

**Cuadro 4.36 P.U. de cada método de estabilización -suelo A-7-5**

SUBRASANTE	P.U. (Bs)	Incremento del costo en relación a la subrasante natural
<b>SUELO A -7-5(17)</b>		
Subrasante natural	17.35	
Subrasante por sustitución con suelo granular	137.10	87.35 %
Subrasante suelo - cal	66.87	74.05 %
Subrasante suelo - suelo granular	85.20	79.64 %

*Fuente: Elaboración propia*

**Gráfico 4.31 Evaluación económica del suelo A-7-5**



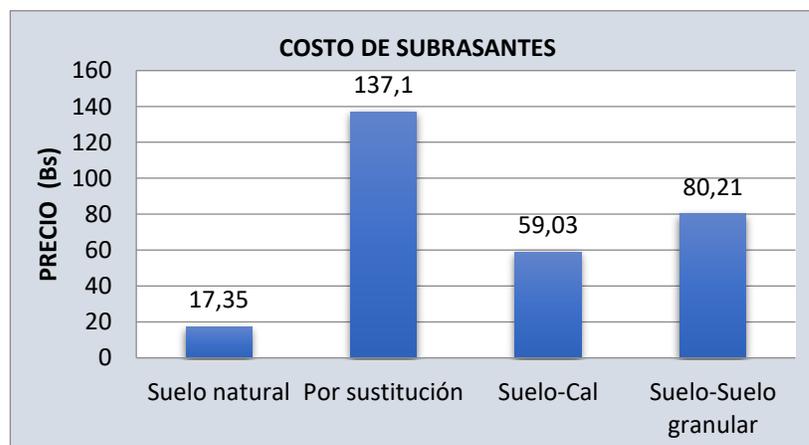
Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4.37 P.U. de cada método de estabilización -suelo A-6**

SUBRASANTE	P.U. (Bs)	Incremento del costo en relación a la subrasante natural
SUELO A -6(10)		
Subrasante natural	17.35	
Subrasante por sustitución con suelo granular	137.10	87.35 %
Subrasante suelo - cal	59.03	70.61 %
Subrasante suelo - suelo granular	80.21	78.37 %

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 4.32 Evaluación económica del suelo A-6**



Fuente:

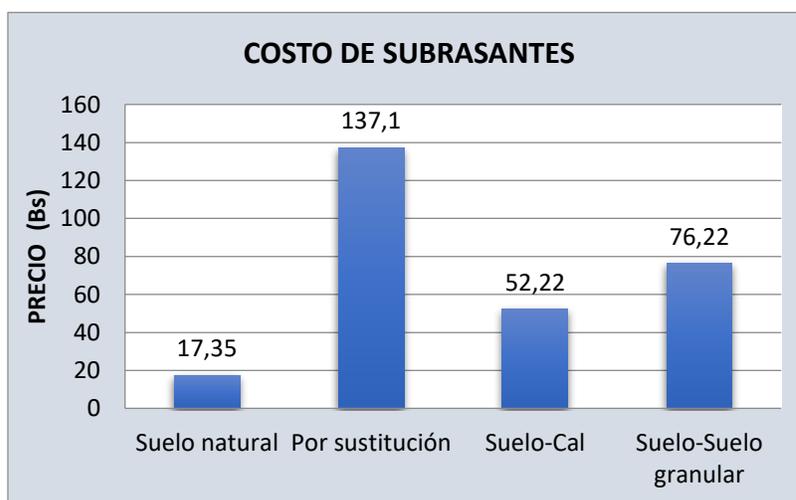
*Elaboración propia*

**Cuadro 4.38 P.U. de cada método de estabilización -suelo A-4**

SUBRASANTE	P.U. (Bs)	Incremento del costo en relación a la subrasante natural
SUELO A-4(8)		
Subrasante natural	17.35	
Subrasante por sustitución con suelo granular	137.10	87.35 %
Subrasante suelo - cal	52.22	66.78%
Subrasante suelo - suelo granular	76.22	77.24 %

*Fuente: Elaboración propia*

**Gráfico 4.33 Evaluación económica del suelo A-4**



*Fuente: Elaboración propia*

Haciendo una evaluación económica del incremento del costo de la conformación de la subrasante se puede apreciar que el método más económico es el mejorado con cal en los cuatro suelos en estudio, debido a que el precio de este material es bajo con relación al suelo granular y que con pequeños porcentajes de este material hacen que se obtengan un aumento considerable de su resistencia dando cumplimiento con la especificación técnicas del proyecto.

### **4.10.3 Evaluación ambiental**

Al hacer un evaluación del impacto ambiental que pueden cuásar en el procedimiento de los tipos de mejoramientos planteados, se puede observar que la contaminación causada por los efectos de la estabilización suelo-cal es la generación de polvo de cal, pero esta contaminación se puede controlar con una humectación previa del suelo a estabilizar y así evitando la generación de polvo.

El punto más considerable de contaminación de esta alternativa es el causado en la elaboración de la cal, ya que para su elaboración usan grandes cantidades de recursos naturales y quemando mucho combustible para su elaboración.

Por otro lado el mayor impacto que se presenta dentro de las estabilizaciones es la explotación de forma no controlada del material granular de las montañas o ríos.

**CAPITULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5.1 CONCLUSIONES

A la luz de los resultados obtenidos en este estudio, los siguientes párrafos se constituyen en las conclusiones más importantes derivadas del presente proyecto.

Se logró satisfactoriamente identificar mediante sondeos del área a urbanizar a la ciudad de Tarija las zonas que presentan suelos desfavorables compuesto por limo y arcillas con características de baja resistencia y plasticidad media a alta.

Analizando los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio se determinó que los suelos en su estado natural no cumplen con los requisitos de especificación técnica establecida en dicho proyecto, de tal modo que estos suelos son perjudiciales para la conformación de la subrasante de diseño del pavimento.

Se determinó mediante el estudio que la alternativa más económica para la conformación de la capa subrasante en los cuatro suelos es el método suelo-cal, el cual tiene un incremento menor en su costo con relación a los demás métodos.

Se obtuvo los porcentajes óptimos de cal y suelo granular para la estabilización de los suelos, de tal forma que cumplen con las condiciones de CBR y Expansión en la conformación de la capa subrasante según las especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC de Bolivia.

El suelo A-4 posee menor altura de la capa subrasante mejorada lo que genera un menor costo en la conformación puesto en obra en relación a los demás suelos de características arcillosas que tienen baja resistencia lo cual genera que tenga mayor altura de la subrasante mejorada.

Se completó de manera positiva el objetivo general demostrando con los resultados obtenidos mediante los ensayos necesarios en laboratorio de la eficacia de la cal hidratada y el suelo granular para mejorar las propiedades, tanto físicas como mecánicas de los suelos finos presentes en el área a urbanizar en la ciudad de Tarija y así brindar una plataforma estable a la estructura del pavimento.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Después del desarrollo de este trabajo se hacen algunas recomendaciones para tener en cuenta para la realización de futuros proyectos similares.

Para cada práctica de compactación o CBR se debe sacar el contenido de humedad del suelo natural en ese momento, debido a que al estar almacenada la muestra y el transcurrir de los días va perdiendo humedad, ya que este valor inicial es indispensable y puede hacer variar considerablemente los resultados de dichas prácticas.

Se debe realizar la compactación con un ritmo de energía constante, ya que la variación del ritmo o no cumplir con la cantidad definida de número de golpes, puede ocasionar consecuencias en la obtención de datos erróneos, como las lecturas en la prensa hidráulica de CBR.

Para trabajar con la mezcla suelo-cal en los distintos ensayos se debe utilizar guantes para las manos y evitar lo menos posible el contacto directo de la piel con cal hidratada ya que puede ocasionar daños como quemaduras e irritaciones.

Para los ensayos que requieren mayor precisión como es el caso de los límites de Atterberg se debe usar una balanza con aproximación de 0,01gr o más, ya que la variación de un decimal influye considerablemente en los resultados de dicha práctica, y así evitar problemas que nos puedan perjudicar para realizar otros estudios como clasificación o caracterización del suelo.

Los equipos utilizados para la realización de los ensayos involucrados en la elaboración de un proyecto deberán ser calibrados periódicamente a fin de que la ejecución y los resultados obtenidos por los mismos sean los más certeros posibles.