

# **ANALISIS DE ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACION DE LA SUBRAZANTE PARA LA ZONA DEL BARRIO EL CONSTRUCTOR**

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCION**

#### **1.1. ANTECEDENTES.**

El paso preliminar esencial para el diseño y la construcción de un proyecto de ingeniería civil es el estudio completo y detallado del lugar seleccionado. Pues cualquier obra por mas grande o pequeña que sea amerita algún tipo de estudio de campo.

La zona de estudio escogida es la ocupada por el barrio “El Constructor”, el barrio se encuentra en una zona de altura, ubicada al noreste de la ciudad de Tarija.

Se puede decir que el barrio es nuevo ya que la alcaldía no realizo aun la apertura de todas las calles y solo existen algunas calles principales que son de ingreso al barrio. El ingreso principal al barrio se lo realiza por la avenida La Paz que solo se encuentra asfaltada hasta el cruce con la Avenida Circunvalación y su prolongación cuenta con empedrado hasta llegar al ingreso del barrio en cuestión.

El barrio “El Constructor” no tiene todas sus calles debidamente definidas e identificadas, excepto una calle principal, que es la Avenida Salinas, esta avenida esta con empedrado, en malas condiciones, pues presenta problemas de baches, hundimientos, desprendimiento de piedras y otros problemas.

En las demás calles sólo se hizo la apertura con maquinaria, y un mejoramiento con ripio, éstas en su mayoría no están bien delimitadas y se encuentran en mal estado, presentando principalmente problemas causados por, la erosión del suelo, y el tráfico vehicular.

Se puede decir que los problemas que presentan las calles del barrio “El Constructor” son causados por la mala ejecución de la apertura de calles y el mal ripiado, ya que este se hizo sin ninguna supervisión del trabajo dejando así que el ripio colocado sea compactado por simple circulación vehicular, ripio que con el tiempo se fue desprendiendo y

causando diferentes problemas a la subrasante dejándola muy susceptible al agua y viento que causan problemas de inestabilidad, agrietamientos, deformaciones y cambios de volumen.

## **1.2. JUSTIFICACION.**

Con el presente estudio se quiere llegar a analizar los métodos utilizados en nuestro medio para la estabilización de suelos, análisis del cual resultará una recomendación sobre el mejor método a emplearse en la zona, también se pretende mostrar las ventajas entre métodos, como también la viabilidad de poder usarlos o no.

Se determinó como zona de estudio la del barrio “El Constructor” por ser un barrio donde se tiene un suelo con características malas, presentando baja capacidad portante y una elevada expansión por su característica de suelo fino.

Es uno de los barrios que está en pleno desarrollo realizándose obras de apertura de avenidas y calles, construcción de viviendas y donde la Alcaldía Municipal de la Provincia Cercado y la Gobernación del Departamento tienen planificadas grandes obras como la construcción de un Campo Ferial, de un Centro Oncológico, etc.

Se tiene la necesidad de mejorar las características de suelo que conforma la zona del barrio el constructor ya que servirá de subrasante y de bases de firmes de capas de elevada capacidad.

El estudio que se pretende realizar nos servirá como una guía del tipo y características del suelo que tiene el barrio “El Constructor” y tener ya definida la mejor alternativa para posteriores estabilizaciones de suelos que se realicen en el barrio.

El estudio podrá ser tomado como referencia para poder realizar futuros estudios en otras zonas de la ciudad de Tarija que presenten características similares del tipo de suelo.

### **1.3. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA.**

Las características que presenta el suelo de la subrasante en el barrio “El Constructor”, no cumplen los requisitos indispensables del mejoramiento de vías urbanas.

### **1.4. OBJETIVOS.**

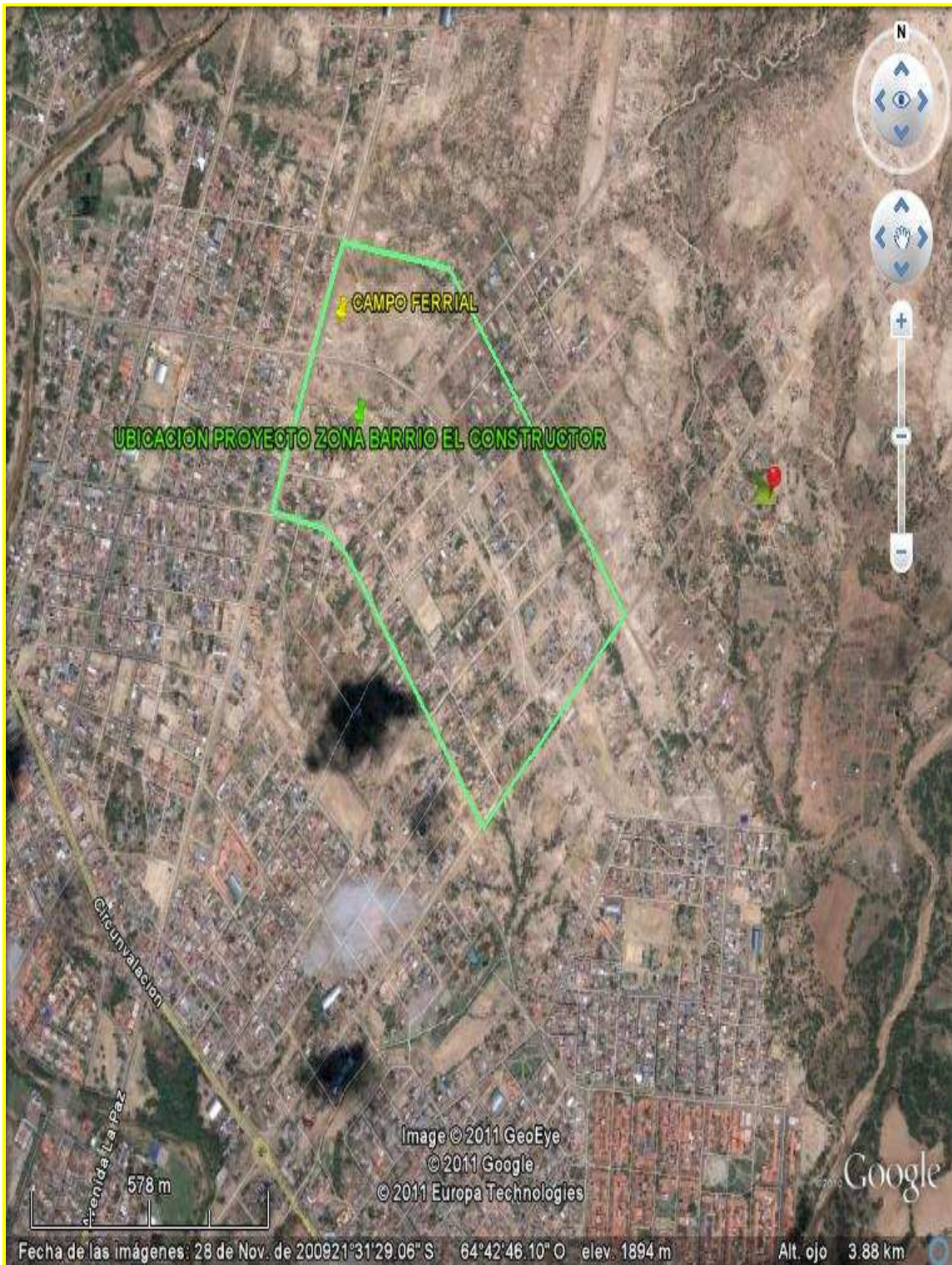
#### **1.4.1. OBJETIVOS GENERAL.**

Realizar un análisis técnico, económico y ambiental de alternativas de estabilización química y mecánica para la subrasante en la zona del barrio “El Constructor”, haciendo que los requisitos indispensables del mejoramiento de subrasante en vías urbanas se cumplan y estén habilitadas para la construcción del pavimento.

#### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- Determinación de la muestra representativa de la zona de estudio de acuerdo a la clasificación de las muestras analizadas.
- Determinar la máxima densidad seca, la capacidad portante y expansión de la muestra representativa del suelo natural.
- Realizar la mezcla suelo natural con diferentes porcentajes de estabilizante para realizar su evaluación técnica de su máxima densidad seca, su capacidad portante, expansión.
- Evaluar económicamente y ambientalmente cada estabilización.
- Realizar la recomendación del mejor porcentaje de estabilizante, basándose en el estudio técnico, económico y ambiental.

## 1.5. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO



## **1.6. METODOLOGIA DE APLICACIÓN PRÁCTICA.**

## **1.7.ALCANCE.**

Para poder alcanzar los objetivos planteados primero se hará un estudio teórico de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos pretendiendo lograr alcanzar un conocimiento más exacto y profundo de las características que presentan los suelos y de los ensayos que serán necesarios realizar para lograr nuestro estudio.

También se pretende alcanzar el conocimiento teórico y una definición clara de la estabilización, tipos, técnicas y características de los estabilizantes.

Teniendo el conocimiento teórico se harán ensayos de granulometría y plasticidad para la clasificación y determinación de la muestra representativa de la zona de estudio.

Determinada la muestra representativa se harán ensayos de compactación Proctor Modificado T-180, CBR y comprensión simple, para conocer las características iniciales de capacidad portante y expansión del suelo en estado natural.

Teniendo el conocimiento previo de las características actuales que presenta el suelo en la zona de estudio, y basándose en especificaciones de CBR y expansión en normativas locales, se procederá a poner en práctica nuestro estudio realizando estabilizaciones químicas con cemento y cal y estabilización mecánica con material granular.

En la mezcla suelo-cemento se realizara ensayos de compactación, CBR, comprensión simple para determinar técnicamente el aumento de densidad seca máxima, capacidad portante, expansión y deformación.

En la mezcla suelo-cal se realizaran ensayos de Límites de Atterberg, Compactación, CBR, comprensión simple, determinando técnicamente la disminución del índice de plasticidad, expansión y aumento de la capacidad portante.

En la mezcla suelo-granular se realizaran ensayos de compactación y CBR, para determinar técnicamente el aumento de la capacidad portante y la disminución de la expansión del suelo.

Se realizará el cálculo de precios unitarios de la estabilización y de la construcción de las capas sub base, base y de rodadura, para determinar el contenido óptimo de cada estabilizante basado principalmente en su menor costo.

Como resultado de la presente investigación, se pretende llegar a la recomendación referente a la mejor alternativa de estabilizante a usar, que logre técnicamente un aumento en el CBR y la disminución de la expansión de acuerdo a normativas locales, y que económicamente sea el de menor costo y ambientalmente el mas óptimo.

## **CAPITULO II**

### **CARACTERISTICAS FISICAS Y MECANICAS DE LOS SUELOS, SUBRAZANTES.**

#### **2.1. SUELOS.**

##### **2.1.1. Características Generales.**

Suelo, en Ingeniería Civil, son los sedimentos no consolidados de partículas sólidas, fruto de la alteración de las rocas, o suelos transportados por agentes como el agua, hielo o viento con contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva, y que pueden tener materia orgánica. El suelo es un cuerpo natural heterogéneo.

Los suelos se clasifican en suelos orgánicos (su origen es principalmente orgánico), y suelos inorgánicos (producto de la descomposición física o química de las rocas).

La mayor parte de los materiales que forman la fuente original del suelo son las rocas, donde durante millones de años, el hielo, la nieve, el viento y la lluvia han desgastado gradualmente las montañas y el agua ha arrastrado las partes de la roca que se disuelven fácilmente y sobre éstas se han desarrollado plantas que van desintegrando a la roca y dando así comienzo al proceso de formación del suelo.

Cuando producto de la descomposición se encuentra en el mismo lugar, se dice que forman un suelo residual, cuando los productos de la descomposición de las rocas se encuentran fuera de su lugar de origen, se dice que forman un suelo transportado, sin importar el medio de transporte.

a) Suelos residuales.- son los más antiguos, compuestos por los residuos resultantes de la intemperización de la roca, producida por fuerzas químicas, físicas y biológicas. Estos suelos son en general confiables, firmes y estables en climas templados o semiáridos y se presentan a poca profundidad. En cambio en climas húmedos y calientes se presentan a una

profundidad mayor y suelen ser firmes y seguros, pero también pueden estar formados por material altamente comprensible y presentar en estos casos grandes complicaciones.

b) Suelos transportados.- son suelos de origen orgánico, producto de la descomposición de las rocas con contenido de materia orgánica vegetal descompuesta. Son suelos blandos y sueltos que generalmente presentan grandes dificultades técnicas cuando se requiere edificar sobre ellos.

Se cree que hace millones de años el clima era tan frío, que produjo la acumulación de grandes masas de hielo, las cuales al entrar en movimiento, alcanzaron una fuerza capaz de triturar rocas y en su rápido avance estas masas arrastraban, toda partícula suelta de las colinas y montañas, las mezclaban con otras y las extendían sobre el terreno, dando origen a lo que se conoce como un *suelo glacial*. Estos suelos formados por una mezcla de partículas finas, piedras y grandes pedazos de roca, se fueron acumulando durante muchos años debido a los deshielos en los años calurosos y a la congelación en los años fríos. Además cuando el clima en la tierra se fue templado, el hielo de los glaciares empezó a derretirse formando ríos caudalosos, los cuales arrastraban a su paso gravas, limo, arcilla y arenas, que se fueron depositando en las planicies y valles o llevados a lo largo de la corriente. Este tipo de suelos son de composición absolutamente heterogénea y de elevada permeabilidad, en construcciones pesadas pueden correr riesgos a consecuencia de asentamientos diferenciales no uniformes.

Los suelos Eólicos son suelos producidos por el arrastre del viento ó sea son aerotransportables y precipitados por la lluvia, dando origen a dos tipos de suelo el loes y los médanos.

El loes son depósitos acumulados por el viento, no contienen piedras y se encuentran formado principalmente por limos y arenas finas. Por su característica de hidroconsolidación, se constituye en un material peligroso para las fundaciones por que los loes en contacto con el agua producen asentamientos.

Los médanos son acumulaciones de arenas sueltas cuarzosas arrastradas por el viento formado por arenas uniformes con un pequeño contenido de mica.

El conocimiento de las características generales de los suelos, como así de su procedencia y formación nos servirá principalmente para adquirir un conocimiento teórico más exacto y profundo; en un estudio basado en alternativas de mejoramiento por métodos de estabilización de suelos se hace indispensable el conocimiento aún en lo más general de la procedencia y formación de los suelos.

### **2.1.2. Tipos de Suelos.**

#### a) Gravas.

**Definición.-** En geología y en construcción se denomina grava las rocas de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, aunque no existe homogeneidad de criterio para el límite superior. Pueden ser producidas por el hombre, en cuyo caso pueden denominarse como piedra partida o chancada. O pueden ser también gravas naturales en este caso que el desgaste natural producido por el movimiento en los lechos de ríos ha generado formas redondeadas, conocido como canto rodado.

Estos áridos están compuestos de partículas granulares de material pétreo, es decir de piedras de tamaño variable, originado por la fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial. En este último caso actúan los procesos de chancado o triturado utilizados en las respectivas plantas de áridos.

**Aplicación.-** La grava se utiliza como árido en la fabricación de hormigones. También como lastre y revestimiento protector en cubiertas planas no transitables, y como filtrante en soleras y drenajes.

**Obtención.-** como fuente de abastecimiento, se pueden distinguir las siguientes situaciones.

- Bancos de sedimentación.- son los bancos construidos artificialmente para embarcar el material fino-grueso que arrastran los ríos.

- Cauce de río.- corresponde a la extracción desde el lecho del río, en los cuales se encuentra el material arrastrado por el escurrimiento de las aguas.
- Pozos secos.- zonas de antiguos rellenos aluviales en valles cercanos a ríos.
- Canteras.- es la explotación de los mantos rocosos o formaciones geológicas, donde los materiales se extraen usualmente desde cerros mediante lo que se denomina tronadura o voladura (rotura mediante explosivos).

b) Arenas.

**Definición.-** La arena es un conjunto de partículas de rocas disgregadas. En geología se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 mm. Una partícula individual dentro de este rango es llamada grano de arena. Una roca consolidada y compuesta por estas partículas se denomina arenisca.

**Componentes y características.-** El componente más común de la arena, en tierra continental y en las costas no tropicales, es el sílice, generalmente en forma de cuarzo. Sin embargo, la composición varía de acuerdo a los recursos y condiciones locales de la roca.

Según el tipo de roca de la que procede, la arena puede variar mucho en apariencia. Por ejemplo, la arena volcánica es de color negro mientras que la arena de las playas con arrecifes de coral suele ser blanca.

La arena es transportada por el viento, también llamada arena eólica, (pudiendo provocar el fenómeno conocido como calima) y el agua, y depositada en forma de playas, dunas, médanos, etc. En el desierto, la arena es el tipo de suelo más abundante. La granulometría de la arena eólica está muy concentrada en torno a 0,2 mm de diámetro de sus partículas.

La arena se utiliza para fabricar cristal por sus propiedades tales como extraordinaria dureza, perfección del cristal o alto punto de fusión, y, junto con la grava y el cemento, es uno de los componentes básicos del hormigón.

**Atributos físicos.-** El volumen de un grano de arena de cuarzo, de un diámetro de 0,06 mm (el límite inferior), es  $2,51 \times 10^{-10} \text{ m}^3$  con una masa de  $6,66 \times 10^{-4} \text{ g}$  (0,67 mg). En el límite superior, el volumen y la masa de un grano de arena con diámetro de 2,10 mm son  $8,80 \times 10^{-9} \text{ m}^3$  y  $2,33 \times 10^{-2} \text{ g}$  (23 mg).<sup>1</sup>

Ángulo de rozamiento interno o ángulo de reposo.- es el ángulo que forma la superficie del talud natural formado por ese tipo de arena y la horizontal. Este ángulo depende de la forma de los granos y su encaje en forma de estructura. El ángulo de rozamiento interno determina el tamaño de un talud de carreteras o el comportamiento de un cimiento, pues la resistencia que opone el suelo al peso de una edificación está directamente relacionada con este ángulo.

#### c) **Limos.**

**Definición.-** El Limo o Légamo es un material suelto con una granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla. Es un sedimento clástico incoherente transportado en suspensión por los ríos y por el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados. Para que se clasifique como tal, el diámetro de las partículas de limo varía de 0,002 mm a 0,06 mm.

Al no tener cohesión, es un terreno problemático para edificar sobre él, y en obras de arquitectura o ingeniería, es necesario adoptar sistemas especiales de cimentación. Existen dos clases de limos bien identificados:

- Limo orgánico: barro, lodo, restos vegetales.
- Limo inorgánico: con inclusión de polvo de rocas. En este tipo se encuentra el loess pampeano: limo fino sin estratificación.

#### d) **Arcillas.**

**Definición.-** La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedente de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones

según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años.

Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm. En la fracción textural arcilla puede haber partículas no minerales, los fitolitos. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

Se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C. La arcilla endurecida mediante la acción del fuego fue la primera cerámica elaborada por el hombre, y aún es uno de los materiales más baratos y de uso más amplio. Ladrillos, utensilios de cocina, objetos de arte e incluso instrumentos musicales como la ocarina son elaborados con arcilla. También se la utiliza en muchos procesos industriales, tales como en la elaboración de papel, producción de cemento y procesos químicos.

**Clasificación.-** Las arcillas pueden clasificarse de acuerdo al proceso geológico que las originó y a la ubicación del yacimiento en el que se encuentran. Se puede reconocer:

- Arcilla primaria: se utiliza esta denominación cuando el yacimiento donde se encuentra es el mismo lugar en donde se originó. El caolín es la única arcilla primaria conocida.

Dentro del estudio, el conocimiento de los tipos de suelos que se consideran en la Ingeniería Civil, como así de sus propiedades, características, fuentes de explotación y usos, nos servirá para la identificación de los suelos y su ubicación de acuerdo a su diámetro dentro de la granulometría de suelos, que se hace necesaria para poder clasificar e identificar el tipo de suelo con que se ha de trabajar en el estudio que se está realizando.

### **2.1.3. Identificación de los Suelos en el Campo.**

Para un control adecuado de los suelos se necesita su perfecta identificación. La falta de tiempos o de medios hace que frecuentemente sea imposible el realizar detenidos ensayos para poderlos clasificar. Sin embargo en muchas ocasiones, en el campo, un ingeniero con ciertos conocimientos puede efectuar pruebas sencillas como una inspección visual y su examen al tacto que lo llevarán a poder identificar un suelo de manera aproximada.

a) Identificación en el campo de granos gruesos.- los materiales constituidos por partículas gruesas se identifican en el campo de una manera visual. Extendiendo una muestra de suelo sobre una superficie plana y se observa la distribución de partículas, tamaño de las mismas, forma y composición mineralógica. Para distinguir las gravas de las arenas se usa el tamaño de  $\frac{1}{2}$  cm. Como equivalente a la malla N° 4, y para la estimación del contenido de finos basta considerar que las partículas de tamaño correspondiente a la malla N° 200 son las más pequeñas que pueden distinguirse a simple vista.

b) Identificación de suelos finos.- para la granulometría de suelos finos se agita la muestra en agua dentro de un recipiente de vidrio y se deja sedimentar. La granulometría aproximada se determina por la separación de las partículas en el recipiente desde arriba hasta el fondo. Los limos permanecen en suspensión, por lo menos un minuto y la arcilla una hora y más.

El adquirir el conocimiento teórico del procedimiento de identificación de suelos en el campo, zona de estudios o zona de obras, se hace necesario ya que con estos conocimientos el ingeniero mediante pruebas sencillas puede identificar un suelo de una manera aproximada.

Ya que en muchas de las obras y estudios el primer paso es el conocimiento de la área de estudio, se hace necesaria una primera identificación del suelo que compone esta área, para poder hacer5 consideraciones de que tipos de estudios se realizaran de acuerdo al tipo de suelo previamente identificado.

## 2.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECANICAS DE LOS SUELOS.

### 2.2.1. Fases del Suelo, Símbolos y Definiciones.

Por tratarse de un sistema discontinuo de partículas, también llamado un medio poroso, un elemento de suelo se constituye o se le puede considerar formado por tres fases:

- La fase sólida, formada por partículas minerales u orgánicas, o por ambas.
- La fase líquida, formada por el agua, (libre específicamente), aunque en los suelos pueden existir otros líquidos de menor significación; la fase líquida llena parcialmente o totalmente los vacíos del suelo.
- La fase gaseosa, comprende sobre todo el aire, si bien pueden estar presentes otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.); la fase gaseosa llena parcialmente o totalmente los vacíos que deja la fase líquida.

Las fases líquidas y gaseosas del suelo suelen comprenderse en el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida constituye el volumen de los sólidos.

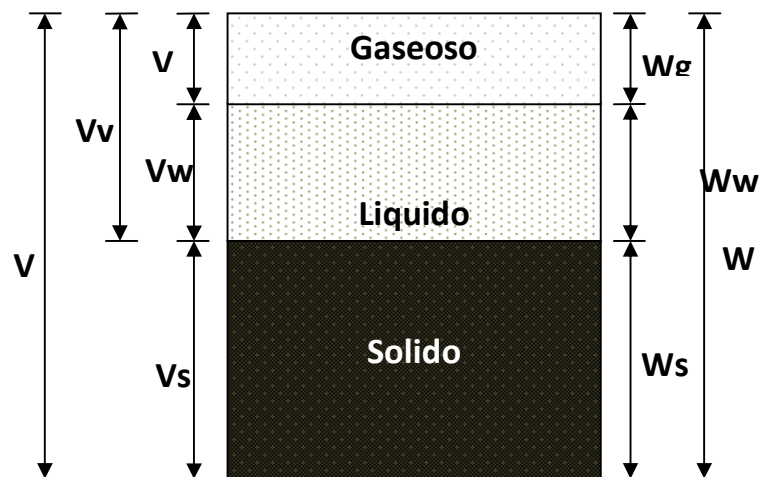


Figura 2.1.

La figura 2.1. Es un esquema donde se representa las tres fases, se han separado las fases con el fin de facilitar la deducción de las relaciones entre ellas; en la parte izquierda de la

figura las fases se han expresado en volumen, mientras que a la derecha se han expresado en peso.

El significado de los símbolos es el siguiente:

$V$  = Volumen total de la muestra de suelo (volumen de la masa).

$V_s$  = Volumen de la fase sólida de la muestra (volumen de sólidos).

$V_v$  = Volumen de los vacíos de la muestra de suelo (volumen de vacíos).

$V_w$  = Volumen de la fase líquida (volumen de agua).

$V_g$  = Volumen de la fase gaseosa (volumen del aire).

$W$  = Peso total de la muestra del suelo (peso de la masa).

$W_s$  = Peso de la fase sólida de la muestra (peso de los sólidos).

$W_w$  = Peso de la fase líquida de la muestra (peso del agua).

$W_g$  = Peso de la fase gaseosa de la muestra, convencionalmente considerado como nulo en mecánica de suelos.

El conocimiento del estado en que se pueden presentar los suelos como así de su terminología y símbolos que se utilizan para representar cada fase, volúmenes y pesos, servirá en nuestro estudio para reforzar nuestro conocimiento de los estados del suelo, con referencia al espacio y volumen, y la terminología o simbología será la que se aplicara en la presente investigación.

## **2.2.2. Relaciones Volumétricas.**

### **2.2.2.1. Relación de Vacíos.**

Se denomina relación de vacíos, oquedad o índice de poros a la relación entre el volumen de los vacíos y el de los sólidos de un suelo.

La relación puede variar teóricamente de 0 ( $V_v = 0$ ) a  $\infty$  (valor correspondiente a un espacio vacío). En la práctica no suelen hallarse valores menores de 0.25 (arenas muy compactadas con finos) ni mayores de 15, en el caso de algunas arcillas altamente comprensibles.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2:1)$$

Donde:

e = relación de vacíos.

V<sub>v</sub> = volumen de vacíos.

V<sub>s</sub> = volumen de los sólidos.

### **2.2.2.2. Porosidad.**

Se llama porosidad de un suelo a la relación entre su volumen de vacíos (volumen de huecos) y el volumen de su masa (volumen total). La porosidad se suele multiplicar generalmente por 100, expresándose así el valor en porcentajes.

Esta relación puede variar de 0 (en un suelo ideal con solo fase sólida) a 100 (espacio vacío). Los valores reales suelen oscilar entre 20% y 95%.

$$n(\%) = \frac{V_v}{V} * 100 \quad (2:2)$$

Donde:

n = Porosidad.

V = Volumen total de la masa de suelo.

V<sub>v</sub> = Volumen de vacíos.

### **2.2.2.3. Grado de saturación.**

Se denomina grado de saturación de un suelo a la relación entre su volumen de agua y el volumen de sus vacíos. Suele expresarse también como porcentaje. Los valores suelen variar de 0 (suelo seco) a 100% (suelo totalmente saturado).

$$G_w (\%) = \frac{V_w}{V_v} * 100 \quad (2:3)$$

Donde:

Gw = Grado de saturación.

Vw = Volumen de agua.

Vv = volumen de vacíos.

Las relaciones volumétricas del suelo nos sirven de referencia en nuestro estudio, principalmente para adquirir un conocimiento más exacto de espacios en términos de volumen que se ven reflejadas en muestras de suelos.

### **2.2.3. Relaciones Gravimétricas.**

#### **2.2.3.1. Humedad.**

Se conoce como contenido de agua o humedad de un suelo, la relación entre el peso de agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida. Suele expresarse como un porcentaje. Los valores pueden variar teóricamente de 0 a  $\infty$ . En la naturaleza la humedad de los suelos varía entre límites muy amplios.

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (2:4)$$

Donde:

w = Humedad del suelo.

Ww = Peso del agua.

Ws = peso de los sólidos.

La humedad y su fórmula es de mucha importancia en nuestro estudio ya que del conocimiento y su aplicación dependerá la determinación de la humedad inicial suelo, a esta se le agregara agua para llegar a valores óptimos para alcanzar densidades y resistencias más elevadas.

#### **2.2.3.2. Peso específico.**

El peso específico aparente o total es, por ejemplo, el peso de un elemento de suelo dividido por el volumen de dicho elemento.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2:5)$$

Donde:

$\gamma$  = Peso específico de la masa del suelo.

W = Peso de la masa de suelo.

V = Volumen de la masa de suelo.

El peso específico es un factor determinante que influye directamente sobre la resistencia que alcanza un suelo, en el estudio se trabajara con densidades máximas alcanzadas a humedades optimas en las diferentes estabilizaciones realizadas, para poder realizar evaluaciones técnicas.

#### **2.2.3.3. Peso específico relativo de una masa de suelo.**

El peso específico relativo se define como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua, a 4 °C, destilada y sujeta a una atmósfera de presión, este valor difiere poco del peso específico del agua en las condiciones reales de trabajo y en muchas cuestiones prácticas, ambos son tomados como iguales, por lo que adoptamos este último para la fórmula respectiva.

$$G_m = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad (2:6)$$

Donde:

G<sub>m</sub> = Peso específico relativo de una masa de suelo.

$\gamma$  = peso específico de la masa de suelo.

$\gamma_w$  = peso específico del agua.

#### **2.2.3.4. Peso específico relativo de los sólidos.**

Se define como la relación entre el peso específico del suelo y el peso específico del agua a una temperatura determinada. Los valores típicos para el peso específico relativo de los sólidos del suelo son entre 2.65 y 2.72.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2:7)$$

Donde:

$G_s$  = Peso específico relativo de los sólidos.

$\gamma_s$  = Peso específico de los sólidos.

$\gamma_w$  = Peso específico del agua.

El conocimiento de las ecuaciones tanto del peso específico relativo de la masa de los suelos y de los sólidos sirve como referencia en nuestro estudio y para adquirir un conocimiento más exacto acerca de los tipos de peso específico que se consideran en la Ingeniería Civil y cuáles de ellos son los que se usan más comúnmente para los estudios realizados en laboratorio de suelos.

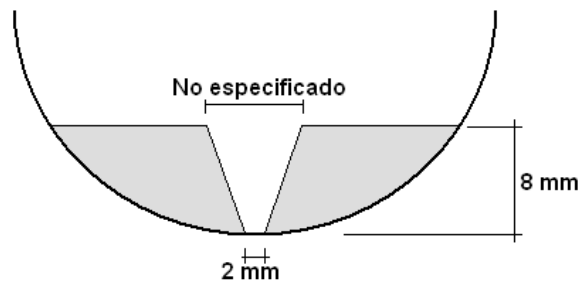
#### **2.2.4. Plasticidad de los Suelos.**

La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg, quien por medio de ellos separó los cuatro estados de consistencia de los suelos coherentes. Los límites se basan en el concepto de que un suelo de grano fino solamente puede existir en cinco estados de consistencia según su humedad.

1. Estado Líquido, con las propiedades y apariencias de una suspensión.
2. Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
3. Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.
4. Estado semisólido, en que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
5. Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

La frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamado por Atterberg Límite Líquido, quien lo determinó de una cierta técnica de laboratorio que consistía en colocar el suelo remoldeado en una cápsula, formando en él una ranura y en hacer cerrar la

ranura golpeando secamente la capsula contra una superficie dura. Según Atterberg el suelo tenía el contenido de agua correspondiente al límite líquido, cuando los bordes inferiores de la ranura se tocaban, sin mezclarse, al cabo de cierto número de golpes.



**Figura 2.2.**

La Figura 2.2. Es el esquema del suelo colocado en la capsula y ranurado para determinar su límite líquido según Atterberg.

La frontera convencional entre los estados plástico y semisólido fue llamado por Atterberg Límite Plástico y definido también en una manipulación de laboratorio. Atterberg rolaba un fragmento de suelo hasta convertirlo en un cilindro de espesor no especificado; el agrietamiento y desmoronamiento del rollito, en un cierto momento, indicaba que se había alcanzado el límite plástico y el contenido de agua en tal momento era la frontera deseada.

Los mencionados límites de Atterberg son: Límite Líquido (L.L.), Límite Plástico (L.P.), y Límite de Contracción (L.C.), y mediante ellos se puede dar una idea del tipo de suelo en estudio. Todos los límites de consistencia se determinan empleando suelo que pase la malla N° 40. La diferencia entre los valores del límite líquido (L.L.) y del límite plástico (L.P.) da el llamado Índice Plástico (I.P.) del suelo. Los límites líquido y plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo, pero el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla.

Cuando no se puede determinar el límite plástico de un suelo se dice que es no plástico (N.P.), y en este caso se dice que el índice plástico es igual a cero. El índice de plasticidad indica el rango de humedad a través del cual los suelos con cohesión tienen propiedades de un material plástico.

Según Atterberg, cuando un suelo tiene un índice plástico (I.P.) igual a cero el suelo es no plástico; cuando el índice plástico es menor de 7, el suelo presenta baja plasticidad; cuando el índice plástico está comprendido entre 7 y 17 se dice que el suelo es medianamente plástico, y cuando el suelo presenta un índice plástico mayor de 17 se dice que es altamente plástico.

#### **2.2.4.1. Límite Líquido.**

El límite líquido se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con la cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De acuerdo con esta definición, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte, pero definida y según Atterberg es de 25 g/cm<sup>2</sup>. La cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula.

Partiendo de la hipótesis de que la pendiente de la relación número de golpes a contenido de agua representada a escala semilogarítmica es una línea recta, en la cual el límite líquido puede ser obtenido a partir de cualquier punto de la curva, Lambe sugirió el empleo de la siguiente expresión:

$$L.L. = w * \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad (2:8)$$

Donde:

L.L. = Límite líquido calculado del suelo.

w = Porcentaje de humedad arbitraria del suelo con respecto al peso seco.

N = Número de golpes necesario para cerrar la ranura en la copa de Casagrande, correspondiente a w.

La fórmula de Lambe puede ser usada con suficiente grado de precisión en el cálculo del límite líquido de un suelo, siempre y cuando se amase la pasta de suelo con un contenido de humedad tal que se cumpla con la condición imprescindible de que N (número de golpes) este comprendido entre 20 y 30.

El conocimiento teórico y procedimiento de determinación del mismo es indispensable en nuestro estudio ya que forma parte dentro de los estudios necesarios para poder realizar una clasificación de suelos.

Con el valor encontrado del Limite Liquido nosotros entramos en tablas y diagramas AASHTO y SUCS para poder clasificar el suelo en estudio teniendo un previo conocimiento de la granulometría de los suelos.

#### **2.2.4.2. Límite plástico.**

El límite plástico se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico. Para determinar el límite plástico, generalmente se hace uso del material que, mezclado con el agua, ha sobrado de la prueba del límite líquido y al cual se le evapora la humedad por mezclado hasta tener una mezcla plástica que sea fácilmente moldeable. Se forma luego una pequeña bola que debería rodillarse en seguida en la palma de la mano o con la ayuda de una placa de vidrio aplicando suficiente presión a fin de formar filamentos o rollitos.

Cuando el diámetro del filamento sea de 3 mm aproximadamente  $1/8''$ , observar si el filamento presenta pequeñas rajaduras en ese diámetro. En el caso que el filamento al alcanzar un diámetro de 3 mm no presentara ninguna rajadura, quiere decir que el suelo todavía contiene mucha humedad, entonces se deberá manipular el filamento formando otra bola y seguidamente empezar a hacer el filamento de nuevo. Una vez que el filamento a los tres milímetros, presente agrietamientos, nos indicara que se encuentra con la humedad del límite plástico. Los suelos que no pueden rodillarse con ningún contenido de humedad se consideran como no plásticos (N.P.).

De los filamentos que han alcanzado la humedad del límite plástico se cortan trocitos del material y seleccionando aquellos que se encuentran con las rajaduras, se procederá a pesarlos y luego a introducirlos al horno para su correspondiente secado, luego se toma el peso del material seco y se determina la humedad correspondiente al límite plástico con la siguiente fórmula.

$$L. P. = \frac{(Ph - Ps)}{Ps} * 100 = \frac{Pw}{Ps} * 100 \quad (2:9)$$

Donde:

L.P. = Humedad correspondiente al límite plástico en %.

Ph = Peso de los trocitos de filamentos húmedos en gramos.

Ps = peso de los trocitos de filamentos secos en gramos.

Pw = Peso del agua contenida en los filamentos pesados en gramos.

El límite plástico es muy afectado por el contenido orgánico del suelo, ya que eleva su valor sin aumentar simultáneamente el límite líquido. Por tal razón los suelos con contenido orgánico tienen bajo índice plástico y límites líquidos altos.

La determinación del Límite plástico y su ensayo necesario para su determinación son necesarios en nuestro estudio por que sirven como complementación en la determinación de la plasticidad de suelos.

#### **2.2.4.3. Índice de plasticidad.**

Se denomina Índice de Plasticidad o Índice Plástico (I.P.) a la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico, e indican el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico tal como lo definen los ensayos.

El Índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo. Comparando el índice de plasticidad con el que marcan las especificaciones respectivas, se puede decir si un determinado suelo presenta las características adecuadas para cierto uso.

La fórmula del índice plástico es:

$$I. P. = L. L. - L. P. \quad (2:10)$$

El conocimiento de la ecuación para la determinación del Índice Plástico será necesario en nuestro estudio ya que de este valor depende también la clasificación de nuestro suelo por los métodos SUCS y AASHTO.

#### 2.2.4.4. Límite de contracción.

Se define el Límite de Contracción de un suelo como el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, con la cual una reducción de agua no ocasiona ya disminución en el volumen del suelo. La diferencia entre el límite plástico y el límite de contracción se llama Índice de Contracción (I.C.) y señala el rango de humedad para el cual el suelo tiene una consistencia semisólida.

Para la obtención del límite de contracción, Terzaghi sugirió un método que esencialmente consiste en medir el peso y el volumen de una muestra de suelo totalmente seca, de tal manera que puede decirse que el límite de contracción sería la humedad de la muestra seca si tuviese sus vacíos llenos de agua.

La fórmula del límite de contracción es la siguiente:

$$L. C. = \frac{P_h - P_s (V_h - V_s) \gamma_w}{P_s} * 100 \quad (2:11)$$

Donde:

$P_h$  = Peso húmedo.

$P_s$  = Peso seco.

$V_h$  = Volumen de la muestra húmeda.

$V_s$  = Volumen de la muestra seca.

$\gamma_w$  = Densidad del agua.

#### 2.2.4.5. Consistencia relativa.

La consistencia relativa de los suelos cohesivos, se obtiene en función de los límites de consistencia.

Su fórmula es:

$$C.R. = \frac{L.L.-w}{I.P.} \quad (2:12)$$

Donde:

C.R. = Consistencia relativa.

w = Humedad del suelo en estado natural.

L.L.= Limite liquido.

I.P. = Índice plástico.

Si la consistencia relativa resulta negativa, o sea cuando la humedad del suelo sea mayor que la de su límite líquido, el amasado del suelo lo transforma en un barro viscoso. Consistencias relativas muy cercanas a cero indican un suelo con esfuerzo a ruptura ( $q_u$ ) a compresión axial no confinada, comprendido entre 0.25 y 1.0 kg/cm<sup>2</sup>.

En general el esfuerzo de corte de un suelo crece a medida que la consistencia relativa varía de 0 a 1. Tal como se indica en la siguiente tabla.

**Consistencia Relativa**

<b>C.R.</b>	<b>Descripción.</b>
0.00 a 0.25	Suelo muy suave
0.25 a 0.50	Suelo suave
0.50 a 0.75	Suelo de consistencia media
0.75 a 1.00	Suelo de consistencia rígida.

**Tabla 2.1**

La tabla 2.1.- indica la descripción del tipo de suelo de acuerdo al rango de variación del valor de la consistencia relativa.

#### **2.2.4.6. Índice de liquidez.**

En los suelos plásticos el Índice de Liquidez es indicativo de la historia de los esfuerzos a que ha estado sometido el suelo. Si el valor del Índice de Liquidez es cercano a cero, se considera que el suelo esta pre consolidado, y si es cercano a uno entonces se lo considera como normalmente consolidado.

Si la humedad inicial de un suelo correspondiente a un índice de liquidez igual a 0.2 o más, el suelo, aun altamente plástico, tendrá poca o nula expansión.

La fórmula para obtener el índice de liquidez es:

$$I_L = \frac{w-L.P.}{I.P.} \quad (2:13)$$

Donde:

$I_L$  = Índice de liquidez.

w = Humedad del suelo en estado natural.

L.P. = Limite plástico.

I.P. = Índice de plasticidad.

#### **2.2.5. Clasificación de Suelos.**

Un sistema de clasificación de los suelos es un ordenamiento de los diferentes suelos en grupos que tienen propiedades similares. El propósito es dar facilidades para estimar las propiedades o aptitudes de un suelo por comparación con suelos de la misma clase cuyas propiedades se conocen, y para tener un método, preciso para la descripción del suelo.

Dada la gran variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, la mecánica de suelos ha desarrollado algunos métodos de los mismos. Cada uno de estos métodos tiene, prácticamente, su campo de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado. Y así se tiene la clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas, la clasificación de la Asociación Americana de Funcionarios de los Caminos Públicos (AASHTO) (American Association State Highway Officials), la clasificación de la Administración Aeronáutica Civil (C.A.A.), el sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), etc.

La existencia de esta variedad de sistemas de clasificación de suelos se debe, posiblemente, a diferentes puntos de vista. Sin embargo, lo que es fundamental es el hecho de cualquier

clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes debe estar basada en las propiedades mecánicas de los suelos, ya que estas son elementales en las variadas aplicaciones de la ingeniería.

#### **2.2.5.1. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S).**

Este sistema fue presentado por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en 1942 para aeropuertos.

Los suelos se dividen primeramente en dos clases: de granos gruesos y de granos finos. Los suelos de granos gruesos tienen más del 50%, en peso, de granos más gruesos que 0.074 mm (Tamiz N° 200). Estos suelos se representan por el símbolo G, si más de la mitad, en peso, de las partículas gruesas, son más gruesas que 4.76 mm (tamiz N°4) y por el símbolo S si más de la mitad son más finas que 4.76 mm (tamiz N°4).

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

Los suelos de grano fino (más de la mitad más finos que 0.074 mm) se dividen en tres grupos: C, arcillas, M, limos y arcillas limosas; O, limos y arcillas orgánicas. Estos símbolos están seguidos por una segunda letra que denota el límite líquido o la compresibilidad relativa: L, límite líquido menor que 50; H, límite líquido que excede a 50.

La clasificación de suelos y el encasillamiento del mismo en el grupo considerado por la metodología SUCS será determinante para nuestro estudio ya que se tendrá un conocimiento exacto del suelo a tratar en nuestro estudio y de sus características de este de acuerdo a la clasificación SUCS.





### 2.2.5.2. AASHTO.

El sistema de clasificación AASTHO actualmente en uso se muestra en la tabla 2.2, De acuerdo a esta tabla el suelo se clasifica en siete grupos mayores del: A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan el tamiz N° 200. Los suelos de los que más del 35% pasan el tamiz N° 200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. La mayoría están formados por materiales tipo limo y arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios.

#### 1. Tamaño del grano.

Grava: fracción que pasa la malla de 75 mm y es retenida en la malla N° 10 (2 mm).

Arena: fracción que pasa la malla N° 10 (2 mm) y es retenida en la malla N° 200 (0.075 mm).

#### 2. Plasticidad.

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

#### 3. De acuerdo a la forma y tamaño del canto.

Si en los cantos de forma rodada o boleos (tamaños mayores de 75 mm) están presentes, éstos se excluyen de la porción de la muestra de suelo que se está clasificando. Sin embargo el porcentaje de tal materia se registra.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra que pasa la malla No. 200)						
	A-1			A-2			
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por cribado (porcentaje que pasa las mallas)							
No. 10	50 máx.						
No. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
No. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción que pasa la malla No. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos							
	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Tasa general de los subrasantes				De excelente a bueno			
Clasificación general	Materiales limo-arcilla (más del 35% de la muestra que pasa la malla No. 200)						
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†			
Análisis por cribado (porcentaje que pasa por las mallas)							
No. 10							
No. 40							
No. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.			
Características de la fracción que pasa por la malla No. 40							
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.			
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.			
Tipos usuales de materiales componentes significativos							
	Suelos limosos		Suelos arcillosos				
Tasa general de los sobrantes			De mediano a pobre				
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$							
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$							

**Tabla 2.3**

Para clasificar un suelo de acuerdo con la tabla 2.3. los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por un proceso de eliminacion, el primer grupo desde la izquierda en que los datos de prueba se ajusten, es la clasificacion correcta.

### 2.2.6. Índice de Grupo.

Para la evaluacion de la calidad de un suelo como material de subrazante de carreteras, se incorpora un número llamado índice de grupo (I.G.) junto con los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe en parentesis después de la designacion de grupo o de subgrupo. El indice de grupo esta dado por la ecuacion:

$$I.G. = (F - 35)[0.2 + 0.005(L.L. - 40)] + 0.01(F - 15)(I.P. - 10) \quad (2:14)$$

Donde:

F = Porcentaje que pasa la malla N° 200.

L.L. = Límite líquido.

I.P. = Índice de plasticidad.

El primer término de la ecuación (2:14), es el índice de grupo parcial determinado a partir del límite líquido. El segundo término es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad. Se deberá tomar en cuenta las siguientes consideraciones para determinar el índice de grupo.

1. Si la ecuación (2:14) da un valor negativo para I.G. este se toma igual a cero.
2. El índice de grupo calculado en la ecuación (2:14) se redondea al número entero más cercano (por ejemplo, I.G. = 3.4 redondear a 3; I.G. = 3.5 redondear a 4).
3. No hay límite superior para el índice de grupo.
4. El índice de grupo de suelos que pertenecen a los grupos A-1-a, A-1b, A-2-4, A-2-5 y A-3 siempre es cero.
5. Al calcular el índice de grupo para suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, uso el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad.

$$I.G. = 0.01(F - 15)(I.P. - 10) \quad (2:15)$$

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

Es otro de los sistemas más comunes utilizados en la clasificación de suelos y la subdivisión de estos en grupos de acuerdo a las fracciones que pasan en los diferentes tamices de distintos diámetros.

Se aplicará la clasificación para determinar el tipo de suelo y las opciones de estabilizantes que se adecuen mejor a las características del suelo estabilizado.

### **2.2.7. Compactación.**

La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. La compactación disminuye también la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes.

En general la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como agente ablandador de las partículas de suelo, que hace que se deslicen entre si y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua.

Si tenemos en nuestra muestra un contenido de agua igual a cero ( $w = 0$ ), el peso específico húmedo será igual al peso específico seco ( $\gamma_h = \gamma_s$ ).

$$\gamma_h = \gamma_{s(w=0)} = \gamma_s$$

Cuando el contenido de agua es gradualmente incrementado y se usa el mismo esfuerzo compactador para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en un volumen unitario crece en forma gradual. Por ejemplo en  $w = w_1$ , el peso específico húmedo es igual a:

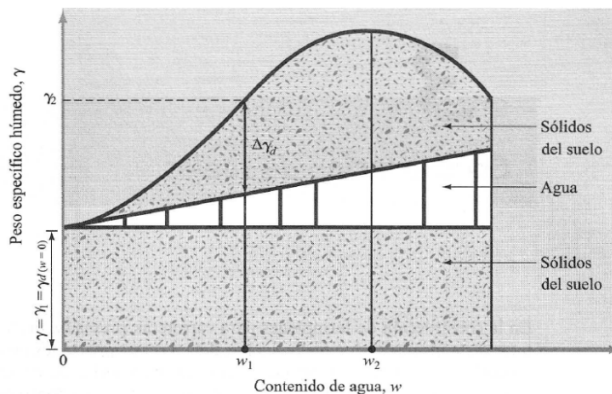
$$\gamma = \gamma_2$$

Sin embargo el peso específico seco bajo este contenido de agua está dado por:

$$\gamma_{s(w=w_1)} = \gamma_{s(w=0)} + \Delta\gamma_d$$

Más allá de un cierto contenido de agua  $w = w_2$ , cualquier incremento en el contenido de agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas solidas. El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama contenido de agua óptimo.

La prueba de laboratorio usada generalmente para obtener el peso específico seco máximo de la compactación y el contenido de agua óptimo es la prueba Proctor de compactación.



**Figura 2.3.**

La figura 2:3.- muestra como hasta un cierto contenido de agua ( $w = w_2$ ) incrementa el peso específico seco del suelo, ya que este contenido de agua da lugar a que las partículas del suelo se acomoden en un empaque más denso. Y a un mayor contenido de agua se observa que el peso específico seco va decreciendo.

El ensayo de compactación servirá para determinar la humedad óptima tanto del suelo natural, el suelo que ya se encuentra con ripio en la zona de estudio y el suelo mezclado con los estabilizantes y poder determinar así su máxima densidad seca alcanzada.

Con ésto es posible evaluar las curvas generadas de compactación y determinar que estabilizante logra alcanzar valores más altos de densidad a menores contenidos de humedad, realizando una comparación técnica principalmente con el suelo con ripio que no está sometido a una buena compactación.

### 2.2.7.1. Compactación Proctor Estándar.

En la prueba Proctor Estándar, el suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de 943.3 cm<sup>3</sup>. El diámetro del molde es de 101.6 mm. Durante la prueba de laboratorio el molde se une a una placa de base en el fondo y a una extensión en la parte superior (figura 2:4a).

El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego se compacta en tres capas iguales por medio de un pistón (figura 2:4b) que transmite 25 golpes a cada capa. El pistón pesa 5.5 lb. y tiene una altura de caída 304.8 mm. Para cada prueba el peso específico húmedo  $\gamma_h$  de compactación se calcula como:

$$\gamma_h = \frac{W}{V_m} \quad (2:16)$$

Donde:

$\gamma_h$  = Peso específico húmedo.

W = Peso del suelo compactado en el molde.

$V_m$  = Volumen del molde.

Para cada prueba, el contenido de agua del suelo compactado se determina en el laboratorio. Con un contenido de agua conocido, el peso específico seco  $\gamma_s$  se calcula con la ecuación.

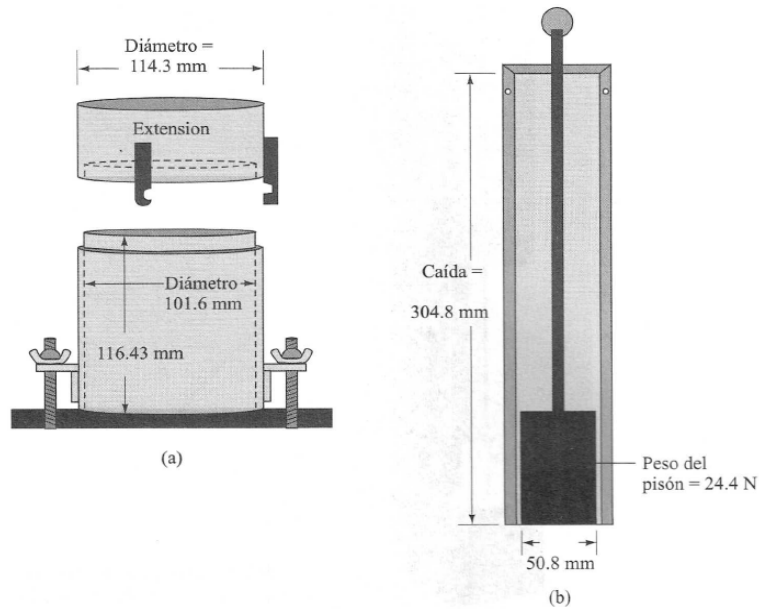
$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{w\%}{100}} \quad (2:17)$$

Donde:

$\gamma_s$  = peso específico seco.

W% = porcentaje de contenido de agua.

Los valores de  $\gamma_s$  determinados en la ecuación (2:17) se grafican contra los correspondientes contenidos de agua para obtener el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo del suelo.



**Figura 2.4a y 2.4b**

La figura 2.4a y 2.4b.- muestra las dimensiones del molde y del pistón para la prueba Proctor estándar.

### 2.2.7.2. Compactación Proctor modificado.

Con el desarrollo de los rodillos pesados y su uso en la compactación de campo, la prueba Proctor Estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. A esta se le llama prueba Proctor Modificado. Para llevar a cabo la prueba Proctor Modificado se usa un molde con un volumen de  $2316.67 \text{ cm}^3$ .

El diámetro del molde es de 15.24 cm (aproximadamente 6") y de una altura sin el collarín de 12.7 cm (aproximadamente 5"). El suelo también se mezcla con cantidades variables de agua y en este caso se realizara la compactación en 5 capas iguales por medio de un pistón que trasmite 56 golpes por cada capa. El pistón tiene un peso de 10 lb. Y una altura de caída libre de 457.2 mm.

Debido a que se incrementa el esfuerzo de compactación, la prueba Proctor Modificado resulta en un incremento del peso específico seco máximo del suelo.

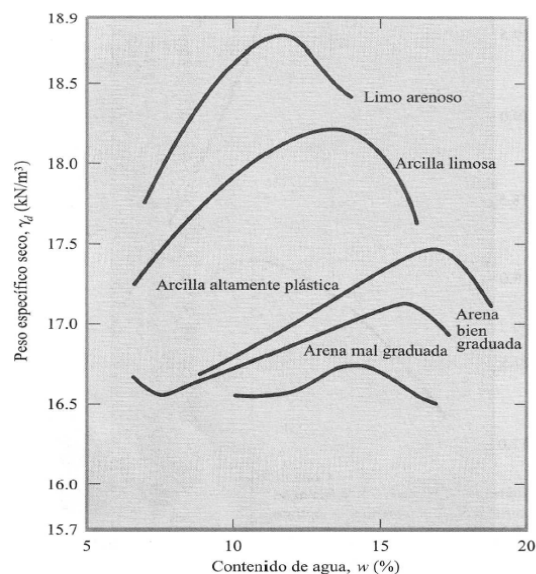
El incremento del peso específico máximo es acompañado por un decremento del contenido de agua óptimo.

### 2.2.7.3. Factores que afectan la compactación.

El contenido de agua tiene una gran influencia en el grado de compactación logrado para un suelo dado.

Además de esto otros factores importantes que afectan la compactación son el tipo de suelo y el esfuerzo de compactación (energía por volumen unitario).

Efectos del tipo de suelo.- la distribución granulométrica, la forma de los granos del suelo, la densidad de los sólidos del suelo, la cantidad y tipo de minerales arcillosos presentes, tienen una gran influencia en el peso específico seco máximo y en el contenido de agua óptimo.



**Figura 2:5**

La figura 2.5.- nos muestra curvas típicas e compactación para cinco suelos diferentes.

Se puede observar en la figura 3:5 que para arenas, el peso específico tiene una tendencia general a decrecer primero, conforme el contenido de agua crece, y luego a incrementarse a un valor máximo con aumentos de agua. El decremento inicial del peso específico seco con un incremento del contenido de agua se atribuye al efecto de la tensión capilar.

#### **2.2.8. Densidad del Suelo.**

En el suelo, como en cualquier otro cuerpo físico, la densidad se define como la masa por unidad de volumen. Ahora bien, dado su carácter poroso, conviene distinguir entre la densidad de sus componentes sólidos y la del conjunto del suelo, incluyendo los huecos, por ello nos referiremos a dos tipos de densidad.

##### **Densidad real.**

Se designa de esta forma a la densidad de la fase sólida. Es un valor muy permanente pues la mayor parte de los minerales arcillosos presentan una densidad que está alrededor de 2.65 gramos por centímetro cúbico. Muy semejante es la de los minerales más abundantes en las arenas, como cuarzo, feldspatos, etc. Los carbonatos presentan una densidad algo menor así como la materia orgánica, que puede llegar a valores de 0.1; por lo que en horizontes muy orgánicos o carbonatados habría que reconsiderar el valor anterior, fundamentalmente en los primeros en los que puede calcularse aplicando los valores citados a los contenidos relativos de fracción mineral y orgánica.

##### **Densidad aparente.**

Refleja la masa de una unidad de volumen de suelo seco y no perturbado, para que incluya tanto a la fase sólida como a la gaseosa englobada en ella. Para establecerla debemos tomar un volumen suficiente para que la heterogeneidad del suelo quede suficientemente representada y su efecto atenuado.

Es muy variable según el suelo, incluso en cada uno de los horizontes porque depende del volumen de los poros. Si el suelo es compacto, la densidad sube.

Su valor nos permite establecer equivalencias entre las relaciones masa/masa, que son la forma habitual de medir los parámetros del suelo, y las masa/superficie que son las utilizadas en la aplicación de aditivos al mismo para corregir sus deficiencias.

Si queremos adicionar un determinado porcentaje de un elemento establecido, hemos de conocer la masa de suelo que corresponde a una superficie definida para un espesor concreto.

#### **2.2.8.1. Densidad in situ.**

Esta determinación se realiza a efectos de comprobar el grado de compactación en rellenos compactados artificialmente.

Resulta una evaluación muy necesaria en el caso de suelos sin cohesión (gravas y arenas), los cuales, generalmente no permiten la obtención de muestras inalteradas, y mediante la densidad in situ se puede reproducir el suelo natural en la densidad natural a partir de una muestra alterada.

Existen diferentes procedimientos, entre ellos:

- El Densímetro de Washington
- Método del Cono de Arena (Nch 1516)

Estos métodos consisten en realizar un orificio en el suelo para determinar el peso seco del material y el volumen que ocupaba dicho material.

Otros métodos tradicionales son:

- Método del Balón de Goma.
- Método de los Bloques.
- Sumersión en Parafina.

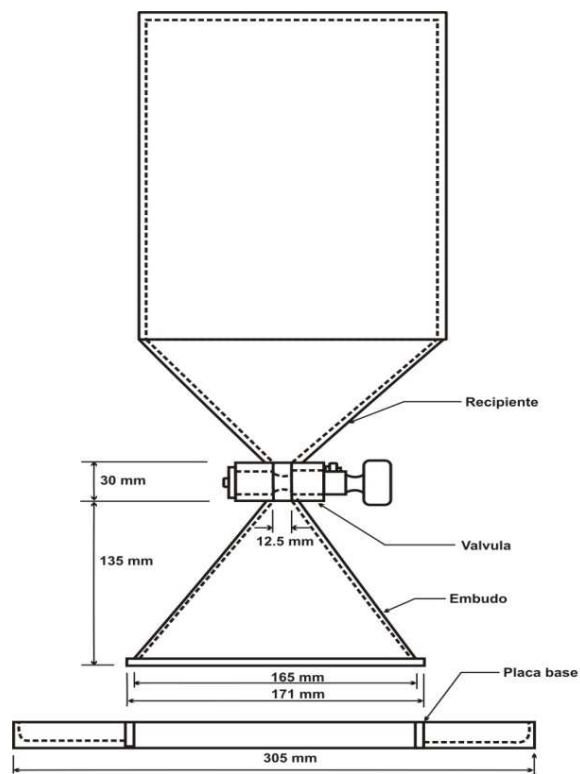
y otros métodos, en los cuales todos coinciden en el modo de obtención del peso seco del suelo natural, pero difieren en la determinación del volumen.

- **Método del Cono de Arena (Nch 1516).**

Este es el método lejos más utilizado. Representa una forma indirecta de obtener el volumen del agujero utilizando para ello, una arena estandarizada compuesta por partículas cuarzosas, sanas, no cementadas, de granulometría redondeada y comprendida entre las mallas N° 10 (2 mm) y N° 35 (0.5 mm).

**Equipo.**

El aparato cono de arena está compuesto por una válvula cilíndrica de 12.5 mm de abertura. Con un extremo terminado en embudo y el otro ajustado a la boca de un recipiente de aproximadamente 4 litros de capacidad. El aparato deberá llevar una placa base, con un orificio central de igual diámetro al del embudo.



**Figura 2.6**

La figura 2.6.- nos muestra al cono y su placa base con sus dimensiones estandarizadas.

## **Procedimiento.**

Para la determinación de la densidad in situ previamente se deberá realizar las siguientes calibraciones en laboratorio.

- Calibración del frasco.- obtener el peso del equipo (cono y frasco), agregar agua hasta la llave de paso y obtener el peso del equipo más agua, realizando la resta del peso del equipo al último peso logramos obtener el peso del agua y con ese dato adquirimos el volumen del equipo.
- Calibración de la arena.- llenar el equipo con arena desde una altura de 2” por arriba del cono en forma constante y haciendo girar el frasco sobre su propio eje de manera que el acomodamiento de la arena sea uniforme en toda la sección del frasco. Pesar el equipo más la arena llena hasta la llave de paso, y se obtiene el peso de la arena pura. Se calcula la densidad de la arena realizando la división del peso de la arena entre el volumen del frasco. Luego voltear el equipo y abrir la llave para que la arena llene el cono, luego pesar nuevamente el equipo con el saldo de arena, la diferencia entre el peso de equipo lleno de arena y después de llenar el cono, nos proporciona el peso de la arena en el cono.
- Metodología en el campo.- Se instala la placa en el lugar seleccionado y se procede a escavar un hoyo de una profundidad de 15 a 20 cm, procurando guardar todo el material extraído en un recipiente donde este no pierda humedad. Se vuelca el equipo y se deja caer la arena hasta que el hueco y el cono se llenen, se procede a cerrar la llave y a pesar el cono con el saldo de arena.

El estudio de la densidad del suelo se aplica principalmente en los ensayos de compactación para la determinación de la densidad máxima húmeda y seca, y el ensayo explicado de la determinación de la densidad in situ nos sirve como referencia en nuestros estudios como metodología aplicada actualmente para el conocimiento real de la densidad del suelo en el lugar de la obra.

### 2.2.9. Capacidad Portante del Suelo.

El ensayo CBR mide la resistencia de corte (esfuerzo cortante) bajo condiciones de humedad y densidad controlada.

Se aplica para la evaluación de la calidad relativa de los suelos de subrasante, algunos materiales de sub bases y bases granulares, que contengan solamente una pequeña cantidad que pasa el tamiz de 50 mm. Y que es retenido en el tamiz de 20 mm recomendado que esta fracción no exceda el 20%.

El numero de CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria  $\text{Kg/cm}^2$ , necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (con un área de  $19.4 \text{ cm}^2$ ) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado, la ecuación que expresa el CBR es:

$$CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patron}} * 100 \quad (2:18)$$

Donde los valores de la carga unitaria patrón que se deben utilizar son:

PENETRACIÓN		CARGA UNITARIA PATRÓN		
mm	pulgada	Mpa	Kg./cm2	Psi
2,54	0,1	6,9	70	1000
5,08	0,2	10,3	105	1500
7,62	0,3	13,1	133	1900
10,16	0,4	15,8	162	2300
12,7	0,5	17,9	183	2600

La tabla 2.4.- Da diferentes valores de la carga unitaria patrón a ser utilizados en la formula (2:18) de acuerdo a los valores de penetración presentados.

El número de CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.54 mm (0.1 pulgadas), sin embargo si el valor del CBR para una penetración de 5.08 (0.2 pulgadas) es mayor, dicho valor debe aceptarse como valor final.

El ensayo de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente utilizados como bases y sub rasantes, bajo el pavimento de carreteras y aeropistas. La siguiente tabla da una clasificación típica.

<b>C.B.R.</b>	<b>Clasificación.</b>
0-5	Subrasante muy mala.
5-10	Subrasante mala.
10-20	Subrasante regular a buena.
20-30	Subrasante muy buena.
30-50	Sub base buena.
50-80	Base buena.
80-100	Base muy buena.

Tabla 2.5.- Clasificación de la calidad de la subrasante de acuerdo al valor de C.B.R.

Ref.: Mecánica de Suelos y Cimentaciones (Carlos Crespo Villalaz)

### **2.2.9.1. Expansión del suelo.**

La expansión del suelo es una propiedad física, que puede evaluarse en una cimentación. En las estructuras constructivas existe hinchamiento del suelo cuando aumenta su cantidad de agua y se retraen cuando la disminuyen.

Las arcillas expansivas pueden producir empujes horizontales y verticales afectando las cimentaciones, empujando muros, y destruyendo pisos y tuberías enterradas, con esfuerzos que superar los 20 kg. /cm<sup>2</sup>. En las vías el efecto de la expansión y retracción del suelo pueden provocar ascensos y descensos de los mismos, provocando un mal funcionamiento y haciendo que taludes fallen.

Mecanismos del hinchamiento:

- a) Absorción del agua por una arcilla activa.
- b) Rebote elástico de las partículas del suelo.
- c) Repulsión eléctrica de los granos de arcilla y de sus cationes adsorbidos.
- d) Expansión del aire atrapado en los poros.

En las arcillas pre consolidadas, por cargas o por desecación, estos fenómenos son altamente contribuyentes. En arcillas normalmente consolidadas o cargadas los factores dominantes son:

- a) Adsorción del agua.
- b) Repulsión eléctrica entre las partículas rodeadas de agua.

La expansión del suelo ha demostrado que es un factor importante en el diseño de la cimentación de cualquier estructura y sobre todo para la prevención de la inestabilidad.

Para la determinación de porcentaje de expansión dentro de la prueba CBR se deberá seguir los siguientes pasos.

- Se deberá tomar el peso del material compactado más su molde según la compactación aplicada (compactación Proctor Modificado).
- Se colocara un papel filtro sobre la muestra y pesas de un valor de 10 Libras.
- Con la ayuda de un extensómetro se tomara una medida inicial de la muestra se deberá tomar en cuenta que todas las mediciones se las realicen en el mismo lugar.
- Se someterá la muestra a saturación, y cada 24 horas durante un periodo de 96 horas (4 días) se deberán tomar lecturas con la ayuda del extensómetro.

- El cálculo para el porcentaje de expansión obedece a la siguiente fórmula.

$$\% \text{ exp} = \frac{|L_f - L_i|}{h} * 100 \quad (2:19)$$

Donde:

%exp= porcentaje de expansión.

Lf = lectura final del extensómetro (cm).

Li = lectura inicial del extensómetro (cm).

h = altura total del espécimen.

- Se deberá graficar en el eje de abscisas y los pesos unitarios de las muestras secas en el eje de las ordenadas, se considerara la densidad máxima para sacar la expansión al 100% de la densidad máxima, cortando con la horizontal este valor a la curva y perpendicular al valor de la expansión.

#### **2.2.9.2. Resistencia a la penetración.**

La determinación de la resistencia a la penetración en el ensayo de CBR, deberá seguir el siguiente procedimiento de laboratorio.

- Se deberá drenar la muestra sometida previamente a saturación.
- Instalar el molde en la prensa y asentar el pistón de penetración sobre el espécimen.
- Aplicar la carga del pistón de manera que la velocidad de penetración se de 1.25 (mm/min) en aquellos suelos donde se demuestre a través de ensayos comparativos que el cambio de velocidad no altera el resultado del ensayo.
- Anotar las cargas en para la penetración según la tabla:

PENETRACIONES			CARGAS
VELOCIDAD DE PENETRACIÓN			
1,25 mm/min	1 mm/min	1 mm/min	
mm	pulgada	mm	
0,63	0,025	0,5	P1
1,25	0,05	1	P2
1,9	0,075	1,5	P3
2,5	0,1	2	P4
3,1	0,125	2,5	P5
3,75	0,15	3	P6
4,4	0,175	3,5	P7
5	0,2	4	P8
7,5	0,3	4,5	P9
10	0,4	5	P10
12,5	0,5	7,5	P11
-	-	10	P12
-	-	12	P13

La tabla 2.6.- Sirve de referencia para la anotación de las cargas observadas durante la medición de la penetración, cargas que sirven para la determinación del CBR.

Se deberán graficar las siguientes curvas:

#### *Curva carga-penetración*

- Se realiza una escala correspondiente considerando los valores máximos y mínimos de la carga por centímetro cuadrado.
- Se pintan los puntos, haciendo que las abscisas sean los valores de penetración y las ordenadas las cargas aplicadas. Luego estos puntos se deben unir con líneas respetando su nacimiento.
- Si es que una curva nace desde el eje de las penetraciones, se mide la distancia hacia el origen, luego esta distancia se mide desde los valores de 0.1" y 0.2" hacia la derecha, levantando perpendiculares de las abscisas hasta la curva, entonces nos dará un nuevo valor de la carga aplicada y por lo tanto un CBR, corregido.

- Si es que la curva presenta concavidad hacia arriba, entonces se debe trazar una tangente por el punto de inflexión de la misma y cortar a las abscisas, entonces este punto será el nuevo origen de la curva procedimiento a los pasos de las indicaciones anteriores.

*Curva: CBR-PESO UNITARIO*

- Se dibuja considerando escalas adecuadas, entonces como abscisas se representan los CBRs, y como ordenadas los pesos unitarios secos.
- En este gráfico se debe identificar la densidad máxima, con una línea horizontal cortar a la curva e inmediatamente con una perpendicular encontrar el valor del CBR al 100% de la densidad máxima.
- Se puede calcular otros CBR, bastando sacar el porcentaje requerido (95%, 90% etc.) a la densidad máxima e ir nuevamente a la grafica.

La determinación del CBR, y la expansión se aplica al suelo natural, y al suelo estabilizado con los diferentes estabilizantes elegidos para poder determinar valores mínimos requeridos fijados en tablas ya establecidas y valores óptimos de estabilizante.

Con este ensayo también podemos determinar qué porcentaje de hinchamiento se produce en estos suelos ya que están sometidos a saturación de agua por cuatro días consecutivos analizando así que deformabilidad pueden presentarse en estos suelos naturales o modificados.

### **2.2.10. Compresión Simple.**

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

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

Debido a la compleja y variable naturaleza de los suelos, en especial a lo referido a la resistencia al esfuerzo cortante, existen muchos métodos de ensayo para evaluar sus características. Aún cuando se utilizan otros métodos más representativos como el triaxial, el ensayo de compresión simple el objetivo buscado sin tener que hacer un método tan complejo ni usar un equipo tan complejo que a veces puede ser inaccesible, lo que significaría un mayor costo. Este método es aplicable a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que admiten su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o suelos cementados. Los suelos secos friables, los materiales fisurados, laminados o varvados, los limos, las turbas y las arenas no pueden ser analizados por este método para obtener valores significativos de la resistencia a la compresión no confinada.

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

#### **2.2.10.1. Ensayo de compresión simple.**

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

$$q_c = \frac{q_u}{2} \quad (2:20)$$

Donde:

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

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

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

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

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

Como el ensayo de compresión simple en arcillas relativamente impermeables se efectúa cargando la probeta con bastante rapidez, resulta que en definitiva, constituye también un ensayo sin drenaje si dicha arcilla está saturada. Según el valor de resistencia máxima a compresión simple, una arcilla se puede clasificar del modo que se indica a continuación.

CONSISTENCA DEL SUELO	CARGA ÚLTIMA (Kg./cm <sup>2</sup> )
Muy blanda	< 0.25
Blanda	0.25-0.50
Media	0.50-1
firme	1-2
Muy firme	2-4
dura	>4

La tabla 2.7.- es una clasificación de acuerdo a su consistencia y carga última de suelo (Terzagui y Peck 1955).

#### **2.2.10.2. Tipos de rotura.**

En un ensayo a compresión simple se pueden producir distintos tipos de rotura; rotura frágil y rotura dúctil. En la primera predominan las grietas paralelas a la acción de la carga, y la rotura ocurre de un modo brusco y bajo deformaciones muy pequeñas, presentándose después de ella un desmoronamiento de la resistencia. En la segunda la muestra se limita a deformarse, sin que aparezcan zonas de discontinuidad en ella. De forma intermedia, la rotura se produce a través de un plano inclinado, apareciendo un pico en la resistencia y un valor residual.

En arcillas blandas aparece la rotura dúctil en el ensayo de compresión simple, mientras que en suelos cementados se suele registrar rotura frágil en este tipo de ensayos. Las teorías de rotura frágil fueron iniciadas por Alan Griffith en 1920, al atribuir la reducida resistencia a la tracción de muchos materiales a la presencia de diminutas fisuras en su interior, en cuyos extremos se produce concentración de tensiones. La rotura se produce debido a la propagación de las micro fisuras existentes bajo dicha concentración de tensiones.

En una probeta sometida a compresión simple también se puede producir tracciones locales en el contorno de las fisuras, especialmente sobre planos paralelos a la dirección de la

compresión. Ésto explica la aparición de grietas verticales en suelos blandos sometidos a presiones no muy altas, la rotura dúctil se presenta bajo la forma de un ensanchamiento sólo por el centro, ya que los extremos lo impiden la fricción entre el suelo y las placas de carga.

Este ensayo se aplicara a las muestras de suelo natural, y suelo estabilizado, para determinar qué valores máximos de resistencia última logran soportar como así hacer un análisis de su deformación. Esto sirve en nuestro estudio para la evaluación técnica de los suelos en estudio, determinando cual es la mejor opción considerando resistencia y deformabilidad.

**TABLA 2.8.- RESUMEN DE APLICACIÓN DE ENSAYOS O PRÁCTICAS.**

<b>Título, ensayo o práctica</b>	<b>Uso o aplicación dentro del estudio</b>
<b>Suelos</b>	
Características Generales	Conocimiento teórico
Tipos de suelos	Identificación de los suelos
Identificación de los suelos en el campo	Conocimiento teórico
<b>Propiedades físicas y mecánicas de los suelos</b>	
Fases del suelo, símbolos y definiciones	Conocimiento teórico y aplicación de terminología
<b>Relaciones volumétricas</b>	
relación de vacíos	Referencia y complementación a las relaciones volumétricas
Porosidad	Referencia y complementación a las relaciones volumétricas
grado de saturación	Referencia y complementación a las relaciones volumétricas
<b>Relaciones gravimétricas</b>	
Humedad	Determinación de la humedad del suelo natural
Peso específico	Para la determinación de densidades
peso específico relativo de una masa de suelo	Como referencia y complementación al peso específico
peso específico relativo de los sólidos	Como referencia y complementación al peso específico
<b>Plasticidad de los suelos</b>	
Límite líquido	Para la clasificación del suelo
Límite plástico	Complementación de la plasticidad de los suelos
Índice de plasticidad	Para la clasificación del suelos
Límite de contracción	Como referencia y complementación a la plasticidad de los suelos
Consistencia relativa	Como referencia y complementación a la plasticidad de los suelos
Índice de liquidez	Como referencia y complementación a la plasticidad de los suelos
<b>Clasificación de suelos</b>	
SUCS	Metodología de clasificación de nuestro suelo analizado
AASHTO	Metodología de clasificación de nuestro suelo analizado
<b>Propiedades mecánicas de los suelos</b>	
Compactación	Determinación de humedad óptima y máxima densidad seca
Densidad in situ	Evaluación del grado de compactación del suelo ya mejorado con ripio
CBR	Evaluación del CBR y expansión
Resistencia a compresión simple	Evaluación de resistencia o carga última y deformabilidad

## 2.3.SUBRASANTES.

### 2.3.1. Condiciones para la Formación de Subrasantes.

De la calidad de ésta depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea este flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta carpeta se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas de tránsito.

Es necesario tener en cuenta la susceptibilidad a la humedad, del suelo, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen. Los cambios de volumen en un suelo, pueden ocasionar graves daños a las estructuras que se apoyan sobre éste, por esta razón al construir un pavimento se debe intentar tener un control muy riguroso con respecto a las variaciones volumétricas del mismo, a causa de la humedad.

La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, la estabilización físico-química con aditivos como el cemento, la cal, el asfalto, la ceniza volcánica (puzolana natural) en éste caso, entre otras.

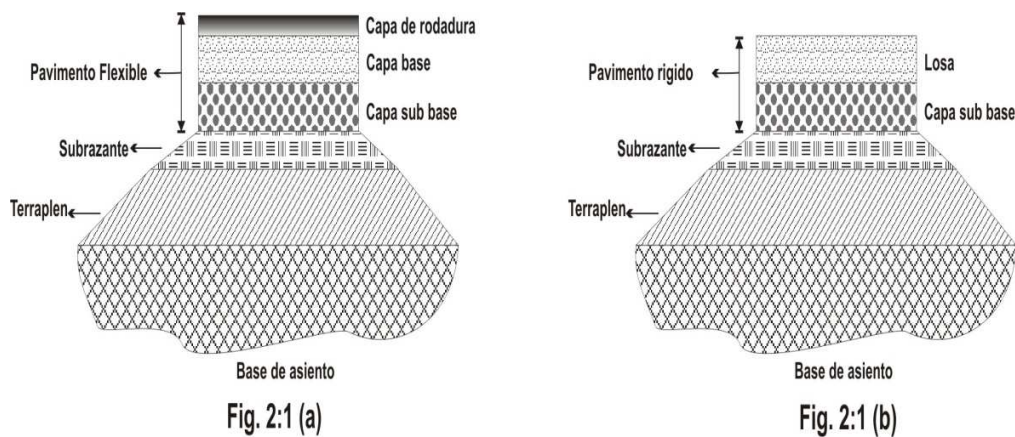


Figura. 2.7 (a).- nos muestra la ubicación de la subrasante en un diseño para un paquete de pavimento flexible.

Figura 2.7 (b).- nos muestra la ubicación de la subrasante en un diseño para un paquete de pavimento rígido.

### **2.3.1.1. Definición y Características de la Subrasante.**

Definición.- la subrasante es la fundación sobre el cual el paquete estructural será construido.

Características a tomar en cuenta.

Como material de fundación, se debe establecer cuál es su resistencia mecánica y específicamente ante la presencia de cargas.

Se busca la relación entre la carga y la deformación unitaria

La resistencia varía con las condiciones de humedad, compactación y confinamiento

Tiene una gran influencia en las operaciones de construcción del pavimento y en la eficiencia del mismo. Las subrasantes inestables presentan problemas relativos a la colocación y compactación de los materiales de base y/o sub base y no dan soporte adecuado para las subsiguientes operaciones de pavimentación.

Frecuentemente, las deficiencias en la construcción debidas a problemas de la subrasante no se detectan por encontrarse “ocultas” en el pavimento final; sin embargo pueden aparecer en el pavimento después de la exposición al tráfico y al medio ambiente.

Las respuestas estructurales de un pavimento (esfuerzos, desplazamientos y agrietamientos) son influidas significativamente por la subrasante. Un gran porcentaje de las deflexiones en la superficie de un pavimento se puede atribuir a la subrasante.

Por ser la deflexión de la superficie un criterio de diseño, es necesario asegurar que la caracterización de la subrasante sea la adecuada.

Las propiedades requeridas de la subrasante incluyen la resistencia, la fácil compactación, la conservación de la compactación, la estabilidad volumétrica.

Los suelos son altamente variables y sus propiedades cambian a lo largo del proyecto, en medida de que existan cambios en la humedad, en la densidad o se establezcan influencias ambientales, es decir, que las propiedades de la subrasante cambian con el tiempo.

### 2.3.1.2. Condiciones básicas a cumplir por las subrasantes.

- **EJECUTABILIDAD:** significa que sea posible su puesta en obra en debidas condiciones, y de forma tecnológica (es decir, con medios mecánicos de alto rendimiento). En especial, este aspecto hace referencia a los suelos excesivamente húmedos o secos, que son los que plantean problemas a ese respecto.
- **ESTABILIDAD:** se refiere a que la propia estructura de tierra sea estable frente al deslizamiento, tanto desde el punto de vista interno (la propia sección de la subrasante, con superficies de deslizamiento que se inscriban fundamentalmente en su seno) como externo, en el sentido que exista suficiente estabilidad sobre el terreno en el que se asientan.
- **DEFORMABILIDAD:** hace referencia a que las deformaciones (verticales-asientos, u horizontales-desplazamientos) que se produzcan, una vez que se construya el firme a soportar, deben ser admisibles y compatibles con la funcionalidad y servicio del mismo, incluyendo la regularidad superficial de la capa de rodadura.

En este sentido, han de tenerse en cuenta los asientos, o movimientos totales y sobre todo los diferenciales, que pueden dar lugar a agrietamientos longitudinales o transversales del firme, disfunciones del servicio del firme, etc.

Dentro de este contexto, se deben tener en cuenta todo tipo de fenómenos que pueden originar movimientos; y por tanto, además de las deformaciones propias del relleno, hay que considerar los posibles fenómenos de hinchamiento-retracción debido a cambios de humedad-temperatura, los asientos del cimiento (apoyo sobre suelos blandos), etc.

- **DURABILIDAD:** que hace referencia, por último, a que la obra ha de ser duradera (vida de servicio útil) y también garantizar la permanencia de las condiciones de servicio durante ese periodo de diseño (amortización de la inversión).

En ese sentido, son básicos los procesos de alteración y sus factores más influyentes, como el agua, la temperatura, y los agentes biológicos o químicos Y por supuesto, el tipo de material utilizado en el propio relleno.

## CONDICIONES A CONTEMPLAR EN UNA SUBRASANTE

<b>CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DEL MATERIAL</b>
<p style="text-align: center;">Granulometría Plasticidad Compactación Proctor Capacidad Portante C.B.R Expansividad</p>
<b>ESTADO DE CONSISTENCIA</b>
<p style="text-align: center;">Humedad natural</p>
<b>TECNOLOGÍA CONSTRUCTIVA</b>
<p style="text-align: center;">Extracción Transporte Extensión Compactación</p>

Tabla N° 2.9: Condiciones a contemplar en una subrasante

De un modo simplificado, en la tabla 2:9 se exponen los aspectos o condiciones más importantes y globales a ser contempladas: las denominadas características intrínsecas del material, el estado de consistencia-humedad, y la tecnología constructiva.

*Las características intrínsecas* se refieren a las propiedades del material como tal, independientemente de la obra de tierra, y contemplan aspectos tales como: granulometría, plasticidad, expansividad, etc., que en un principio resultaron de extrema importancia, pues su utilización se basaba casi exclusivamente en las clasificaciones deducidas de estas propiedades índices.

*El estado de consistencia*, o humedad, ha sido tenido siempre en cuenta como esencial, pues está ligado íntima y directamente a la trabajabilidad, y en definitiva a las labores esencialmente constructivas (incluyendo no solo la compactación, sino también el transporte, extendido, etc.). No obstante, ha sido en tiempos más recientes cuando se le ha dado a la humedad una importancia más esencial y científica, por la gran trascendencia que

tiene en la estructura de los suelos compactados, y en su comportamiento posterior (sobre todo en suelos de carácter expansivo, colapsable, etc.)

Además de la humedad, debe tenerse presente la climatología como un factor extrínseco importante, así como las posibilidades de modificación de la misma.

Por último la **tecnología constructiva** debe contemplar no sólo el proceso de la propia compactación, sino también el de extracción, transporte y extendido.

La variación conceptual que se ha venido produciendo en el modo de contemplar este tipo de obra, ha ido restando importancia a la cuestión ligada a las características del propio material, para poner énfasis en el producto final obtenido (que es el bien y objetivo deseable, al margen de con qué y cómo se haya producido).

A su vez, ello ha conllevado a ir variando las exigencias y normativas al respecto, sobre todo en lo que se refiere a su clase, así como los sistemas o métodos de control. Se ha basado, en la línea antes señalada, de centrar la atención sobre las características intrínsecas del material, a poner el énfasis en el producto, y en concreto en su comportamiento geomecánico: resistencia y deformabilidad (teniendo en cuenta la gran influencia de la humedad y su evolución).

En ese sentido, y como factor básico de ese comportamiento, se debe considerar la estructura del material compactado como un elemento básico que determina su comportamiento, y por ello, además de la densidad, que ha sido el aspecto esencial que se ha venido teniendo en cuenta históricamente, debe ser considerada la humedad como el otro dato básico.

### **2.3.1.3. Factores que influyen en el comportamiento de la subrazante.**

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.

Las actuales estructuras viales, están constituidas por una serie de capas superpuestas, compuestas de materiales cuyas características, requerimientos y exigencias, varían de una

capa a otra. La función de estas diferentes capas es ir disipando y redistribuyendo las cargas que le infringe el tráfico, de manera tal que en la medida que dichos esfuerzos van penetrando la estructura, menor será su incidencia en la capa inmediatamente inferior, hasta llegar a la Subrasante o suelo natural, siendo necesario evitar, en los diseños, sobrepasar la capacidad portante de este estrato.

Todas las Estructuras viales que el hombre ha diseñado, desde siempre, incluyendo las actuales, se basan en Dos premisas: La primera de ellas considera las cargas que deberá soportar la vía, durante el tiempo de vida útil que requerimos. Es un dato estadístico, muy difícil de modificar.

La segunda premisa es la Capacidad portante del Suelo Natural sobre el que debemos soportar nuestra vía. Actualmente se toma, como unidad de medida de dicha Capacidad, la establecida por la Universidad de California (E.U.A.) y que se denomina **CBR**.

En la medida en que mayor sea la Capacidad portante de este estrato menor será el espesor de la estructura requerida, para una carga o esfuerzo determinados, lo que redundará en economía, en todos los aspectos y menor deterioro ambiental.

Cuando la capacidad portante del suelo natural no es la adecuada o es muy baja, se busca mejorar la calidad del suelo ya sea adicionando materiales que le ayuden a mejorar las características de dicho estrato o sustituyéndolo por otro, de ahí nace la idea de estabilizarlo.

#### **2.3.1.4. Clasificación de la subrasante de acuerdo con su resistencia.**

Se tiene cinco clasificaciones de la subrasante tal como se indica en la tabla 2:10, en la cual la clasificación se hace con base en la relación de soporte de california del suelo CBR.

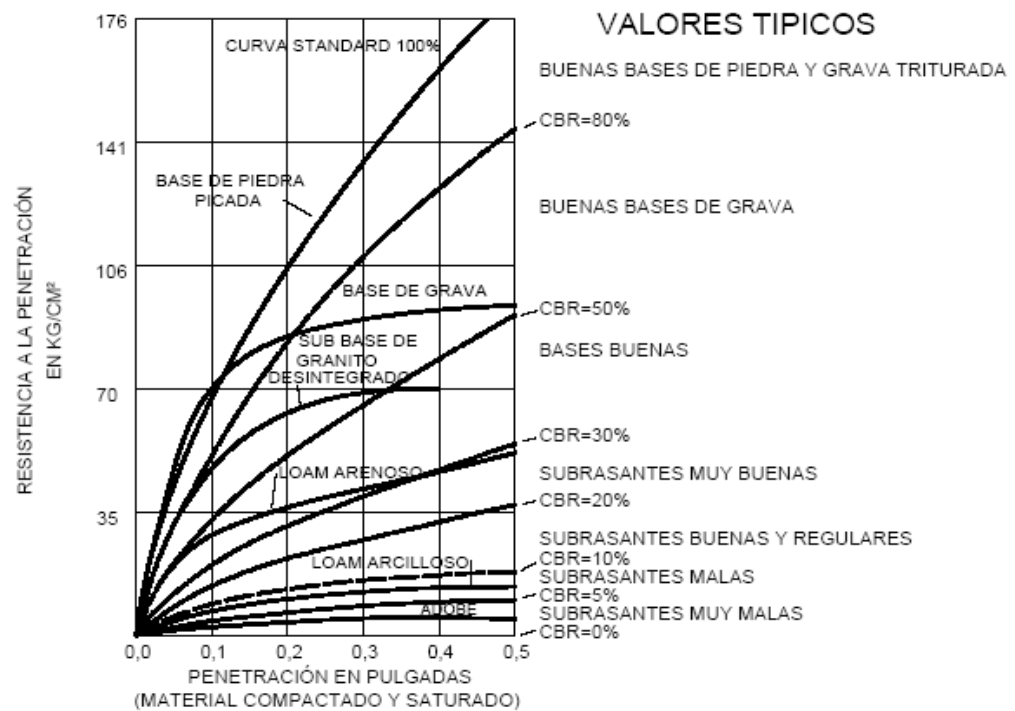
Para subrasantes con CBR menores que 2, en la mayoría de los casos y cuando el diseñador lo considere conveniente, se requerirá la sustitución de los materiales inadecuados (remoción parcial o total del material inaceptable). Para subrasantes con CBR menores que 10 se requerirá tratamientos especiales como la modificación de sus características con base

en mejoramientos mecánicos o con la adición de productos químicos como ser la cal, cemento u otros que doten a la subrasante de mejores características mecánicas.

Clase o Tipo	CBR (%)	Módulo Resiliente ( $\text{kg/cm}^2$ )
S1	<2	<200
S2	2-5	200-500
S3	5-10	500-1000
S4	20-10	1000-2000
S5	>20	>2000

Tabla: 2.10.- Clasificación de la subrasante de acuerdo al CBR.

Ref.: Manual de diseño de pavimentos de concreto (Medellín– Colombia)



Abaco. 2.1.- valores típicos de subrasantes.

Ref.: Estabilización de suelos (Santiago Márquez 2005 – Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco)

### **2.3.2. Los Suelos Como Material de Construcción de Subrasantes.**

Los suelos necesarios para formar las subrasantes se obtienen de los desmontes de la traza o de préstamos adecuados. Los mejores suelos serán aquellos que son fáciles de compactar y que una vez compactados son resistentes a la deformación, poco sensibles a los cambios de humedad, especialmente en lo referente a cambios de volumen, o a la helada en áreas sometidas a muy bajas temperaturas. Por ello son preferibles los suelos granulares de granulometría continua, con un porcentaje adecuado de finos poco plásticos y sin piedras de gran tamaño. Las arenas uniformes sin finos son difíciles de compactar.

Los suelos de grano fino o materiales limo-arcillosos pueden ser utilizados, salvo que se trate de arcillas muy plásticas o de limos muy compresibles de elevado límite líquido. Con frecuencia estos suelos de grano fino, de reducida resistencia, tienen también unas humedades naturales excesivas que dificultan o imposibilitan su puesta en obra.

Son suelos inadecuados para su empleo en subrasantes los suelos orgánicos o con materia orgánica (hojas, hierba, raíces, desechos orgánicos y otros materiales putrescibles), por ello no se empleará la capa de tierra vegetal, ni materiales procedentes de marismas, turberas, etc. Tampoco es conveniente emplear escombros y vaciados heterogéneos, que pueden dar lugar a asentamientos diferenciales en servicio.

En cambio es conveniente estudiar la posibilidad de empleo de subproductos y desechos industriales locales, que en algunas zonas presentan problemas ecológicos y de acopio: cenizas volantes, desechos de cantera, ciertos materiales minerales, escorias metalúrgicas, subproductos de industrias químicas, materiales puzolánicos, etc.

Cuando los suelos disponibles no satisfagan las exigencias generales será necesario realizar un estudio detallado de laboratorio sobre sus características, para evaluar la posibilidad de su empleo y fijar en ese caso las especificaciones particulares para su puesta en obra.

Este estudio permite muchas veces que se utilicen suelos de la traza, con procedimientos especiales de extracción, extendidos, compactación o estabilización, con los consiguientes beneficios económicos y medioambientales.

### **2.3.2.1. Subrasantes sobre suelos blandos.**

Ocasionalmente, el trazado de la carretera puede atravesar zonas sobre las que existen depósitos de suelos blandos, tales como arcillas, limos e incluso turbas. Es bastante conocido que este tipo de materiales presentan un **nefasto comportamiento** como soporte de cualquier tipo de obra de tierra.

Ante esta situación cabe obrar de dos posibles maneras: si la capa en cuestión tiene poca potencia puede ser económicamente viable su eliminación empleando maquinaria de movimiento de tierras; sin embargo, un mayor espesor obligará a replantear la estrategia, actuando directamente sobre el terreno existente para intentar mejorar sus cualidades resistentes.

Lo que sí que es conveniente realizar siempre en este tipo de suelos es un **estudio geotécnico** que caracterice el terreno, de forma que puedan estimarse de forma más precisa la estabilidad y los asientos admisibles del terraplén. También es recomendable hacer un estudio comparativo de las dos soluciones –eliminación o mejora estructural- para determinar cuál es la más idónea.

### **2.3.3. Control de Calidad.**

En la ejecución de las subrasantes los suelos utilizados son objeto de control en la extensión, la compactación y la geometría. El control de los materiales tiene por objeto comprobar que el material a utilizar cumple las prescripciones exigidas, tanto en el lugar de origen como en el de empleo; de este modo queda asegurado que no ha habido alteraciones en las operaciones de extracción, carga, transporte y descarga. Este control es fundamentalmente visual y se complementa con toma de muestras representativas para realizar ensayos de identificación. En el propio lugar de emplazamiento se requiere una vigilancia para desechar los materiales inadecuados y ensayar los sospechosos.

El control de la extensión se basa principalmente en la inspección visual del espesor y ancho de las capas, así como en la temperatura ambiente mínima y del estado de la capa anterior. El control de la compactación suele hacerse mediante el control de la densidad seca, de la humedad y en casos especiales, de la porosidad.

Sobre las distintas capas de los terraplenes (y de las rasantes en desmonte, sometidas a una compactación previa a la puesta en obra del firme) se determina puntualmente la densidad seca alcanzada en el ensayo de apisonado Proctor. Las prescripciones técnicas especifican un valor mínimo. Conviene tener en cuenta que un punto de porcentaje no es una cosa sin importancia, puesto que un material completamente suelto tiene ya una densidad del orden del 85 % de la de referencia. El control de la humedad se realiza en los suelos con porcentajes de arcilla que puedan influir en la capacidad de soporte y el de la porosidad en suelos o rocas evolutivas potencialmente. Como se trata de controles muestrales de los que se pretende inferir las características de la totalidad de la superficie ensayada, conviene aplicar algunos principios estadísticos sencillos:

- Debe ante todo definirse la porción que se aceptará o rechazará según los resultados de los ensayos.

- Una vez elegido el efectivo de la muestra, para que ésta no introduzca ningún sesgo, el emplazamiento de los ensayos debe elegirse de forma aleatoria, evitando ir a los sitios peores, o a los que al operador le parecen representativos.

- Una vez realizados los ensayos, su resultado debe ser analizado por técnicas estadísticas. El tener algunos resultados muestrales por debajo del límite no significa obligatoriamente que la porción deba ser rechazado, es decir, re compactado. Así, con 5 unidades aleatorias por muestra pueden admitirse resultados individuales de la densidad de hasta un 2 %, inferior al valor mínimo especificado, siempre que la media aritmética del conjunto de la muestra no sea inferior a ese valor.

El contenido de humedad, aunque no suele especificarse en los pliegos de condiciones, es importante que se encuentre próximo al valor correspondiente de la máxima densidad Proctor, para evitar fenómenos de pérdida de resistencia en la mayoría de los suelos. A este control de producto terminado pueden asimilarse otros sistemas, como los ensayos de carga con placa o los ensayos de huella. En cambio en el control de procedimiento, se fija el espesor máximo de la capa compactada y el número mínimo de pasadas en función de las características del suelo y el tipo de compactador; en este caso basta con vigilar el proceso de compactación. Este método se adapta mejor a las obras de grandes volúmenes o con materiales grueso.

## CAPITULO III

### ESTABILIZACIÓN Y ALTERNATIVAS DE ESTABILIZANTES.

#### 3.1. ESTABILIZACION DE SUELOS.

##### 3.1.1. Introducción.

En la construcción de obras lineales y cualquier otra que requiera grandes explanaciones, es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras y materiales debido a consideraciones del tipo económico, ambiental y técnico.

Además las condiciones de competitividad exigen la continua mejora de los procesos constructivos en cuestiones de costo, plazo y calidad. La reducción al mínimo del movimiento de tierras será el factor determinante en esta optimización.

Por lo tanto se hace cada vez más necesaria la utilización de todos los materiales que se encuentren directamente dentro del trazo de las propias obras, sean cuales sean sus propiedades.

Ello nos obliga a un estudio detallado de sus propiedades para así adoptar los tratamientos y medidas necesarias con el objetivo de lograr que su comportamiento sea satisfactorio y fiable durante la vida útil de la obra, y a un costo razonable.

Los tratamientos y la estabilización de suelos son soluciones interesantes desde el punto de vista económico, ambiental y técnico.

##### 3.1.2. Definición.

Se denomina Estabilización de Suelos al proceso de someter a los suelos naturales a ciertos tratamientos para aprovechar sus mejores cualidades de manera que puedan soportar las condiciones adversas inherentes al diseño, rindiendo en todo tiempo el servicio adecuado que de ellos se espera, es decir dar a los suelos resistencia al esfuerzo cortante, a la

deformabilidad o compresibilidad, dar estabilidad volumétrica ante la presencia del agua, reducir la infiltración y capilaridad, siempre buscando, una mejoría sustancial en el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos y/o de la estructura que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil.

### **3.1.3. Tipos de Estabilización de Suelos.**

En realidad son muchos los procedimientos que puedan seguirse para lograr esa mejoría de las propiedades de los suelos, con vistas a hacerlos apropiados para algún fin específico, lo que constituye la estabilización.

- Estabilización mecánica que comprende el manipuleo y compactación de los suelos para obtener su densificación.
- Estabilización Física o granulométrica, en la que se persigue la obtención de una adecuada granulometría, mediante el agregado de materiales granulares o cohesivos o ambos a la vez, al suelo natural. En nuestro medio se aplica el “enripiado” que también viene a ser un derivado de la estabilización física o granulométrica.
- Estabilización físico química, se refiere al cambio de las propiedades del suelo por efectos físico-químicos de superficie, generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como la cal, el cemento, el asfalto u otros.

### **3.1.4. Tipos de Tratamientos.**

Según los objetivos del tratamiento, se suelo distinguir entre suelos mejorados y suelos estabilizados.

1. Suelos mejorados.- se refiere generalmente a suelos de grano fino, plásticos y a veces con humedades excesivas, que presentan dificultades en la compactación, expansividad, sensibilidad al agua o a la helada y baja capacidad de soporte y que estos son tratados generalmente con cal.

Con este tipo de tratamiento se persigue fundamentalmente modificar sus características a corto plazo, pasando a ser suelos utilizables.

El objetivo de este tipo de tratamiento puede ser por alguna de estas razones:

- Secar zonas húmedas para facilitar su compactación.
- Proporcionar una plataforma de trabajo estable.
- Preparar el suelo para tratamientos posteriores.

2. Suelos estabilizados.- se persigue fundamentalmente un aumento de su capacidad de soporte y una disminución de su sensibilidad frente al agua, así como un incremento de su resistencia mecánica. Si se tiene una fracción granular del suelo es importante, un porcentaje moderado de estabilizante es suficiente para obtener un material insensible al agua, estable y capaz de resistir a largo plazo las deformaciones producidas por el tráfico.

### **3.1.5. Campos de Aplicación.**

Entre los diversos campos de aplicación para un tratamiento de estabilización de suelos los más conocidos son:

1. Secado de suelos para uso de terraplenes y desmontes.- cuando los suelos tienen una humedad excesiva, es decir, con un contenido muy superior a la humedad óptima en el ensayo Proctor, resulta muy difícil su compactación, obligando a interrumpir su ejecución o a complejas operaciones de secado. Ello da lugar a una ralentización de los movimientos de tierras, con una disminución de los rendimientos, y en muchos casos a una imposibilidad de alcanzar el grado de compactación deseado. Los suelos finos y plásticos son los que con mayor frecuencia presentan este problema, particularmente en épocas de lluvia, por ser muy sensibles al agua y no tener capacidad de drenaje.

Para resolver este problema puede emplearse una pequeña dotación de cal viva en polvo, la cual, al tiempo que seca el suelo por hidratación, mejora su trabajabilidad por las reacciones inmediatas de floculación de la cal con el suelo. De esta forma el aporte de un 1 % de cal

viva puede disminuir el contenido de humedad del suelo en un 4-5%. Si a ello se suma el efecto de aireación y volteo de un material procedente de un desmonte o préstamo, el valor de la disminución de humedad puede llegar a alcanzar hasta un 7%.

Este tratamiento se puede aplicar también para poner en obra suelos superficialmente helados en invierno, pues la reacción exotérmica de la cal al apagarse genera un calor suficiente para derretir muchas partículas de hielo y reducir inmediatamente el exceso de humedad, permitiendo su compactación. Siendo válido para cualquier tipo de suelo.

2. Suelos mejorados para su empleo en núcleos de terraplén.- el tratamiento en núcleos de terraplén se aplica principalmente para la utilización de suelos cohesivos, con humedades naturales elevadas o bien de suelos marginales. De otro modo su empleo no sería posible con las técnicas habituales de ejecución. Por otra parte podrían presentarse riesgos de inestabilidad por asentamientos diferenciales o por roturas por esfuerzo cortante debidas a las presiones intersticiales creadas durante la ejecución o a la inclinación excesiva de taludes. Tan importantes son estas consideraciones técnicas como las económicas ligadas a las demoras y bajos rendimientos de las maquinarias de ejecución.

Para conseguir la trabajabilidad deseada se emplea cal, con la dotación mínima necesaria (próxima al 1%), de modo que los vehículos de transporte de las tierras no formen surcos de profundidad superior a unos 10 cm. Este tratamiento sirve también para reducir los eventuales cambios de volumen y aumentar la estabilidad de los rellenos.

Otras aplicaciones particulares son las siguientes:

- Para reducir la heterogeneidad de materiales procedentes de vertederos.
- Para la estabilización de lodos producidos por tuneladoras.
- Para el relleno de zonas de difícil acceso, como trasdoses de obras de fábrica o zanjas, con el objeto de sufrir las probables deficiencias de compactación.
- Para ensanches de calzada.
- En la cimentación de núcleos sujetos a inundación.

- Para permitir una mayor inclinación de los taludes.

3. Suelos mejorados o estabilizados para capas de asientos de firmes.- tanto durante la ejecución, como en el comportamiento ulterior del firme en servicio, el cimiento juega un papel relevante, que en ciertos casos puede llevar a la ruina del firme, al menos de forma local y especialmente en combinación con el agua. Por ello, parece oportuno conocer su constitución, funciones y las características de los suelos como materiales de construcción. Puede definirse como cimiento del firme al conjunto de suelos y otros materiales que se encuentran bajo el mismo. La explanada es la superficie del cimiento, sobre la cual se apoya el firme. Las cargas del tráfico, fundamentalmente verticales, producen un estado tensodeformacional de intensidad decreciente con la profundidad, llegando muy aminoradas a la explanada gracias a la distribución proporcionada por las capas del firme.

A partir de ahí, las tensiones y deformaciones siguen disminuyendo, de forma que a una profundidad de 1,5-2 metros son ya prácticamente inapreciables.

Las capas superiores del cimiento o capas de asiento del firme tienen por ello la mayor responsabilidad en el trabajo conjunto de la estructura del firme-cimiento, por lo que con frecuencia están formadas por suelos de aportación o por la estabilización de los existentes. Estas capas constituyen la coronación sobre el núcleo de los terraplenes y el fondo de los desmontes. Debajo está el terreno natural subyacente.

Las capas de asiento constituyen así una transición entre el terreno natural y el firme, con un doble objetivo.

- A corto plazo.- es decir de forma inmediata, durante la construcción de un firme nuevo, tiene las siguientes funciones.

a) Proteger el terreno natural de los efectos de las cargas del tráfico.

b) Permitir la circulación del tráfico de obra y de la maquinaria de construcción de las capas del firme.

c) Establecer una calidad de nivelación suficiente para asegurar la adecuada regularidad superficial de las capas del firme, en particular de la capa de rodadura, así como los espesores de las capas.

d) Aportar la capacidad de soporte necesaria para la compactación de las capas superiores.

▪ A largo plazo.- es decir con el firme en servicio, tiene una importante función estructural:

a) Homogeneizar el apoyo y aumentar la capacidad de soporte del cimiento.

b) Insensibilizar el suelo respecto a la humedad, bien por la aportación de suelos granulares o por la estabilización con algún agente químico de los suelos existentes.

En general, se desea conseguir una estabilidad satisfactoria de la obra de servicio, con unas deformaciones tolerables. En particular hay que evitar los cambios de volumen, así como los fenómenos de erosión.

Sin embargo, con frecuencia no se dispone en la traza de suelos naturales que tengan las características requeridas, por lo que si la explanada ha de tener una capacidad de soporte suficiente, será necesario al menos mejorarlos o estabilizarlos. En vías para tráfico pesado suele ser conveniente disponer de una explanada de elevada capacidad de soporte, la cual requiere ya de al menos una última capa de suelo estabilizado preferiblemente con cemento, que mejora significativamente el comportamiento del firme, y en particular su resistencia a la fatiga, permitiendo al mismo tiempo reducir los espesores de las capas del mismo.

En estas capas de asiento de firmes se emplean suelos mejorados o estabilizados con cal, cemento o asfalto y donde sea necesario estabilizaciones mixtas con cal y cemento.

4. Rellenos en zonas inundables.- también es posible emplear suelos estabilizados para rellenar los espacios dejados para la eliminación de los fangos existentes.

5. Suelos contaminados.- la estabilización permite evitar la formación de lixiviados en suelos contaminados con un gran número de elementos químicos. El material tratado se puede dejar en el mismo lugar o trasladarse a un vertedero, aunque en ningún caso se puede producir migraciones de los compuestos indeseables. El estabilizante inmoviliza los contaminantes mediante el incremento del pH del suelo, con lo que los hace inertes, insolubiliza y encapsula, y además puede producir cambios químicos en los mismos.

Hay una serie de contaminantes inorgánicos con los que se ha demostrado la efectividad del método, como son metales pesados, amianto, materiales radioactivos, ácidos inorgánicos, oxidantes y reductores.

Las técnicas de tratamiento son variadas: se puede realizar el mezclado in situ y dejar el material en el lugar, cuando el espesor contaminado es pequeño, o una vez estabilizada una capa, proceder a su carga, transporte y colocación en su punto de acopio. También se puede montar una planta en el lugar contaminado y transportar el material una vez tratado. Lo que no es recomendable transportar el material contaminado sin haber sido tratado previamente.

Dependiendo del tipo y cantidad de contaminante y de las características del suelo, los porcentajes de estabilizante pueden variar desde el 3% hasta valores más elevados.

### **3.1.6. Ventajas de los Suelos Estabilizados.**

1. Ventajas técnicas.- entre las ventajas técnicas pueden citarse :

- a) Permiten el empleo de los suelos de la traza, mejorando sus características hasta el grado deseado.
- b) Proporcionan una elevada capacidad de soporte a la explanada, con lo que aumenta la vida de servicio del firme.
- c) Aseguran la estabilidad de la explanada, tanto por su inestabilidad al agua y a la helada, evitando así cambios de volumen por hinchamiento o retracción, como por su resistencia a la erosión.
- d) Disminuyen las tracciones en las capas del firme, aumentando con ello su vida útil.

e) Pueden permitir el paso inmediato del tráfico de las obras.

## 2. Ventajas económicas y ambientales.

a) Un mayor empleo de los suelos y otros materiales de la traza, a veces de características iniciales inadecuadas. Esto es particularmente interesante por las restricciones para el uso de préstamos y en ocasiones no existen suelos aprovechables a una distancia aceptable.

b) Ahorro en el transporte de materiales.

c) Acortamiento de los plazos de ejecución, dado que el proceso de incorporación del estabilizante y de mezcla de suelo con el mismo se realiza con equipos específicos de alto rendimiento.

d) La obtención de cimientos de firme de mayor capacidad de soporte permite un ahorro en las capas de firme, tanto en su constitución como en su ejecución.

e) Menor generación de polvos, por existir una disminución apreciable en el movimiento de tierras.

### **3.1.7. Propiedades de los Suelos que Mejoran con la Estabilización.**

En general las técnicas de estabilización revisadas anteriormente, pueden mejorar varias propiedades esenciales de los suelos; pero también puede aparecer el caso de que algunas de estas propiedades lleguen a deteriorarse inmediatamente o con el paso del tiempo. Para evitar esta situación, es importante elegir o especificar un sistema de estabilización y ver que sea el más correcto posible. Además, es necesario determinar el porcentaje óptimo de estabilizante, y tener la seguridad que sea el adecuado para cada caso particular. Por otro lado es importante realizar la investigación del comportamiento de los materiales estabilizados, analizando a corto y largo plazo las propiedades que se mejoran y se mantienen al paso del tiempo, estando conscientes del costo que implica la tarea, de las múltiples propiedades del suelo, las más importantes que se buscan mejorar con las estabilizaciones son las siguientes:

a) Plasticidad.

La plasticidad del suelo está relacionada con el concepto de límites de Atterberg, término conocido en la mecánica de suelos. Estos parámetros relacionan la capacidad que tienen los suelos cohesivos 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 indicará una modificación del agua adsorbida por el suelo.

El término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menor. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen un índice de plasticidad de 11 o mayor. BRAJA M. DAS.

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.

#### b) Estabilidad Volumétrica.

Esta propiedad se refiere al apreciable cambio de volumen que sufren los suelos, debido al cambio de humedad y los esfuerzos internos afectados por el agua.

Cuando un suelo saturado se seca, cambia su volumen (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. Luego se produce una tracción en el agua del suelo y la correspondiente compresión en la estructura del mismo, siendo ésta última bastante considerable e inclusive actúa como una carga en el mismo.

Se produce la expansión o hinchamiento cuando un suelo seco, cohesivo aumenta su humedad; este fenómeno se debe a diversos factores como la atracción del agua por los minerales arcillosos, la repulsión eléctrica de las partículas de arcilla y de sus cationes absorbidos.

La estabilidad volumétrica está íntimamente relacionada con la composición mineralógica de los suelos y los cambios climatológicos de la región, esta propiedad es propia de los suelos que contienen un alto porcentaje de minerales arcillosos.

La estabilidad volumétrica se modifica cementando el material de modo que disminuya la capacidad del material de adsorber agua, siendo más efectivos en las arcillas profundas.

#### c) Compresibilidad.

La compresibilidad es una propiedad que está relacionada íntimamente con el cambio volumétrico del suelo, el cual se manifiesta a través de un asentamiento. Este asentamiento es producido por el peso propio del material o por cargas externas superficiales que originan un cambio en la relación de vacíos, flexión y la distorsión o, cambio de formas de la fase sólida del suelo inmediatamente debajo de la carga. Asimismo, la estructura de los sólidos especialmente en los puntos de contacto de un factor irreversible con la compresibilidad de todos los suelos no cohesivos. Sin embargo, en las arcillas el factor más importante de la compresibilidad es la repulsión eléctrica entre sus partículas que tienen cargas iguales o, que están rodeadas de cationes con cargas semejantes que las mantienen apartadas.

La reducción de la compresibilidad del suelo puede lograrse llenando los poros del mismo, es decir, cementando los granos con un material rígido. Pero también, es posible reducir esta propiedad cambiando las fuerzas del agua adsorbida por el mineral de arcilla.

En términos generales, todos los métodos de estabilización revisados en anteriores secciones pueden incluir en esta propiedad, pero frecuentemente la compactación y la estabilización química son las que más se utilizan.

#### d) 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 de esta propiedad.

La permeabilidad puede reducirse llenando los poros con un material impermeable o, modificando la estructura del mineral de arcilla con el fin de impedir la floculación de las partículas. Por otro lado, se puede aumentar la permeabilidad quitando los granos finos del suelo o creando una estructura conglomerada.

Los métodos de estabilización tales como la compactación y el uso de algunas sustancias químicas, pueden modificar significativamente la permeabilidad; pero el uso de esta última técnica debe ser cuidadosamente analizado, ya que en algunos casos puede ejercer efectos desfavorables y otras propiedades de los suelos.

e) Resistencia.

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

En general, todas las formas de estabilización química revisadas anteriormente, pueden mejorar en mayor y menor grado de 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.

f) Durabilidad.

Es la propiedad que tiene el suelo de mantener las propiedades mecánicas a través del tiempo, ofrecer resistencia al intemperismo, la erosión y abrasión del tráfico.

Esta propiedad se refiere a los suelos que están sujetos a solicitaciones de trabajo, más específicamente en las superficies de rodadura, y su menor o mayor deterioro dependerá su menor o mayor calidad del mismo, de ahí que viene a la importancia del análisis de las estabilizaciones.

### **3.1.8. Elección Adecuada del Estabilizante.**

En la estabilización de suelos uno de los factores clave para la obtención de los resultados buscados es la adecuada elección del estabilizante, o mezcla de estabilizantes.

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

a) Tipo de suelo o materiales a estabilizar.

Tras un estudio de todos los tipos de suelos que se vayan a emplear, se debe decidir que estabilizante es el más adecuado.

No sirve cualquier estabilizante para cualquier tipo de suelo. Esta es una de las razones de alguno de los fracasos en obras de este tipo.

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

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

Los suelos con un índice de plasticidad menor o igual a 12 son suelos que reaccionan mejor con el cemento. Los suelos cuyo Índice Plástico sean mayor de 20 son suelos cohesivos, que reaccionarán mejor con la cal, y los suelos cuyo I.P. este entre los valores 12 y 20 serán suelos más aptos para una estabilización mixta.

En el caso de suelos muy plásticos, con valores de I.P. superiores a 40, se debe realizar la estabilización con cal, y en dos etapas para mejorar su eficacia.

Analizando la granulometría, lo que interesa ver es la fracción fina del suelo. En el caso de suelos muy finos, con más de 50% que pase el tamiz N° 200, son claramente suelos aptos para reaccionar mejor con cal.

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

Puede haber casos especiales en los que, a pesar de la granulometría o el índice de plasticidad planteado para la elección del estabilizante, será necesarias la prueba de ensayos con la cal y con el cemento, para determinar cuál de ellos actúan mejor sobre el suelo.

También puede plantearse el empleo de la cal o cemento conjuntamente con algún otro material o subproducto de tal forma de que se potencien sus propiedades cementantes u otras características.

b) Parámetros u objetivos buscados.

La elección del estabilizante dependerá también de los objetivos buscados.

- Si el objetivo es el descongelamiento o el secado inmediato de cualquier tipo de suelos en condiciones climatológicas adversas, se deberá emplear cal viva, y su dosificación se deberá realizar sobre la marcha, día a día, a pie de obra, en función de las condiciones de trabajo.
- En el caso de la estabilización de materiales marginales para su reutilización en la construcción de terraplenes y saneos, la dosificación del estabilizante deberá ser la necesaria para corregir sus problemas geotécnicos y resistentes hasta unos valores aceptables en: plasticidad, hinchamiento, capacidad de soporte, etc.
- En el caso de la mejora y estabilización de suelos en capas de coronación y terraplenes y fondos de desmonte, para la formación de explanada, la estabilización con cemento puede llegar a ser la mejor opción.

c) Agentes Estabilizantes disponibles en el entorno.

Puede darse el caso de que en función a la ubicación espacial y temporal de la obra, no se tenga la disponibilidad de cualquier tipo de estabilizante.

En este caso pueden ser muy recomendable emplear adiciones (escorias, cenizas, etc.) y aditivos que permitan ampliar el rango de actuación de los agentes estabilizantes disponibles en el entorno.

## **3.2. ESTUDIO DEL ESTABILIZANTE A UTILIZAR.**

### **3.2.1. Cemento Como Estabilizante.**

#### **3.2.1.1. Cementos adecuados utilizados en la estabilización de suelos.**

El material que se incorpora al suelo será cemento Portland en proporciones y formas variables, dando lugar a los siguientes productos derivados dependiendo del material que se busca obtener:

- a) Suelo tratado con cemento.- es una mezcla íntima de suelo y cemento con adición de agua para la cual no existen requerimientos de calidad, es una mezcla no endurecida o semi-endurecida de suelo y cemento. El mejoramiento que se alcanza depende de la cantidad de cemento que se incorpora y del tipo de suelo. En realidad lo que hace el cemento incorporado al suelo en tan baja proporción es modificar la avidez de agua del suelo disminuyendo su plasticidad. El suelo modificado puede emplearse en bases, sub bases, subrasantes, etc.
- b) Suelo cemento.- este material contiene suficiente cemento como para endurecer el suelo al cual se ha incorporado el grado de humedad necesaria para lograr una buena compactación y un alcance de una máxima densidad, consiguiendo así una buena hidratación del cemento.
- c) Suelo cemento plástico.- es una mezcla de suelo y cemento endurecida que contiene en el momento de elaborarla, suficiente cantidad de agua como para lograr una consistencia similar a la del mortero plástico. Este producto se emplea para taludes, aéreas irregulares o confinadas como puede ser revestimiento de cunetas o donde no es posible utilizar equipo de construcción convencional.

En los suelos estabilizados con cemento el conglomerante tiene una importancia menor en comparación con la dosificación del mismo o la densidad alcanzada en la compactación. Es

posible utilizar la gran mayoría de los cementos comercializados en Bolivia, por lo que su elección dependerá de la disponibilidad y del precio de los mismos.

Los cementos más adecuados como agentes estabilizantes son los que presentan estas propiedades:

- Inicio y final de fraguado suficientemente largos, de forma que se tenga un elevado plazo de trabajabilidad.
- Moderado calor de hidratación, para limitar los efectos de fisuración por retracción (ancho de fisuras y distancia entre las mismas), principalmente en épocas calurosas.
- Desarrollo lento de resistencias y módulos de rigidez a edades tempranas, recuperándolas a largo plazo. Con ello se consigue limitar el efecto de la retracción y los fenómenos iniciales de fatiga inducidos por las cargas del tráfico.

En general se deben procurar emplear cementos de clase resistente media o baja, dejando los de clase superior para situaciones especiales.

No se deben emplear cementos de aluminato de calcio, ni mezclas de cemento con adiciones que no hayan realizadas en la fábrica de cemento.

Si la capa estabilizada se tiene que disponer sobre terrenos yesíferos o que contengan sulfato de magnesio, es conveniente aislarla y, que en cualquier caso, utilizar cementos resistentes a los sulfatos o con alto contenido de adiciones (ceniza volante, escoria de horno alto o puzolana).

### **3.2.1.2. Características generales del cemento.**

El cemento es un conglomerante hidráulico, que amasado con agua fragua y endurece tanto expuesto al aire como sumergido. El cemento Portland está constituido por cuatro componentes principales: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferro aluminato tetracálcico, las materias primas que se usa en la fabricación del cemento Portland incluyen caliza, hierro, sílice, alúmina, yeso y óxido de magnesio. En la

fabricación del cemento se puede usar una amplia variedad de materiales naturales e industriales como fuentes de materia prima.

El cemento utilizado como agente estabilizante del suelo es cemento El Puente, por ser un cemento que se encuentra fácilmente en nuestro medio y cumple con las propiedades anteriormente mencionadas.

Las características más importantes del cemento son:

a) **Peso específico.**- El peso específico expresa la relación entre la muestra de cemento y el volumen absoluto.

$$PE = m / V_{\text{absoluto.}}$$

Donde:

m = muestra del cemento.

$V_{\text{absoluto}}$  = Volumen de la materia sólida.

El peso específico del cemento debe estar entre 3.10 a 3.15 gr. /cm<sup>3</sup>. El valor del peso específico no indica la calidad de un tipo de cemento, sino que su valor es usado para el diseño de la mezcla. Con el valor del peso específico se pueden encontrar otras características del concreto.

El peso específico real varía muy poco de unos cementos a otros, oscilando entre 3 y 3,15 gr. /cm<sup>3</sup>. La limitación establecida por algunas normas (igual o superior a 3 gr. /cm<sup>3</sup>).

b) **Finura del molido.**- Es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado y primer endurecimiento. Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento se hidratan solo en la profundidad de 0.01 mm, por lo que, si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño, al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte.

Si el cemento posee finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que en general resulta muy perjudicial); el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado, y disminuye sus resistencias a las aguas agresivas. Pero siendo así que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se llega a una situación de compromiso: *el cemento Portland debe estar finamente molido pero no en exceso.*

Para la determinación de la finura del molido existen varios métodos de ensayo, siendo uno de los más conocidos y prácticos, el método mecánico de tamizado, donde se debe tamizar cierta cantidad de cemento por el tamiz N° 200 de la serie americana, para luego expresar la finura del cemento como porcentaje en peso, del residuo que no pasa el tamiz N° 200.

c) Fraguado y endurecido.- El fraguado es la pérdida de plasticidad que sufre la pasta de cemento, y se pueden visualizar dos etapas:

- Fraguado inicial: se mide por el lapso entre el amasado y la pérdida parcial de plasticidad en la pasta (> 45 a 60 min.), encontrándose el cemento parcialmente hidratado.
- Fraguado final: se caracteriza porque la pasta de cemento deja de ser deformable ante cargas relativamente pequeñas, con el cemento aún mas hidratado y se convierte en un bloque rígido (generalmente menor a 12 horas).

Para ensayos de principio a fin del fraguado se usa el aparato de Vicat, sobre la llamada pasta de consistencia normal que sirve para la recepción del cemento Portland.

d) Resistencia.- Ésta es la propiedad más importante del cemento en cuanto a requisitos estructurales se refiere. Como resistencia de un cemento se entiende la de un mortero normalizado, amasado con arena de características y granulometría determinada, con relación agua/cemento igual a 0,5, mortero que es ensayado en probetas normalizadas y rotas normalmente a los 2, 7 y 28 días y expresado en Mpa, Kg./cm<sup>2</sup>, etc.

La resistencia del cemento influye decisivamente en la resistencia del suelo, por lo que, cuanto mayor sea la resistencia de éste, tanto mayor será la del suelo. Esta característica no es la única que debe buscarse, pues en ocasiones resulta buscar otras propiedades que pueden ser de mayor importancia que la resistencia; así por ejemplo: la durabilidad del concreto.

Las pruebas de resistencia que existen son las de compresión, tensión y flexión, siendo la primera la más importante puesto que las otras tienen un valor muy pequeño relativo al de compresión.

A continuación se describen en cuadros las especificaciones de los cementos:

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

Tabla 3.1 Categorías Resistentes de los Cementos

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

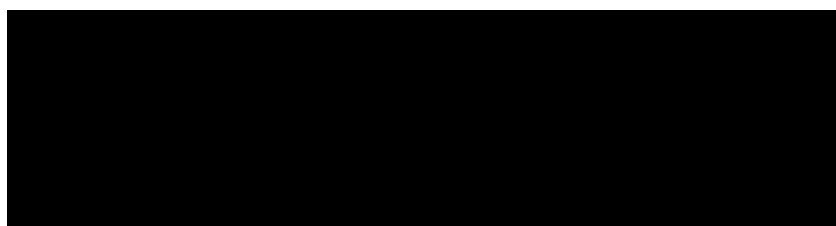


Tabla 3.2 Especificaciones Físicas de los Cementos.

### **3.2.1.3. Tipos de suelos que se estabilizan con cemento.**

En los suelos estabilizados con cemento, las dotaciones de cemento varían ampliamente según el tipo de suelo que se utilice. Aunque en principio cualquier tipo de suelo puede emplearse para la fabricación de una mezcla con cemento.

Los materiales o tipos de suelos que se recomiendan ser utilizados para la estabilización suelo cemento deberán estar dentro de las siguientes características.

- Contenido de finos que pasa el tamiz N° 200 inferior al 50%.
- Contenido de materia orgánica inferior al 2%.
- PH mínimo 12.1%.
- Limite Líquido menor al 50%.
- Índice Plástico menor al 25%.

Se restringen suelos que tengan presencia de sulfatos de calcio o magnesio u otras sustancias ávidas de agua ya que privan al estabilizante de la humedad necesaria para su respectiva reacción.

### **3.2.1.4. Determinación del porcentaje de cemento aplicado.**

Para determinar el óptimo de dosificación del cemento por volumen agregado a la masa natural del suelo se deberá determinar mezclas iniciales suelo – cemento según la siguiente tabla 3:5.

Según el tipo de suelo que se tiene en estudio, posteriormente se someten los especímenes a pruebas de compactación, CBR y compresión simple, y tomando como referencia los resultados de las distintos ensayos se optara como contenido óptimo de cemento al primer valor que proporcione la resistencia de diseño de (10 kg/cm<sup>2</sup>) valor apropiado para subrasantes o bases de pavimentos.

<b>CONTENIDO DE CEMENTO APROXIMADO PARA PROYECTAR LAS MEZCLAS DE SUELO CEMENTO</b>			
<b>GRUPO DE SUELO SEGÚN CLASIFICACION AASHTO Y SUCS</b>		<b>% DE CEMENTO REQUERIDO (EN PESO)</b>	<b>CONTENIDO DE CEMENTO ESTIMADO PARA LA PRUEBA DE COMPACTACION (% EN PESO)</b>
A-1-a	(GW, GP, SP, SW)	3.0 - 5.0	3-4-5-7
A-1-b	(SW, SP, GM, SM, GP)	5.0 - 8.0	4-6-8
A-2	(GM, SM, GC, SC)	5.0 - 9.0	5-7-9
A-3	(SP)	7.0 - 11.0	7-9-11
A-4	(ML-OL-CL-SM-SC)	7.0 - 12.0	8-10-12
A-5	(OH-MH-ML-OL)	8.0 - 13.0	8-10-12
A-6		9.0 - 15.0	10-12-14

Tabla 3.3.- contenido de cemento aproximado de acuerdo al tipo de suelo.

Ref.: Estabilización de suelos (Santiago Márquez 2005 – Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco)

<b>SIMBOLO</b>	<b>DEFINICIÓN DEL MATERIAL</b>	<b>ARTÍCULO CORRESPONDIENTE DEL PPTG</b>	<b>PRESCRIPCIONES COMPLEMENTARIAS</b>
0	Suelo tolerable	330 Terraplenes	CBR de 5 - 10
1	Suelo adecuado	330 Terraplenes	CBR de 10-20
2	Suelo seleccionado	330 Terraplenes	CBR 20 - 30
3	Suelo seleccionado	330 Terraplenes	CBR > 30
T	Material de la zona de transición en terraplenes	331 Pedraplenes	
S-EST 1	Suelo estabilizado in situ con cemento o cal	511 Suelos estabilizados in situ con cemento 510 Suelos estabilizados in situ con cal	CBR de la mezcla a los 7 días > 5 cemento o cal > 2%
S-EST 2	Suelo estabilizado in situ con cemento o cal	330 Terraplenes 511 Suelos estabilizados in situ con cemento 510 Suelos estabilizados in situ con cal	CBR de la mezcla a los 7 días > 10 cemento o cal > 3% Resistencia a compresión simple a los 7 días > 1MPa
S EST-3	Suelo estabilizado in situ con cemento	330 Terraplenes 511 Suelos estabilizados in situ con cemento	Resistencia a compresión simple a los 7 días > 1,5MPa

Tabla 3.4.- Especificaciones técnicas de acuerdo al tipo de material.

Ref.: Pavimentos flexibles. Problemática, metodología de diseño y tendencias,  
Alfonso Rico Rodríguez.

### **3.2.1.5. Procedimiento constructivo para la realización de la estabilización con cemento.**

La construcción de una capa de suelo cemento para carreteras comprende dos operaciones generales: la preparación de la sub rasante y el proceso de construcción independientemente de los equipos y métodos utilizados, el objetivo final es el de obtener una, mezcla compactada lo más perfecta posible, del suelo pulverizado con las convenientes cantidades de cemento y agua.

Las prácticas más usuales para la construcción de capas de suelo cemento se pueden agrupar en dos tipos, las que realizan la mezcla del suelo con el cemento en la vía y las que lo hacen en plantas centrales similares a las utilizadas para la fabricación de concreto.

Estabilización suelo cemento in situ.

Antes de dar comienzo a la construcción propiamente dicha se debe determinar, la cantidad de cemento requerida para el caso específico teniendo en cuenta las características del suelo con el que se va a trabajar, utilizando un proceso de diseño adecuado.

Como punto de partida del proceso constructivo se debe controlar el perfil transversal y la rasante de la vía, y si es necesario controlar su perfilado. Este proceso tiene una importancia especial ya que la rasante que presenta la vía al iniciar la construcción se mantiene una vez terminada esta, pues durante ese proceso constructivo las variaciones en el alineamiento longitudinal son insignificantes.

- Escarificación previa

La escarificación busca desprender la capa del suelo con la cual se va a trabajar y reducir un poco el tamaño en las partículas. En algunos casos puede prescindirse de este proceso dependiendo del tipo de suelo y del equipo de mezclado. Cuando el suelo es deleznable, se requieren poca o ninguna escarificación y pulverización, mientras que algunos suelos

limosos y arcillosos pueden necesitar un proceso enérgico especialmente si están muy secos o muy húmedos.

Para este escarificado se utilizará un arado de tres o cuatro rejas, o una niveladora provista de dientes para el escarificado.

La escarificación progresará desde los bordes hacia el centro de la calzada, verificando su profundidad al iniciar la operación, se deberá realizar la escarificación varias veces, hasta que el material presente una gradación aceptable. El escarificador deberá ser un modelo de dientes fijos, completos, del diámetro y largo suficiente para efectuar una escarificación total y uniforme.

- Colocación, esparcimiento.

Determinada la dosificación por volumen del cemento que debe añadirse al suelo natural, se procederá a determinar el espaciado de los sacos del producto en líneas paralelas a lo largo de la calzada previamente escarificada, definiendo así el área en metros cuadrados que deberá cubrir cada saco.

Una vez colocado los sacos de cemento se procederá a romper la envoltura de los mismos y a verter el contenido. El cemento no debe distribuirse en charcos de lluvia o sobre suelos extremadamente húmedos. Para distribuir el cemento pueden usarse rastras de diente o clavos, un trozo de cadena cuyos extremos vayan unidos a la parte trasera de una mezcladora rotativa, o rastrillos manuales la capa de cemento debe ser lo más uniforme posible para facilitar el mezclado.

- Mezclado y humectación suelo cemento.

El objetivo de esta etapa es repartir el cemento en la masa de suelo, solo se requiere un mezclado suficiente para prevenir la formación de grumos. En este momento de la construcción no es necesario mezclar en forma total e íntima.

Para la operación de mezclado de suelo y cemento se pueden utilizar básicamente dos tipos de equipos: mezcladoras rotativas o pulvimezcladoras o moto niveladora.

La operación de mezclado es más fácil si el contenido de humedad está dos o tres puntos por debajo del porcentaje óptimo. No obstante, los suelos arenosos pueden mezclarse aunque estén por encima del porcentaje óptimo. El agua debe regarse uniformemente durante el proceso de humedecimiento previo. Al mezclar el agua con el suelo se reducen las pérdidas por evaporación.

A continuación se incrementa la humedad con nuevos riegos, hasta llegar a la humedad óptima de compactación. El agua se mezcla después de cada riego, que se efectúa mediante un camión de distribución por presión o por medio de una barra distribuidora montada al frente del equipo de mezclado.

Después del último riego se continúa el mezclado hasta que el suelo, cemento y agua queden íntimamente mezclados en la totalidad del espesor y el ancho de la calzada. El material queda en condiciones de ser compactado.

- Compactado del material suelo cemento.

Una vez que el suelo cemento ha alcanzado la humedad óptima y ha sido total e íntimamente mezclado, debe compactarse de inmediato. La humedad óptima y la máxima densidad se determinan por el método Proctor Modificado. A veces es necesario reponer el agua perdida por la evaporación durante la compactación.

Existen numerosos equipos de compactación. Los más usados para el suelo cemento son los rodillos pata de cabra y los rodillos lisos. Los rodillos pata de cabra utilizados para compactar la mezcla de suelo cemento tienen sobrepeso para aumentar la presión unitaria transmitida, sin llegar a sobre tensionar el suelo cemento. Con estos equipos se compactan de manera satisfactoria, capaz de hasta 20 cm. de espesor. Cuando se utiliza este tipo de rodillos para la compactación inicial, el material debe estar suelto para que las patas puedan llegar hasta el fondo de la capa e ir compactando gradualmente. Cuando las patas no pueden penetrar lo suficiente se afloja la mezcla. Este procedimiento se utiliza para obtener mayores densidades.

Para compactar suelos arenosos con poco o ningún liante, como las arenas limpias y las gravas con poca o ninguna plasticidad, se emplean rodillos neumáticos, estos rodillos se

usan con cargas altas. Las arenas cohesivas pueden compactarse también con grandes tractores equipados con orugas planas

La compactación termina con un segundo rodillo neumático liviano con el fin de sellar las fisuras. Algunas veces durante las operaciones de compactación y el acabado aparecen zonas flojas puestas en evidencia por el equipo de construcción. Ésto se debe a una o varias de las siguientes causas: el suelo cemento contiene humedad muy superior a la óptima, o el rodillo es muy pesado para el suelo. Si el suelo cemento está demasiado húmedo, se debe airear con arado, una mezcladora rotativa o una moto niveladora. Después de que se ha secado hasta aproximadamente el contenido óptimo de humedad, se puede compactar.

Para obtener los mejores resultados en la compactación se debe comenzar inmediatamente después de la elaboración de la mezcla de suelo, cemento y agua. En esta forma se obtiene de manera rápida las densidades necesarias, hay menos evaporación del agua y el rendimiento aumenta.

- Acabado.

Existen varios métodos aplicables para la terminación del suelo cemento. El procedimiento adecuado depende del equipo, condiciones de la obra, características del suelo. Para producir una superficie de alta calidad, independiente del método utilizado, se deben cumplir las exigencias de la compactación, humedad cercana a la óptima y remoción de cualquier plano superficial de compactación.

Los planos superficiales de compactación son aquellos marcados por las ruedas del equipo, la cuchilla de la moto niveladora o las del rodillo patas de cabra, sobre las cuales no se adhieren adecuadamente las capas superiores, por lo tanto pueden desprenderse, aflojarse o fracturarse.

Las huellas superficiales y las marcas de la cuchilla de la moto niveladora que deja en el perfilado final deben removerse con una rastra de clavos. La superficie de trabajo debe mantenerse húmeda durante las operaciones de acabado.

El rodillo liso se pasa para que borre las huellas dejado por el rodillo neumático inicial. Además este equipo presenta ventajas especiales cuando se presentan partículas pétreas en la superficie. A continuación del cilindro es conveniente pasar una rastra de cepillos para rellenar con material ligante los intersticios dejados por la grava insertada en la superficie por la acción del cilindro.

- Curado.

El suelo cemento compactado y terminado tiene suficiente humedad para la hidratación adecuada del cemento. Con el fin de retener esa humedad, inmediatamente después del acabado se coloca sobre el suelo cemento una cubierta que permita la hidratación del cemento.

Una característica de todos los materiales producidos con cemento es el de figurarse como resultado de la contracción y el suelo cemento no es ajeno a este problema. Por lo tanto las fisuras que aparecen superficialmente son un indicador de que la hidratación del cemento ya se ha presentado. Las fisuras aparecen a los pocos días de finalizada la construcción, aun que pueden producirse otras en el transcurso de los primeros meses.

- Apertura al tránsito.

Al igual que otros materiales que contienen cemento, el suelo cemento requiere de un periodo de siete días para desarrollar una resistencia capaz de absorber el esfuerzo debido a las cargas de los vehículos. Debido al sistema constructivo utilizado, el material estará en capacidad de soportar tránsito con un peso menor que el equipo de construcción, inmediatamente se lo retire.

Si es necesario dar la vía al servicio inmediato, se debe esperar a que el suelo cemento haya endurecido lo suficiente para evitar descocamientos o daños a la superficie y se haya colocado el compuesto de curado. Si éste no ha secado completamente se puede colocar encima una capa de material arenoso para que no se adhiera a las llantas del vehículo.

- Control de calidad.

Además de la comprobación de las características de los materiales, se toman muestras a la descarga de la amasadora, de las que se determinaran granulometrías, contenido de agua y de conglomerante. En obra se controla la densidad obtenida, que no debe ser inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo de Proctor modificado, y la humedad de compactación. Se confeccionan probetas para obtener la resistencia a compresión a la edad específica en las especificaciones, de acuerdo con el tipo de cemento empleado. Y se comprueba la regularidad de la superficie acabada. A continuación se encuentra los controles posibles de efectuar en la construcción del suelo cemento.

- Existencia del equipo en buenas condiciones.
- Inspección de perfiles longitudinales y transversales.
- Existencia de materiales en buenas condiciones.
- Almacenamiento de materiales apropiados.
- Pulverizado correcto.
- Distribución uniforme del cemento.
- Adecuada cantidad de agua.
- Correcta dosificación del cemento.
- Uniformidad de la mezcla.
- Grado de compactación adecuada.
- Correcto espesor
- Curado adecuado.
- Reparación inmediata de defectos.

### **3.2.1.6. Comportamiento de los suelos estabilizados con cemento.**

#### **A. Comportamiento Estructural.**

Las reacciones de fraguado y el posterior endurecimiento del cemento convierten un material suelto, como es el suelo, en otro rígido, mucho más resistente. La estructura de

dicho material depende del tipo de suelo. En los de grano fino como los limosos y los arcillosos, se crea una matriz de tipo celular o de panal, cuyos huecos están ocupados por partículas del suelo sin cementar entre sí. En cambio en los suelos granular la estructura que se forma es más parecida a la de los hormigones. Sin embargo, a diferencia de estos últimos, la pasta de cemento no rellena completamente los huecos entre los granos del suelo, si no que por el contrario únicamente en los puntos de contacto entre los mismos se forman zonas cementadas. Cuanto mejor graduada es la granulometría del suelo, más reducidas son los huecos entre las partículas y más numerosos son los puntos de contacto, con lo que la cimentación es más eficaz. Por ello los suelos cementos suelen tener una resistencia y un modulo de elasticidad más reducidos que los de otros materiales como las grava cemento, siendo por lo tanto un material más flexible.

La resistencia del suelo cemento aumenta para un suelo dado con la densidad, el contenido de cemento y la edad de la mezcla.

- Relación esfuerzo-deformación.

Con respecto a la forma del comportamiento del suelo estabilizado, algunos estudios realizados muestran sus resultados con gráficas que muestran una parte no lineal significativa en la curva esfuerzo-deformación, para valores superiores al 80% de la carga de ruptura en suelos granulares y 60 a 80 % en mezclas con los suelos que contienen cantidades apreciables de finos.

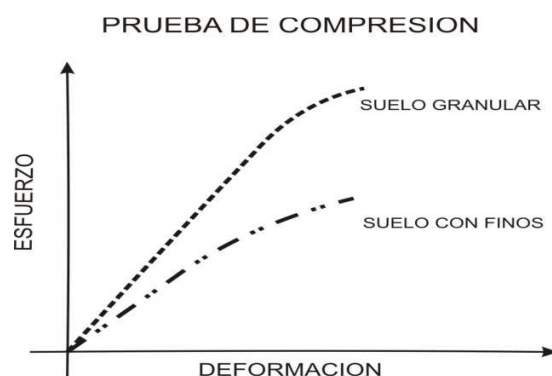


Fig. 3.1.- Grafica de curvas de esfuerzo-deformación en función del tiempo y del tipo de suelo.

- Resistencia a la compresión simple.

Los valores propuestos por la P.C.A. (Portland Cement Association) varían entre 10 a 65 kg/cm<sup>2</sup>. En España la instrucción a las compresiones dan los siguientes valores: no deberá ser inferior a 25 kg/cm<sup>2</sup> a 7 días ni alternativamente a 38 kg/cm<sup>2</sup> a 90 días. Este último valor es el que debe exigirse si es que se emplea cemento especial, a fin de no excederse con el contenido de cemento.

En este caso para facilitar el control de obra, deben realizarse ensayos previos para determinar la resistencia que deben alcanzarse a los 7 días. Normalmente un valor de 10 kg/cm<sup>2</sup> suele ser suficiente para garantizar un margen de seguridad aceptable.

La resistencia a la compresión simple varía principalmente con:

- El contenido y tipo de cemento usado.
- La eficiencia lograda en el cemento mezclado con el suelo.
- El tipo y cantidad de materia orgánica, sales y otros materiales existentes en el suelo.
- La cantidad y calidad del agua usada.
- El tiempo transcurrido después de realizada la humectación, mezclado y compactado de los materiales.
- El grado de compactación alcanzada.
- La duración y forma de hacer el curado.
- Las prevenciones tomadas para disminuir el agrietamiento.

Factores que intervienen en la variación de la resistencia:

- a) El tiempo.- La resistencia a la compresión simple aumenta con el tiempo. Todos los experimentos y mediciones realizadas demuestran que existe un apreciable aumento de la resistencia con el tiempo.

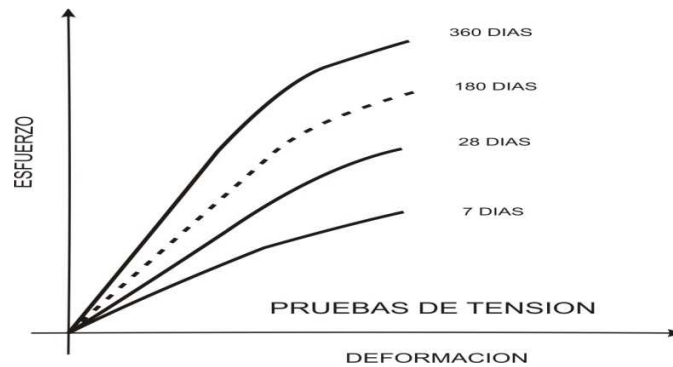


Fig. 3.2.- curvas esfuerzo-deformación en función del tiempo para la estabilización suelo-cemento.

- b) Contenido de cemento.- En general la resistencia a la compresión simple aumenta a medida que va aumentando la proporción de cemento en la mezcla, hasta llegar a un límite, este límite puede definirse a criterio y según la economía de la obra Sin embargo existe la posibilidad de que el contenido de cemento en algunos suelos con altos contenidos de finos rebaje provocando que tales resistencias se mantengan o bajen debido al encapsulamiento que producen las partículas de arcilla sobre las partículas de cemento, por ser éstas de mayor tamaño.
- c) Grado de pulverización y eficacia en el mezclado.- A mayor grado de pulverización y mejor mezclado se alcanzará una mayor resistencia a la compresión simple. Los suelos granulares son bastantes fáciles de mezclar con cemento, no siendo así con los finos, y por ello requieren de mucho esfuerzo para lograr una mezcla aceptable por lo que es difícil llegar a un 80% de efectividad con equipo normal, y valores del 60% son los más comunes.
- d) Efectos de los aditivos.- Estos productos usados de la forma adecuada vienen a reforzar algunas de las propiedades que se cree que ocurrirá en el desarrollo de las mezclas, dándole así mayor trabajabilidad al suelo cemento.
- e) Efecto de la compactación.- la compactación ejerce una gran influencia en la resistencia final. Una buena compactación mejorará significativamente las propiedades

deseables. Al contrario, sin una adecuada compactación los resultados serán muy pobres. A partir de la adición del agua, donde empiezan los cambios químicos importantes, es cuando el proceso de construcción ejerce una gran influencia.

El retardo en la compactación puede hacer completamente ineficiente el tratamiento, dos horas como máximo es lo que se considera aceptable, ya que el remoldeo posterior y las concentraciones de presión ejercida, destruyen los vínculos formados inicialmente.

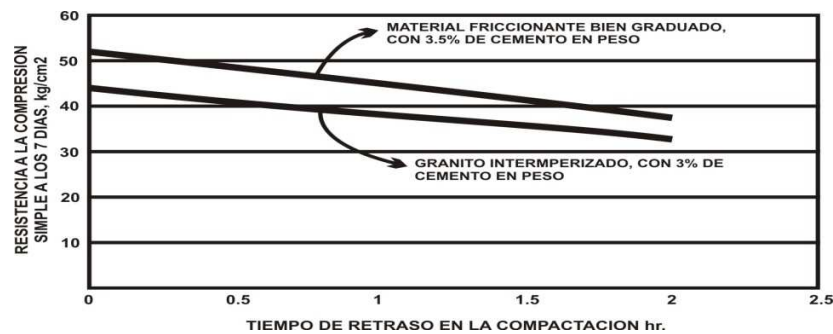


Fig. 3.3.- efectos del retraso de la compactación después del hidratado, en la compresión simple.

f) Efecto del curado.- El suelo cemento se comporta en forma similar a la de un concreto en cuanto al efecto de curado, que tiene gran importancia. Un buen curado aumenta la resistencia a la compresión simple.

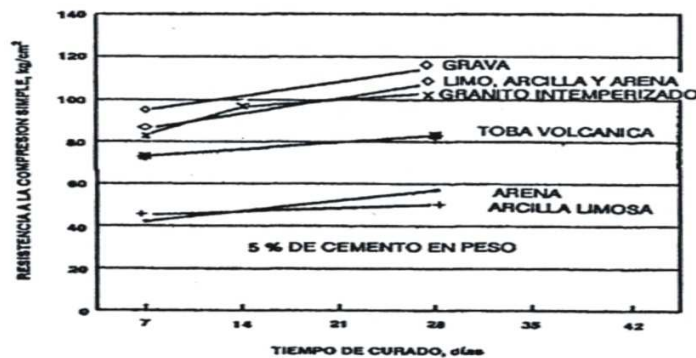


Fig. 3.4.- influencia del tiempo de curado en la resistencia a la compresión simple.

- g) El agrietamiento.- La tendencia al agrietamiento aumenta con el contenido de cemento a partir de algunos valores y por lo tanto provocará la disminución en la resistencia del conjunto, es necesario ver el efecto que tiene el aumento de cemento aunque la resistencia en parte, aumente y baje la del conjunto sobre el agrietamiento, y en lo posible tratar de controlar este fenómeno

El agrietamiento primero decrece en el contenido de cemento, hasta un límite y pasado este se produce un aumento considerable.

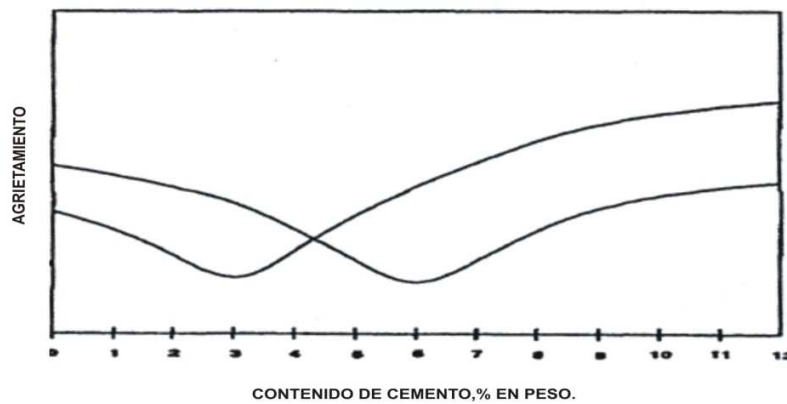


Fig. 3.5.- Formas típicas que muestran la influencia del contenido de cemento en el agrietamiento.

- h) Tipo de suelo.- El suelo cemento fabricado de materiales granúlales exclusivamente da un material duro y frágil. Con el aumento de fino se torna en un material menos duro y más plástico. Se alcanza una resistencia mayor a la compresión simple en mezclas con suelos bien graduados y de partículas duras en el de suelos mal graduados y de partículas menos duras.
- i) Temperatura.- La resistencia a la compresión simple aumenta en el incremento de la temperatura durante el curado. En climas cálidos la resistencia será mayor que la alcanzada en climas fríos.

- Valor relativo de soporte.

Los intentos para ligar el proporcionamiento de las mezclas con el valor relativo soporte (V.R.S. en español y C.B.R. en inglés), no han llegado a resultados concluyentes porque es usual que cualquier suelo cemento, y sobre todo los que contienen suelos granulares gruesos, alcancen valores sistemáticamente tan altos, que su interpretación sea poco confiable.

Como es poco común que en los diseños de pavimentos se utilice el C.B.R. como variable principal se aconseja sólo la manejen diseñadores expertos o en todo caso mejor no usarla.

TIPO DE CAPA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (I) (kg/cm <sup>2</sup> )	C.B.R. (2) %	EXPANSIÓN	PÉRDIDA DE DURABILIDAD
-Subrasantes .Material de relleno para trincheras.	7.0-14.0	20-80	27	
-Sub bases o bases para tránsito muy ligero.	3.5-10.5	50-150	2	10
- Bases para tráfico intenso.	14.0-56.0	200-600	2	14
-Protecciones de terraplenes contra erosión y acción del agua.	56	600	2	14

Tabla. 3.5.- valores del C.B.R. y otras propiedades exigidas para distintas capas de suelo cemento.

## B. Comportamiento Físico.

- Contracción transversal.-

La magnitud de la compresión está en función al contenido de cemento. Existen materiales que reducirán sus contracciones si se va agregando más cemento a la mezcla durante la fabricación, hasta alcanzar un límite. A partir de este mínimo se tendrán aumentos en la contracción a medida que se va incrementando el contenido de cemento para un máximo y finalmente volver a la tendencia de disminución.

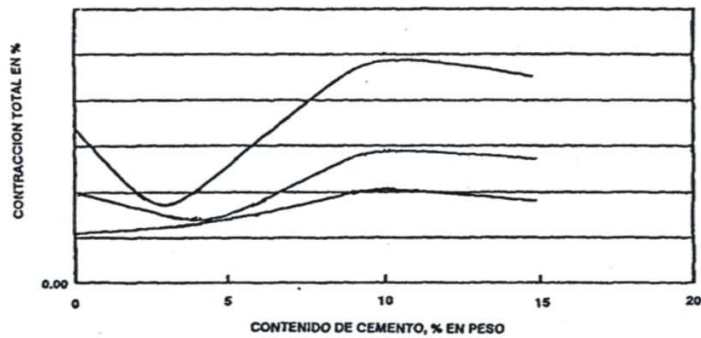


Fig. 3.6.- Curvas típicas de la variación de la contracción con el contenido de cemento.

En algunos casos sólo se presentará un máximo en magnitud de las contracciones para determinado contenido de cemento y luego su disminución. En suelos granulares depende principalmente de las características de la pasta de cemento y de la granulometría. En suelos finos la contracción transversal depende principalmente del porcentaje de la fracción arcillosa, mayor contracción a mayor fracción arcillosa y también de las características de la arcilla. Los aditivos que se han mostrado efectivos para disminuir la contracción son: la cal, el cloruro de sodio y el calcio, los sulfatos de sodio han sido útiles por sus propiedades expansivas para disminuirla.

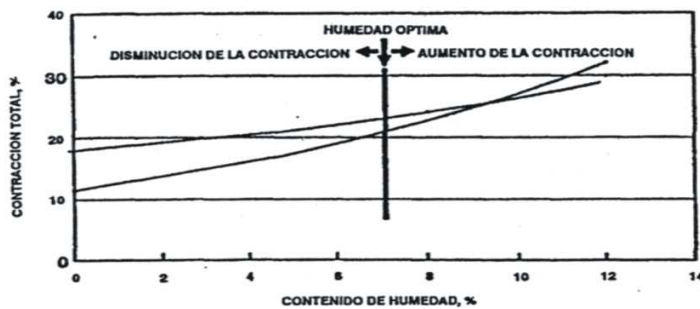


Fig. 3.7.- Efecto de la contracción por contenido de humedad durante la compactación.

Se ha determinado que a medida que aumenta la temperatura durante el mezclado y la compactación tiende a aumentar la contracción total en suelos arenosos, en cambio sucede lo contrario en suelos arcillosos. La contracción se puede disminuir mejorando la

compactación. En la figura 3:7, se observa que la compactación con humedad mayor a la óptima tiende a aumentar las contracciones.

- Agrietamiento.

El agrietamiento es uno de los agentes insatisfactorio del suelo cemento ya que si se lo ignora y no se toman las debidas providencias puede reducir la vida útil de los pavimentos y causar diseños deficientes.

El agrietamiento es una característica del suelo cemento. Se puede observar en casi todas las construcciones de suelo cemento, agrietamientos debido a la contracción relativamente pocas espaciadas. Estas grietas finas se forman de tal manera que permitan una buena traba o entrelazamiento del material, lo que es suficiente en pavimentos para que se comporte en forma similar a una base de piedra triturada. Algunos autores consideran a las bases de suelo cemento como una serie de trozos grandes que están juntos, a los que se llaman islas.

Las características del agrietamiento de la capa determinan en última instancia si el comportamiento será de tipo flexible o de tipo rígido. El agrietamiento importante por que definirá de manera decisiva el comportamiento estructural. Si el agrietamiento es pequeño la estructura resultante tenderá a comportarse rígidamente; al contrario, si existe mucho agrietamiento tenderá a trabajar de manera flexible. El aumento de agrietamiento con el tiempo tornará un pavimento rígido en uno flexible y finalmente lo hará poco útil.

El agrietamiento en las capas estabilizadas con cemento se debe principalmente a:

- Cambios en la presión del agua dentro de la mezcla endurecida, que se producen por pérdidas y variaciones en el contenido de agua libre existentes en los poros.
- Cambios en la estructura del suelo tratado (reorientación de las partículas durante el curado).
- La acción de las cargas impuestas por el tráfico.
- Las deformaciones de las capas inferiores del pavimento y del suelo de cimentación.
- Cambios físicos-químicos en las características de los componentes.
- Cambios de temperatura.

La temperatura en general ejerce menor influencia, en capas de poco espesor, aunque en algunos casos puede ser significativa. Las cargas y deformaciones pueden producir un agrietamiento importante conforme pasa el tiempo. También los cambios físicos-químicos en los componentes y en la estructura pueden producir agrietamientos importantes a corto plazo. Aunque las pérdidas y el cambio del contenido de agua libre son los que generalmente producirán mayor efecto a corto y largo plazo.

La humedad pierde o se cambia por:

- Evaporación del agua.
- Desecación después del curado.
- Pérdidas de agua libre por reacciones químicas (hidrólisis).
- Pérdida de agua libre por absorción en las fronteras de las partículas sólidas.
- Pérdidas de agua libre por hidratación interna de las partículas.

Durante los primeros días de hidratación del cemento se producen agrietamientos importantes que disminuyen paulatinamente en los meses siguientes durante el secado de la mezcla compactada.

Los principales factores que influyen en el agrietamiento son:

- Características del suelo por tratar.
- Sales, óxidos y diferentes compuestos que están presentes en el suelo, como agregados.
- Características del cemento.
- Características del agua.
- Contenido de agua en la mezcla durante la compactación.

El agrietamiento aumentará si se compacta el lado húmedo de la curva de compactación.

- Grado de compactación. El agrietamiento se reduce substancialmente aumentando la compactación.
- Método de compactación utilizado.

- Como se hace la compactación.
  - Tiempo de curado. En general, un curado demasiado prolongado aumenta el agrietamiento de los suelos arenosos y lo disminuyen los suelos arcillosos.
  - Condiciones ambientales. Temperatura, humedad, etc.
  - El tránsito de vehículos.
  - Asentamientos en el suelo y terraplén.
  - El tiempo de uso.
  - La rigidez de la capa superior de rodamiento.
- Resistencia al desgaste.

La resistencia al desgaste dependerá principalmente del contenido de cemento, del contenido de finos y de la calidad de la construcción. Se ha observado que:

Cuando se usa superficialmente se desgasta rápidamente bajo la acción abrasiva del tránsito, por lo que casi siempre se recurre a proteger las capas de suelo cemento colocando sobre ella una capa de concreto asfáltico. El suelo cemento es bastante resistente a la acción erosiva de las lluvias.

- Resistencia a la absorción el agua y al hinchamiento.

Esta resistencia dependerá de la cantidad de finos y de qué tipo son, así como el contenido de cemento. Aunque en general tendrá suficiente resistencia, es conveniente evitar que el agua penetre, sobre todo aquellos construidos con cantidades considerables de finos plásticos. Los suelos expansivos dan capas comparativamente blandas después de tratados y colocados.

- Resistencia al congelamiento.

El suelo cemento alcanza una excelente resistencia a la congelación. La resistencia a la congelación dependerá de la cantidad y tipo de cemento usado, así como el tipo de suelo.

Por alcanzar buenas características de resistencia a la congelación se utiliza mucho en países con frío extremo, para tener una hipótesis más acertada se debe realizar la prueba de laboratorio.

- Susceptibilidad para ligar con capas adyacentes.

Es común observar que las capas asfálticas y las distintas capas de suelo cemento, no se adhieren firmemente a la capa anterior. Por esta causa y por la acción del tráfico se han desprendido con relativa facilidad unas de otras cuando no se toman las medidas pertinentes.

Lo apropiado es un buen procedimiento de construcción y utilizar aditivos. En obra cuando se construye las capas, éstas deben mezclarse y compactarse de manera rápida, en unas dos horas aproximadamente después de colocada, por que el material comienza el proceso de fraguado y no se produce la liga correcta, sino mas bien se produce un rompimiento de los pequeños enlaces que se produjeron hasta ese momento, reduciendo considerablemente su resistencia.

### **3.2.2. Cal como Estabilizante.**

#### **3.2.2.1. Cales adecuadas en la utilización de estabilización suelo-cal.**

Se pueden distinguir distintos tipos de cales entre las más importantes están:

- Cales aéreas.- cales que se componen principalmente de oxido e hidróxido de calcio y magnesio, los cuales endurecen lentamente al aire por la acción del CO<sub>2</sub> de la atmosfera. No presentan propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con el agua y se obtienen a partir de rocas calizas con contenidos en carbonatos superiores al 95%.

- Cales hidráulicas.- a diferencia de las cales aéreas, endurecen en contacto con el agua. Se obtienen a partir de calizas que contienen arcillas (sílice y alúmina). Durante la

calcinación y la posterior hidratación se forman silicatos y aluminatos cálcicos que son los que confieren las propiedades hidráulicas.

Se recomiendan usar cales aéreas para tratamientos de suelos y/o estabilización de suelos, ya sean cales aéreas vivas o apagadas, pues son las que actúan más eficazmente sobre los suelos por liberar rápidamente iones de  $\text{Ca}^{++}$ , responsables de la floculación de las partículas de arcilla y por elevar el pH del suelo a valores en torno al 12,4 para producir la reacción puzolánica causante del incremento de la resistencia mecánica a largo plazo.

La cal aérea se obtiene a partir de rocas calizas, compuestas mayoritariamente por carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ). Mediante la calcinación de la caliza, previamente machacada y clasificada, a unos 950 a 1000 °C en un horno industrial especial, se logra la descomposición del carbonato cálcico.

Posteriormente el óxido de calcio o cal viva ( $\text{CaO}$ ) se puede combinar con agua en un proceso industrial controlado de hidratación, para dar lugar al dihidróxido de calcio o cal apagada o hidratada [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ].

La cal puede utilizarse en polvo o bien en forma de lechada, que es una suspensión de cal apagada en agua. Su empleo en tratamiento de suelos permite, por un lado, evitar el polvo producido durante el extendido de la cal, y por otro, controlar mejor la humedad de los suelos secos.

- Ventajas y desventajas del uso de la cal viva.

a) La cal viva contiene 24 % más cal ( $\text{CaO}$ ), o iones de calcio disponible, que en porcentaje significa que 3% de cal viva equivaldría a 4% de cal hidratada.

b) El calor generado por la hidratación de la cal viva acelera el fragüe de la mezcla de suelo-cal compactada, además, rebaja en mayor medida la humedad del suelo, permitiendo

de esta manera la posibilidad de prolongar el uso de la cal al final de las épocas de lluvia y la estabilización de suelos muy húmedos o saturados.

El detalle de las desventajas de la cal viva para la estabilización de suelos se desglosa a continuación:

a) La cal viva requiere agua para poder apagarla y para compensar las pérdidas por evaporación de la humedad óptima de la mezcla, la cual es causada por el calor de hidratación de la cal viva, por lo tanto, su uso puede descartarse en lugares secos donde el agua no se obtiene fácilmente.

b) La mezcla de Suelo-cal no resulta tan homogénea si se emplea cal viva en terrones, ya que al hidratarse no es tan fina como la cal hidratada comercial. Además éste tipo de cal tiene la tendencia a aglomerarse durante el manipuleo con el suelo. Pero aunque la anterior desventaja se puede reducir al mínimo utilizando la cal viva pulverizada, ésto acentúa su grado de peligrosidad para los obreros, limitando así su uso en épocas muy calurosas, húmedo o con mucho viento.

c) El método más seguro para usar cal viva es apagarla en un tanque en la misma obra convirtiéndola así en lechada, claro que esta alternativa es desventajosa, en el sentido de que se necesita mucha experiencia de un personal experimentado, para evitar accidentes y además existe el costo adicional del equipo para apagarla y bombearla.

d) En general se recomienda el uso de cal viva para la estabilización de suelos sólo cuando las operaciones de almacenamiento, transporte, extendido y mezclado estén muy automatizadas y no representen ningún peligro para los operarios. Y cal apagada cuando se usen máquinas más convencionales o intervalos largos entre las diversas fases del proceso, especialmente en el extendido y mezclado.

### **3.2.2.2. Características generales de la cal.**

La American Society for Testing and Materials (ASTM), en el año 1995 realizó la última revisión de la norma con designación C-997: “Especificación estándar para cal viva y cal hidratada para la estabilización de suelos”. Esta norma abarca la cal viva y la cal hidratada para la estabilización de suelos, y en el fondo indica las características químicas y físicas que se requieren en ella para trabajos de estabilización de suelos.

En su composición química la cal hidratada debe consistir esencialmente de hidróxido de calcio o de una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio o hidróxido de magnesio, que son los ingredientes activos de la cal. Pero para formar la cal estabilizante, no es preciso tener una pureza total, sino que pueden tolerarse algunas impurezas. La norma ASTM (American Society for Testing and Materials) indica los requisitos mínimos en cuanto a la composición química que se exigen en la cal estabilizante, de acuerdo a los siguientes parámetros:

a) Óxidos Totales.- Este ensayo determina la concentración de cal y su aplicación sirve tanto para la cal con alto contenido de calcio como para la cal hidratada dolomítica. Para estos tipos de cal, la especificación ASTM C977 indica que se requiere un mínimo de 90 % del total de contenido óxido ( $\text{Ca O} + \text{Mg O}$ ) en una base libre.

b) Dióxido de Carbono.- Si se ejecuta el anterior ensayo y el muestreo se realiza en la misma planta, el hidrato no debe tener más de 5 % de dióxido de carbono; pero si el muestreo se realiza in situ no debe exceder más de un 7 %.

c) Humedad Libre La cal hidratada no debe contener más del 2 % de humedad libre, si el muestreo se hace en planta

En sus características físicas, es necesario obtener una cal cuya granulometría sea lo suficientemente fina, para ello la cal hidratada y la cal viva debe obedecer los siguientes requerimientos en cuanto al tamaño de sus partículas.

a) Cal hidratada.- la cal hidratada deberá tener como máximo un 3 % de material retenido en el tamiz # 30 y no más del 25 % de material retenido en el tamiz # 200.

b) Cal viva.- La cal viva debe pasar el 100 % por el tamiz de 1" (25.4 mm.). Asimismo la cal viva empleada en la estabilización de suelos deberá elevar una temperatura mínima de 30 °C en 20 minutos.

c) Residuos de cal viva.- La cal viva para la estabilización de suelos no deberá tener más de un 10 % en peso de residuos.

Además se deberán tomar en cuenta aspectos como:

a) Finura del molido.- es una característica importante en la medida que interviene en las condiciones de almacenamiento, transporte y mezcla con el suelo. El apagado o hidratación de la cal viva con agua da lugar, a una auto pulverización muy fina, incluso micronizada, del producto. Por otra parte, la finura puede intervenir en la reactividad de la cal.

La finura de la cal se evalúa mediante un análisis granulométrico. Más del 98% de las partículas deben ser inferiores a 0,2 mm.

b) Reactividad de la cal.- esta característica es muy importante debido a un doble motivo. Por un lado, refleja la calidad de la cal en cuanto a su capacidad de reacción, indicando que las reacciones buscadas se producirán en forma rápida. Y por otro lado cuando se emplee para el secado de suelos húmedos, permite estimar su eficacia para este tratamiento.

El ensayo se realiza sobre la cal viva, y permite medir la rapidez de reacción de este con el agua. Se evalúa midiendo el tiempo en que se tarda alcanzar una temperatura de 60°C al agitar una muestra de cal viva en agua.

Dicho tiempo deberá ser menor a 15 minutos, siendo más reactiva la cal cuanto menor sea el tiempo.

### **3.2.2.3. Suelos aptos para la estabilización con cal.**

Debe tenerse presente que no todos los suelos pueden ser estabilizados con cal. Por lo general, la cal reacciona bien con los suelos finos muy cohesivos y también con los suelos granulares que contienen demasiados minerales arcillosos, tales como gravas y arenas arcillosas, que también son considerados como suelos cohesivos.

La National Lime Association, establece que los suelos más aptos para una estabilización con cal son los que tienen un índice de plasticidad mayor a 10, y tienen por lo menos un 25% de material que pasa el tamiz # 200. Por otro lado Indiana Department of Transportation, especifica un tipo de suelo con índice plástico mayor a 10 y con un contenido mínimo de arcilla de 10%.

Existe también otro tipo de materiales que resultan impropios para una estabilización con cal, algunos de ellos son los suelos orgánicos que contienen más de 3% de sustancia orgánica. Dicha sustancia provoca que el suelo sea difícil de estabilizar con cal y en algunos casos pueda que exija cantidades encarecedoras de cal.

Por otro lado, los suelos que contienen sulfatos en exceso (sales de ácido sulfúrico), también resultan inadecuados para una estabilización con cal, ya que las concentraciones altas de sulfato (sea de calcio, magnesio o sodio), conllevan a reacciones deletéreas entre la cal, los minerales de suelo, los iones de sulfato y el agua. Estas reacciones deletéreas provocan un cambio en la resistencia del suelo compactado que se manifiesta durante la etapa de curado de la capa estabilizada. Sin embargo, la National Lime Association, ha demostrado que si la mezcla se ejecuta bien y se compacta con aproximadamente 5% sobre la humedad óptima, los sulfatos del suelo pueden reaccionar mientras se realiza el mezclado y no así durante el curado. Aunque si ocurre un cambio negativo en la resistencia debido a éste factor, fácilmente puede escarificarse la capa estabilizada y repetir el mezclado con la

adición de una pequeña cantidad de cal para compensar las pérdidas debido a la carbonatación.

La forma más precisa de identificar la presencia de sulfatos en el suelo es a través de la detección en laboratorio del radical  $\text{SO}_3$  ó, trióxido de azufre. La National Lime Association recomienda un contenido máximo de sulfatos de 0.3% para que un suelo sea conveniente para una estabilización con cal.

Diversas son las reacciones que se generan cuando se mezcla el suelo húmedo con la cal, las mismas se producen simultáneamente haciendo compleja su separación y análisis durante el proceso.

La Nacional Lime Association patrocinó un estudio para identificar y agrupar las principales reacciones del proceso, resumiendo el mismo de la siguiente manera: (1) intercambio iónico, (2) floculación y aglomeración, (3) carbonatación y, (4) reacción puzolánica o cementante.

1) Intercambio Iónico.- Este fenómeno en el proceso de estabilización con cal se desarrolla de manera forzada, ya que se aumenta intencionalmente en el suelo la concentración de cationes fuertes de calcio que reemplazan a los cationes metálicos débiles tales como: H, K, Na, y  $\text{NH}_4$ , que normalmente están presentes en forma natural en el suelo. Esto lleva a que algunos investigadores creen que la molécula de hidróxido de calcio es absorbida por la superficie de la arcilla. De cualquier forma, la saturación del calcio o de la molécula de hidróxido de calcio sobre la superficie de la arcilla, reduce la fuerza de la misma con la cual atrae y retiene las moléculas de agua.

2) Floculación y Aglomeración.- Esta reacción se debe a diversos factores como el intercambio iónico, el aumento de la valencia iónica y la concentración de electrolitos. Estos factores llegan a modificar el espesor de la doble capa de difusión, lo cual provoca una fuerza resultante de atracción entre las partículas de arcilla, que tienden a moverse la una hacia la otra hasta entrar en contacto y aglutinarse en partículas de mayor tamaño. Como resultado se tiene un notable cambio de textura de las fracciones de arcilla.

3) Carbonatación.- La reacción de la cal con el dióxido de carbono del aire, forma un agente cementante relativamente flaco de carbonato de calcio o de magnesio, el cual dependerá mucho del tipo de cal usado. Por lo tanto generalmente se considera ésta reacción desfavorable, aunque en materiales calcáreos la cal ha sido empleada para reforzar el desarrollo del agente cementante de la carbonatación, la que une las partículas de carbonato y juntos producen una sustancial resistencia a esfuerzo cortante y un aumento sustancial de rigidez.

4) Puzolánica y Cementante.- Es la reacción más importante en una estabilización con cal, ya que de ella depende la ganancia de resistencia y durabilidad del material estabilizado. Este fenómeno se produce debido a la reacción entre el calcio de la cal, con el sílice y la alúmina que son los minerales liberados por el suelo arcilloso y conocidos comúnmente como material puzolánico.

La combinación de los tres componentes, más el agua, produce un gel de silicato y aluminato de calcio hidratado, que es un agente cementante natural que cubre y liga las partículas de arcilla. Luego éste gel va cristalizando gradualmente hasta cementar las partículas de arcilla de manera similar a aquella producida por la hidratación del cemento Pórtland, pero con la diferencia de que en la cal, este proceso de cementación es más lenta y progresiva en el tiempo.

#### **3.2.2.4. Determinación del porcentaje mínimo y óptimo de cal en la estabilización de suelos**

En el caso de los tratamientos con cal, sus aplicaciones son muy variadas, por lo que no hay una metodología única para su dosificación, Siempre hay que tener en cuenta los siguientes principios o conceptos.

- En primer lugar, el porcentaje adecuado de cal dependerá de cuáles son los objetivos: secado, modificación o estabilización. En determinados casos se buscaran varios de

estos objetivos a la vez y, por lo tanto, habrá que diseñar la fórmula de trabajo que logre alcanzarlos. Dicho porcentaje siempre debe especificarse sobre masa de suelo seco.

- En segundo lugar, el porcentaje mínimo de cal dependerá de las exigencias de la capa tratada: terraplenes, desmontes, formaciones de explanadas subrasantes, etc.
- Porcentaje mínimo de cal.

El porcentaje mínimo de cal será el que permita lograr (al suelo tratado con cal) las exigencias necesarias para poder ser empleado en la capa de que se trate. Por lo tanto, este porcentaje será en función al tipo de capa que se esté diseñando y de los objetivos que, de forma conjunta o separada, se estén buscando en cada caso.

- Secado de suelos excesivamente húmedos.- es este caso el porcentaje de cal viva será el que logre reducir la humedad del suelo hasta valores cercanos a la óptima de compactación.

Este efecto dependerá también de los factores ambientales de la obra que, además, pueden ser muy variables de unos días a otros, lo que, exige un control y reajuste diario in situ.

Dado que las condiciones de soleamiento, humedad ambiente y viento son muy diferentes en obra que en laboratorio, una vez fijado un porcentaje de cal a emplearse necesario comprobar que esta dotación es suficiente para lograr alcanzar el objetivo planteado. La evaluación de la humedad final conseguida después de la mezcla del suelo con la cal debe realizarse mediante secado con estufa, ya que se ha observado que el gamma densímetro proporciona en algunos casos resultados sin la precisión requerida.

Porcentajes por debajo del 1% no suelen ser efectivos, ya que existe el riesgo de posibles deficiencias tanto en el extendido como en la envuelta.

- Modificación de suelos para capas de cimiento de firme.- en este caso el porcentaje a aplicar de cal viva o apagada será el necesario para modificar las características geotécnicas de los suelos hasta los valores exigidos para la capa de que se trate: fondos de desmonte, cimiento, núcleo y espaldones de terraplenes, etc.

Para ello se analizarán muestras de suelo con distintos porcentajes de cal, a fin de determinar la dotación que permitan alcanzar los valores exigidos en cuanto a C.B.R., índice de plasticidad, hinchamiento, etc.

- Estabilización de suelos.-

El porcentaje necesario de cal viva o apagada vendrá dado por las exigencias del tipo de suelo estabilizado a conseguir. En este sentido se definen dos tipos de suelos estabilizados in situ con cal. En función de su índice CBR.

<b>Tipo de suelo estabilizado</b>	S-EST 1	S-EST 2
<b>Porcentaje mínimo de cal.</b>	2%	3%
<b>Índice CBR a 7 días</b>	$\geq 6$	$\geq 12$

Tabla 3.6.- Denominación de los tipos de suelos estabilizados con cal.

Se fija un porcentaje mínimo del 2 o el 3%, según el tipo de suelo, con el objeto de garantizar una cierta homogeneidad del contenido de cal en todos los puntos de la capa tras el mezclado.

A partir de este valor mínimo, la dotación de cal necesaria será aquella que permita obtener una capacidad de soporte del suelo que viene fijada por el valor índice CBR a 7 días.

No es inusual que las dotaciones mínimas de cal especificadas permitan cumplir los requisitos en cuanto a su capacidad de soporte casi inmediatamente. En estos casos puede ser de utilidad realizar ensayos a 1 día, para poder adoptar decisiones rápidas en obra en caso necesario.

- Porcentaje óptimo de cal.

Frente a estas dotaciones mínimas, el diseño de un tratamiento con el porcentaje óptimo de cal puede aplicarse a cualquier de los casos anteriores, partiendo de la idea de que este porcentaje es que permite aprovechar al máximo los efectos de la cal sobre el suelo a tratar.

De esta forma se logrará un material con unas propiedades geotécnicas y resistentes adecuadas, que no sólo cumpla las especificaciones necesarias si no que, además tenga unas prestaciones y durabilidad aun mejores.

- Secado.- El efecto de secado depende de la cal empleada y de las condiciones de la obra. El método a seguir por tanto, ha de ser empírico, es decir, se deberán realizar tramos de prueba con distintos porcentajes de cal viva (de 1,0 al 3,0%) para comprobar, dos o tres horas más tarde, con cuál de ellos se obtiene la humedad optima.

Como dato inicial puede tomarse el criterio de que 1% de cal en peso reduce la humedad del material entre un 3 y un 5%, aunque en ocasiones se ha llegado a conseguir reducciones superiores.

Además, al mezclar el suelo con la cal, se produce también una modificación inmediata, de tal forma que la nueva curva Proctor se desplaza ligeramente hacia abajo y hacia la derecha, aumentando por lo tanto la humedad optima de compactación. Como consecuencia, esta humedad estará más próxima a la del suelo que se pretende secar.

El diseño y el control de la ejecución de esta aplicación han de estar basado en el día a día y llevarse a cabo a pie de obra, pues depende fundamentalmente, de las condiciones climatológicas del lugar, que pueden ser muy variables y difíciles de predecir.

Con temperaturas muy bajas, el agua del suelo puede encontrarse en estado sólido, es decir en forma de hielo. En este caso, la dotación de cal viva ha de ser la necesaria para fundirlo,

por efecto de la reacción exotérmica de hidratación, y reducir, además, la humedad hasta los valores óptimos.

- Modificación.- en este caso, el porcentaje óptimo de cal será aquel que logre sobre el suelo de partida, de forma conjunta.
- Reducir, e incluso anular, su índice de plasticidad.
- Disminuir, e incluso anular, su hinchamiento potencial. A este respecto, son más aconsejables, por el tipo de suelos en que se suelo realizar este tratamiento, los datos basados en el ensayo de hinchamiento libre.
- Incrementar de forma apreciable el índice de CBR del suelo, o cualquier otro que evalúe su capacidad de soporte.

La forma de evaluar estos tres parámetros consiste en elaborar graficas con la evolución de los mismos para distintos porcentajes de cal, siendo el óptimo aquel a partir del cual dejan de apreciarse de forma notable los efectos de la misma.

La evolución de estos parámetros también es importante para poder detectar el riesgo de sobre-dosificación. El hecho de que a partir de un determinado porcentaje de cal no solo no se produjera una mejora clara sino que, por el contrario, se observase un empeoramiento de alguno de ellos, alertaría de dicha posibilidad. En este caso, parte de la cal no encuentra una fracción arcillosa con la que reaccionar y por su propia constitución, perjudica el material resultante, obteniéndose peores resultados en la caracterización.

- Estabilización.- en el caso de que las capas analizadas fueran a utilizarse como bases o subbases, subrasantes, de firmes o capas equivalentes para otro tipo de infraestructuras, en las que sea necesario evaluar los efectos a largo plazo de las reacciones puzolánicas entre el suelo y la cal, y el porcentaje óptimo será aquel con que se obtenga el valor mayor posible de resistencia a compresión.

A este respecto podría ser importante adoptar el procedimiento de Eades y Grim. Este es un método muy útil por su rapidez y fiabilidad que consiste en basar el estudio para su estabilización en el método del pH, desarrollado en 1966 e indicado en la norma norteamericana ASTM C 977-00 (apéndice X1).

Este procedimiento se base en el hecho de que la adición mínima de cal necesaria para estabilizar (a largo plazo) un suelo es aquella que garantiza el mantenimiento de un elevado pH que permita el desarrollo de las reacciones puzolanicas.

Para ello se ensayan muestras con distintos porcentajes de cal, midiéndose el pH en unas condiciones determinadas. El porcentaje mínimo necesario de cal es aquel que permite alcanzar el valor de 12,4.

No obstante, el parámetro que mejor permite evaluar el comportamiento de los suelos estabilizados frente a las sollicitaciones del tráfico durante su vida útil es su resistencia a la comprensión.

La resistencia a la comprensión de los suelos estabilizados con cal comienza a mejorar desde la mezcla, pero su evolución es más lenta que la del cemento, debido a que las reacciones puzolanicas se van produciendo a medio y largo plazo, sin fraguado hidráulico.

Por lo tanto, para evaluar la resistencia a comprensión alcanzada por una mezcla suelo-cal deberá los valores de resistencia en un plazo mínimo de tres meses, en el caso de tratarse de una capa de coronación, y de seis a ocho meses en el caso de que se trate de otras capas más sollicitadas.

### **3.2.2.5. Procedimiento constructivo para estabilizar suelos con cal.**

Existen dos procesos o formas de construcción para hacer realidad la estabilización de una vía utilizando la cal como aditivo estabilizante: (1) Con mezcla en sitio, y (2) Con mezcla en planta central. Pero en este trabajo solo se describirá lo referente a la construcción con mezcla en sitio debido al costo y a la maquinaria que involucra el mezclado en planta central; asimismo el mezclado en sitio se aplica de dos formas: (a) Método seco, y (b)

Método de lechada, de los cuales se describe sólo el Método seco, porque este se adecua a las condiciones económicas y de disponibilidad de equipo en nuestro medio.

El proceso de construcción con mezclado en sitio es una de las formas más delicadas de fabricar las mezclas suelo-cal, especialmente cuando se trata de estabilizar aquellos materiales que son muy finos y muy cohesivos.

Si se está considerando la posibilidad de utilizar este procedimiento de construcción, se debe tener la maquinaria disponible, que consiste básicamente en tres tipos diferentes de equipo, como ser: equipos agrícolas, moto niveladoras y compactadoras.

La utilización de mezcladoras rotativas permite mejorar el rendimiento y la calidad del mezclado durante la construcción, lo que facilita la recuperación de la inversión realizada. Los equipos agrícolas (arados de reja múltiple) junto con las moto niveladoras, pueden ser también utilizados para el proceso de mezclado cuando la calidad de la mezcla no se vea muy afectada; pero en definitiva, no es fácil lograr una mezcla homogénea y alcanzar la resistencia deseada utilizando estos equipos por lo que es importante realizar tramos de prueba y seguir muy de cerca las recomendaciones de normas, para los objetivos trazados.

- Preparación del suelo y almacenamiento de la cal.

La preparación de los suelos consiste en una serie de preparaciones previas cuya ejecución es necesaria, y muy importante, para mejorar los rendimientos del tratamiento propiamente dicho.

El suministro y almacenamiento de la cal debe hacerse teniendo en cuenta los criterios de accesibilidad, distancias, espacio necesario, seguridad y ritmo de producción de la obra. El almacenamiento de la cal en obra debe hacerse en contenedores estancos y dotados de sistemas de filtros que eviten el contacto con la humedad y con el aire para evitar la re carbonatación con el CO<sub>2</sub>.

- Escarificación y pulverización preliminar del suelo.

La primera operación constructiva consiste en la escarificación del suelo ya perfilado. Esta operación busca desprender la capa de suelo con la cual se va a trabajar y al mismo tiempo reducir un poco el tamaño de las partículas.

El equipo que se utiliza para este trabajo consiste comúnmente en escarificador de moto niveladora, escarificador de tractor oruga o también la rastra de discos.

Debe escarificarse el suelo hasta topar la profundidad y el ancho especificado, para ello, es recomendable colocar estacas con el fin de controlar el ancho del tratamiento y guiar a los operadores del equipo durante la construcción. Todo material extraño, por ejemplo: raíces, palos, pasto, etc., así como los agregados de tamaño superior a tres pulgadas deben ser retirados y botados fuera del área de trabajo. Paralelamente a la escarificación debe realizarse la operación de pulverización preliminar, la misma que busca reducir aún más el tamaño de las partículas de suelo hasta por lo menos dos pulgadas, esto con el fin de facilitar el posterior mezclado preliminar con la cal.

Para realizar el trabajo de pulverización se usa comúnmente la rastra de discos o con la mezcladora rotativa pulverizadora. Se prefieren estas últimas ya que son más eficaces para efectuar este trabajo.

Si el suelo está demasiado seco, se agrega agua para facilitar la pulverización. Y si está muy mojado puede emplearse la mezcladora rotativa o la rastra de discos para airear y secar el suelo, especialmente si el material tratado contiene arcillas muy plásticas.

Aunque lo común es escarificar el suelo antes de esparcir la cal, un procedimiento inverso consiste en distribuir primero la cal sobre la superficie perfilada y luego proceder al pulverizado inicial. Esto es conveniente en el caso de los suelos arcillosos muy húmedos o saturados (barro), ya que los camiones distribuidores de cal circulan más fácilmente si el camino está más firme, en lugar de húmedo y escarificado. Sin embargo, la desventaja principal de tal procedimiento radica en las condiciones atmosféricas; pues cuando la cal se coloca sobre una superficie lisa, existe la posibilidad de desperdicio por el viento y la lluvia si el mezclado no se realiza de inmediato. Por otro lado, si se adopta este procedimiento se

recomienda construir un pequeño caballete a cada lado del camino, empleando el material de la calzada para reducir las pérdidas hacia los costados.

Esta etapa consiste en la adición de cal en el porcentaje especificado por el diseño. Para realizar esta operación pueden emplearse el método “seco” o el método de la “Lechada”. Por razones ya antes justificadas se tratara exclusivamente el método “seco”. Este consiste en distribuir manualmente las bolsas de cal en todo el ancho y largo del camino, dando el espaciamiento y el orden debido a las mismas. Asimismo al aplicar este método, es aconsejable rociar con agua ligeramente el camino antes de extender la cal para reducir de esta forma el levantamiento de polvo de cal.

Es el método más sencillo y recomendado para obras pequeñas que tienen un volumen muy reducido de cal. Pero si se opta por utilizar este método, es importante realizar antes el cálculo del espaciamiento de las bolsas de cal con la finalidad de obtener una distribución que cumpla con la cantidad de cal en peso indicado por el diseño hecho en laboratorio. Este cálculo puede ser realizado a través de los ábacos de las figuras 3:8 y 3:9., para bolsas de 30 Kg.

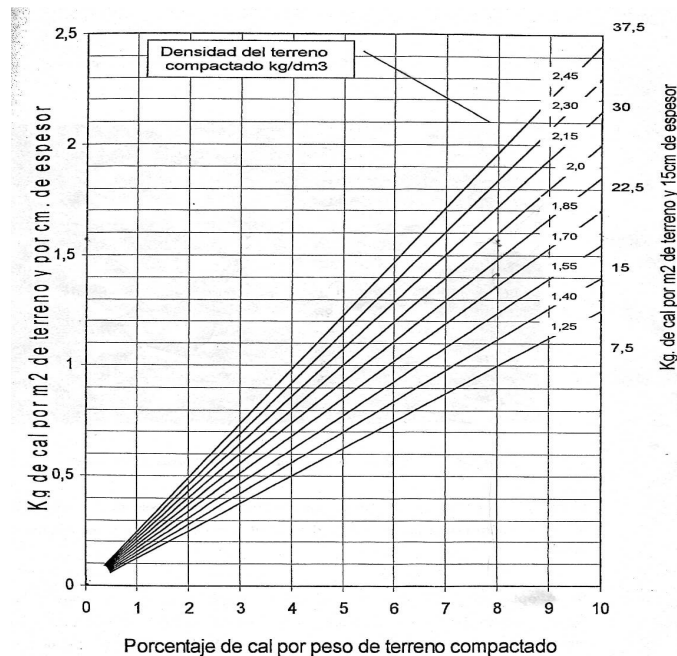


Fig. 3.8.- Ábaco para la dosificación y rendimiento de la cal.

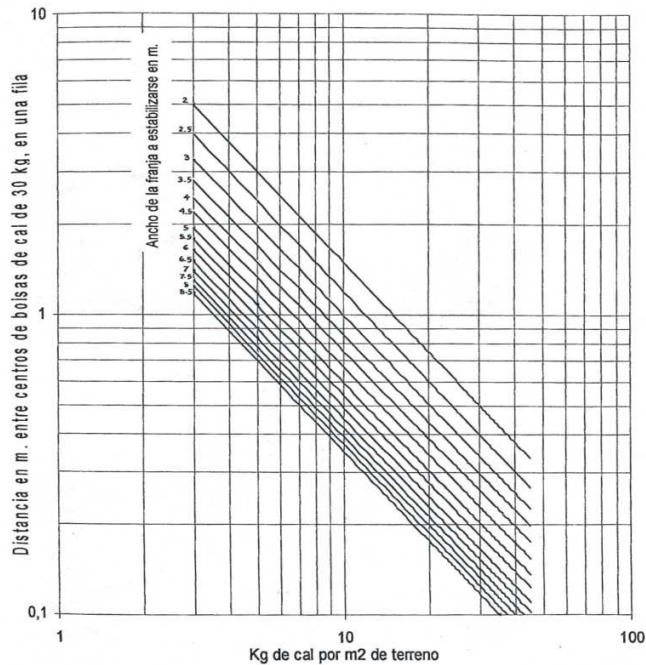


Fig. 3.9.- Ábaco para determinar la distancia entre bolsas.

Cuando el mezclado se realiza en camellones de suelo y utilizando la moto niveladora, pueden usarse una o dos líneas de bolsas. Pero si se utilizan mezcladoras rotativas pueden emplearse varias líneas, por ejemplo en forma de un tablero de ajedrez.

Después de que las bolsas han sido colocadas en la forma debida, se cortan y vacían su contenido, formando montículos o caballetes transversales de cal en todo el camino.

Luego estos caballetes se nivelan o extienden mediante un rastrillo de mano o, utilizando una rastra de dientes o clavos, que generalmente funciona impulsada por un tractor o camión. En esta última forma de esparcir la cal, casi siempre se necesitan dos o más pasadas para nivelar la cal.

En esta última operación, se recomienda no extender la cal con la hoja de la moto niveladora y tampoco esparcir la cal si hubiera fuertes corrientes de viento, ya que se levantaría mucho polvo y generaría pérdidas que afectarían la dosificación.

Después del esparcido de la cal, inmediatamente se rocía con agua para evitar asentar la cal y evitar pérdidas.

La desventajas del método seco con bolsas en comparación con los métodos a granel y lechada, se encuentra en el mayor costo de la cal (debido al envase por menor), mayor costo en la mano de obra y la lentitud del procedimiento. Sin embargo, a pesar de estos inconvenientes, la cal en bolsas es el método más adecuado y ventajoso para obras pequeñas, como ser: calles urbanas, caminos vecinales y reparación de tramos de caminos deteriorados.



Fig. 3.10.- Extendido de la cal por vía seca.

- Mezclado preliminar y agregado de agua inicial.

Una vez concluida la distribución de la cal sobre el suelo escarificado, debe realizarse la etapa de mezclado preliminar. El cual es necesario para distribuir la cal en forma uniforme dentro de la masa de suelo, tanto a lo largo como a la profundidad especificada en la capa tratada.

Durante la ejecución de esta etapa, se recomienda agregar suficiente agua para aumentar la humedad de la mezcla hasta por lo menos un 5 % sobre el contenido óptimo de humedad.

No debe preocupar en esta etapa el uso de un exceso de agua, puesto que durante el manipuleo tiene lugar una pronunciada acción secadora debido a la reacción de la cal.

Una vez completada la mezcla preliminar y el agregado de agua inicial, continúa la tarea de conformación de la sección transversal y longitudinal de la capa tratada. Esta tarea debe realizarse de modo aproximado compactando levemente la mezcla con rodillos neumáticos.

La compactación preliminar es muy recomendable, ya que ayuda a evitar las pérdidas debido a la evaporación del agua durante el curado preliminar, la carbonatación de la cal y además evita un exceso de humedad debido a posibles lluvias torrenciales que pudieran ocurrir y demorar la construcción.

El equipo de construcción necesario para ejecutar esta etapa, consiste de un grupo formado por mezcladoras rotativas múltiples o simples, un camión aguatero y rodillo neumático liviano. Sin embargo, para el mezclado inicial también pueden usarse las rastras de discos y las moto niveladoras, pero para el mezclado final es necesario las mezcladoras rotativas de alta velocidad, ya que las moto niveladoras no resultan eficientes para mezclar la cal con arcillas pesadas o muy plásticas.

- Curado preliminar.

Luego de concluida la etapa anterior, la mezcla compactada debe dejarse reposar durante 24 a 48 horas. Esta tarea se denomina técnicamente como curado preliminar y se realiza con el fin de permitir que la mezcla de suelo-cal “mature” ó, que la cal y el agua ejerzan su acción química, para que de esta manera se pueda obtener una mejor pulverización en la siguiente etapa.

La duración del proceso de curado preliminar es generalmente de 24 a 48 horas, sin embargo, el ingeniero debe establecer este periodo de tiempo por medio de pruebas de laboratorio con el fin de dar tiempo suficiente a la aparición de la reacción química entre la cal y el suelo. En el caso de las arcillas muy plásticas, este tiempo de curado preliminar puede prolongarse durante 7 días o más, hasta que la mezcla sea lo suficientemente friable. Si se presenta este caso, al final del tiempo de curado deberá compensarse las pérdidas debido a la carbonatación de la cal.

- Pulverización final y re mezclado.

Después del curado preliminar, debe realizarse nuevamente la escarificación, la pulverización y la mezcla de todos los componentes, hasta que los materiales puedan pasar el 100 % por el tamiz 1" y, por lo menos el 60 % pase por el tamiz N° 4, pero excepto cualquier fracción no deleznable.

Para la ejecución de esta etapa, los equipos que se recomiendan son básicamente los escarificadores de moto niveladora y las mezcladoras rotativas simples o mezcladoras provistas con rotor adecuado para la pulverización y mezcla de todos los componentes.

Una vez que la mezcla se encuentra debidamente pulverizada, debe agregarse una cantidad adicional de agua para que el suelo esté en su punto óptimo de humedad o ligeramente por encima de este valor, ya que en tiempos calurosos se necesita más que el óptimo de humedad para compensar las pérdidas por evaporación.

El siguiente paso de la adición de agua, consiste en el re mezclado de todos los componentes de la mezcla final, esta operación comienza cuando la pulverización de la mezcla cumple con todo lo anterior.

Para obtener el contenido óptimo de humedad, se agrega agua por medio de camiones rociadores o con el sistema de irrigación de la misma mezcladora rotativa. Este último sistema es muy bueno, dado que el íntimo contacto entre la cal, el agua y el suelo, facilitan la reacción química durante esta operación.

- Compactación.

Para obtener una máxima resistencia y estabilidad de las capas tratadas con cal, las mezclas de suelo-cal deben compactarse hasta alcanzar por lo menos el 95 % de la densidad máxima de la prueba AASHTO T-180.

Para la ejecución de los trabajos de compactación se ha empleado varios tipos de rodillos y diferentes espesores de capas. Sin embargo, la práctica más difundida es compactar usando primeramente el rodillo pata de cabra, seguido por un rodillo neumático de ruedas múltiples generalmente con un peso de 10 toneladas

La compactación de una sola capa puede lograrse con rodillos vibradores de impacto, rodillos de acero o rodillo neumático liviano, de los que se emplean para el terminado.

Cuando se trata de compactar capas de 30 cm. ó más de espesor. Esta puede ser construida en varias capas de 2" de espesor usando un rodillo neumático liviano. La capa superior de 15 cm. debe cumplir necesariamente con el requerimiento del grado de compactación. Sin embargo, para la capa inferior de 15 cm. puede suprimirse este requerimiento de compactación.

Preferentemente, la compactación debe realizarse inmediatamente después del mezclado; aunque tampoco resultan perjudiciales demoras de hasta cuatro días.

Cuando se presentan demoras mayores que resultan inevitables (2 a 3 semanas), es necesario agregar una pequeña cantidad de cal al suelo, por ejemplo de 0.5 %, para compensar las pérdidas debido a la carbonatación de la cal y la erosión provocada por la lluvia y el viento.

- Terminado y acabado.

Esta etapa consiste en producir una superficie de buena calidad de la capa estabilizada, de acuerdo con el alineamiento y la rasante requerida. Para ello, se corrigen todas las irregularidades de la capa compactada de suelo-cal, quitando los planos superficiales de compactación. Estos planos superficiales de compactación son fajas lisas marcadas por las ruedas del equipo, la cuchilla de la moto niveladora o las huellas de las protuberancias del rodillo pata de cabra, deben escarificarse con las rastras de dientes o clavos, o también la rastra de cepillos, manteniendo la superficie húmeda durante las operaciones de acabado. Luego se perfila la superficie con la moto niveladora aproximadamente de 4 a 5 mm. Y todo el material removido debe desecharse.

Finalmente se rocía ligeramente con agua y se pasa el rodillo neumático para sellar la superficie. Esta operación puede también combinarse pasando el rodillo liso, para borrar las marcas o estrías que deja el rodillo neumático, repitiendo la operación de raspado hasta obtener una superficie lisa, densa, libre de estrías, grietas y planos de compactación.

- Curado final.

Las mezclas de suelo-cal compactada y terminada cuenta con suficiente humedad para la hidratación adecuada de la cal. Con el fin de retener esa humedad después del acabado, es imprescindible realizar el curado final, ya que la máxima resistencia y estabilidad de la capa estabilizada con cal, depende de un curado adecuado después del paso final de los rodillos, por ello es importante la aplicación de esta capa en los procedimientos de construcción.

Para ejecutar esta etapa se emplean generalmente dos tipos de curado:

- Curado húmedo, que consiste en mantener húmeda la superficie mediante un rociado ligero y de ser necesario un apisonado con rodillos livianos para mantener lisa la superficie.
- Curado con membrana, que consiste en sellar la capa compactada con una imprimación bituminosa (generalmente de 0,45 a 1,125 litros/m<sup>2</sup>) antes de las 24 horas y después de haber pasado el rodillo final. Pero también existen otros materiales para efectuar el curado, tales como: las películas plásticas, el papel impermeable y la paja o arena humedecidas, cuyo desempeño es enteramente satisfactorio.

Las capas tratadas con cal deben ser curadas mínimamente de 3 a 7 días, durante los cuales deben prohibirse el uso de equipos más pesados que los de compactación. Sin embargo, en obras donde se utilizan rodillos pesados de 25 toneladas o más, puede suprimirse el curado.

- Apertura al tráfico.

Las mezclas de suelo-cal durante el periodo de curado están en condiciones de soportar el tránsito con un peso menor que el equipo de construcción. Sin embargo, esta posibilidad debe ser aprovechada solo en casos extremos, ya que de no tomar medidas precautorias se podría dañar la superficie estabilizada

Lo ideal para habilitar la vía es esperar a que haya transcurrido el periodo de curado; pero si es necesario dar la vía al servicio inmediatamente y no haya posibilidad de desviar el tráfico por otro lado, es necesario esperar primero a que el suelo-cal haya endurecido lo

suficiente para evitar daños en la superficie de la capa, como ser: desconchamientos y huellas de neumáticos.

Además es necesario esperar a que haya sido colocada por lo menos la membrana de curado. Si esta membrana no ha secado completamente, se puede colocar encima una capa de material arenoso para que no se adhiera a las llantas de los vehículos.

### **3.2.2.6. Condiciones favorables y desfavorables durante el proceso constructivo suelo-cal.**

Las mezclas de suelo-cal requieren de un tiempo templado a caluroso para endurecerse debidamente. Por consiguiente, en lugares fríos la construcción no debe comenzarse hasta bien entrada la primavera. Pero se podrán hacer algunas excepciones de acuerdo con el criterio del ingeniero y dependiendo de las condiciones del tiempo, la urgencia de la obra y el grado de estabilización que se requiera.

Como una regla general para los trabajos de estabilización con cal, se deberá esperar a que la temperatura pase los 4,5 °C a la sombra y en ascenso.

Es aconsejable terminar los trabajos y aplicar una capa de sellado por lo menos un mes antes de que comiencen los fríos intensos de la zona. Una helada larga e intensa podría ser perjudicial y hasta desastrosa antes de que la mezcla haya tenido tiempo de fraguar o adquirir una significativa actividad puzolánica. Si la construcción fue realizada casi al finalizar el otoño, es importante cubrir la capa tratada tan pronto como esté terminada la compactación final.

#### **a) Caso de fríos intensos**

Cuando vienen las olas de fríos intensos con anticipación al invierno o, cuando los atrasos ocasionan que la construcción prosiga aún entrando el tiempo frío, el daño causado por la helada puede disminuirse tomando estos recaudos:

1.- Pase los rodillos sobre la capa compactada al día siguiente de la helada y también al día siguiente en caso de que se repita el fenómeno. La experiencia ha demostrado que las heladas que siguen a las primeras no tienen mayor efecto sobre las bases. La primera, en cambio causa una distorsión en la primera pulgada de espesor de la capa estabilizada.

2.- En casos de fríos intensos es aconsejable acortar el curado hasta tres días o menos, según sea la urgencia del caso. Pero si se presenta esta situación, el camino no debe ser transitado por vehículos a razón de dar tiempo a la capa estabilizada de que se endurezca debidamente.

3.- Si con la llegada de la primavera se producen distorsiones debido a que la construcción se hizo a fines del invierno, las partes dañadas pueden ser retrabajadas y vueltas a compactar, puesto que la mayor parte de la cal permanece aún activa y, reaccionará enseguida con el tiempo cálido de la primavera. En el retrabajo de las partes dañadas, es conveniente agregar 1 % de cal para compensar las pérdidas generadas durante el invierno debido a la carbonatación de la cal.

Al comienzo de la primavera la construcción puede hacerse aún cuando los suelos estén muy húmedos. Debido a la acción secadora de la cal, que permite que se trabaje en el suelo saturado. Sin la adición de cal, el contratista se vería obligado a esperar que la naturaleza seque el suelo, lo que ocasionaría semanas de espera.

b) Caso de lluvias.

Una de las bondades que presenta el suelo-cal es la disminución del problema que acarrea las lluvias durante las operaciones de construcción.

Cuando estas son ligeras, el procedimiento constructivo puede continuar en forma normal, pues en realidad son beneficiosas en el sentido de que ahorran el agua que debe usarse en el regado. Aún en el caso de las lluvias torrenciales no existe mucho peligro, excepto que se produzcan inundaciones que provoquen pérdidas por erosión. Asimismo, después de la compactación, la capa tratada es altamente impermeable y rechaza el agua como lo haría un camino pavimentado.

En regiones muy lluviosas, es conveniente esparcir la cal, hacer el mezclado y la compactación antes de que lleguen las lluvias torrenciales, de manera que cuando estas vengan causen muy poco o ningún daño.

### **3.2.3. Estabilización Mecánica de Suelos.**

#### **3.2.3.1. Características de la estabilización mecánica.**

Es la más difundida y ampliamente conocida en el país. Alrededor del año 1930 los Estados Unidos de Norte América, por efecto de la crisis mundial, vieron disminuidos notablemente sus recursos para la construcción de carreteras; esto conllevó en consecuencia a una política de cuidadosa reserva en los gastos tanto en la construcción como de conservación de carreteras, descartándose de los planes viales los pavimentos de tipo superior (hormigón, concreto asfáltico, etc.) estudiándose a fondo el problema de la onerosa conservación de los caminos enripiados que constituían la mayor longitud de su red. Se observaron entonces cuidadosamente diferentes tramos de estos caminos enripiados, y como resultado de esas observaciones, se llegó a la conclusión que algunas secciones, conservaban su estabilidad bajo la acción del tránsito sin desgranarse en épocas de sequía, ni ablandarse ni ahuellarse por la acción combinada del tránsito y las lluvias.

La habilidad de los técnicos viales americanos consistió en descubrir cuáles eran las características de esos enripiados estables que constituyen lo que hoy llamamos bases, revestimientos o suelos estabilizados granulométricamente.

Los buenos caminos enripiados no eran algo nuevo, pero si constituyó una novedad conocer la granulometría adecuada de las mezclas y algunas características de sus componentes, es decir se obtuvo un aporte al análisis sistemático y parametrizado del problema, que permitió encontrar la solución más adecuada según las necesidades planteadas siguiendo un método racional.

Queda pues determinado que en un suelo estabilizado de este tipo, existen los mismos materiales y en idénticas proporciones que en cualquier buen enripiado, ya que el estudio

de la estabilidad de estos últimos, han surgido las condiciones a cumplir para poder reproducirlos.

En esencia las condiciones que debe reunir un suelo estabilizada mecánicamente son: una granulometría determinada para el material que la constituye y características de plasticidad de las partes finas de ese material. Estas partes son las que constituyen con la humedad que las rodea, el medio ligante o cohesivo

Un concepto de suma importancia es que un suelo estabilizado puede utilizarse como un revestimiento que soporte directamente los efectos del tránsito sobre su superficie; como base de tratamientos bituminosos superficiales destinados a preservarlas de la humedad y del efecto abrasivo de las ruedas neumáticas o finalmente como una base para ser cubierta por pavimentos espesos que distribuirán las cargas y soportarán la acción de desgaste de los vehículos.

Esta técnica, también incluye la adición de roca triturada, roca desintegrada, escoria o la tamización del suelo para remover partículas de cierto tamaño.

Cuando se diseñan mezclas de suelos, para lograr con ellas unas determinadas propiedades adecuadas y deseables, la granulometría suele ser el requisito más relevante en la fracción gruesa, en tanto que la plasticidad lo es, naturalmente, en la fina.

El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y ofrecen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy segregables. La presencia de contenidos significativos de materiales finos, menores que la malla N° 40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además de que puede conducir a superficies demasiadas lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas.

### **3.2.3.2. Aplicaciones de la estabilización mecánica.**

La estabilización granulométrica se emplea principalmente en subrasantes de pavimentos y para pavimentos de bajo costo, donde se necesita algún mejoramiento del suelo, pero que no están justificados grandes gastos.

Este tipo de técnica de estabilización tiene su aplicación de dos formas o componentes en el sistema de una vía; puede utilizarse como bases y como superficies de rodamiento. Si se requiere que la mezcla soporte los efectos abrasivos del tránsito, entonces, deberá tener mayor cantidad de aglutinante que el necesario en una capa base, es decir, será impermeable a la precipitación que cae sobre la superficie del camino y podrá, hasta cierto punto, sustituir por capilaridad la humedad que se pierde por evaporación. Las bases no requieren una proporción muy alta de aglutinante en el suelo, ya que por lo general es necesario que tengan alta estabilidad y baja capilaridad, es decir, que no tengan la tendencia a reblandecerse por la acumulación de la humedad capilar. Esta consideración se vuelve de especial importancia cuando se construye por etapas, en aquellos lugares donde la mezcla puede servir primero como una superficie de rodamiento durante un cierto tiempo y, después, como base, de tal manera que la mezcla sea capaz de cumplir de manera satisfactoria con ambas funciones durante su vida útil. Si la acción congelante es un factor, se debe reducir el porcentaje de material que pasa la malla N° 200, con el fin de prevenir daños a la base o subbase.

La estabilización mecánica, se emplea generalmente en nuestro medio para conformar los terraplenes y los caminos revestidos o caminos “ripiados”, los cuales están constituidos por una capa firme de suelo granular que a veces sirve como capa de rodamiento en todas las condiciones climatológicas. Pero también dependiendo de la calidad del suelo, ésta técnica se emplea ampliamente para construir bases y sub-bases de la estructura de un pavimento.

### **3.2.3.3. Componentes de una estabilización mecánica.**

Veremos ahora, aquellos materiales que se utilizan en la técnica vial sin la adición de elementos tales que modifiquen sus propiedades mecánicas y que influyan en la cohesión y fricción.

Dentro de estos materiales podemos incluir fundamentalmente a los suelos; con lo que tal definición significa, esto es, el amplio espectro de materiales presentes en la naturaleza provenientes de la desintegración mecánica y/o descomposición química de la roca formando eventualmente sedimentos con un grado de cohesión muy débil.

La utilización de tal material en la técnica vial resulta de su aprovechamiento como elemento de construcción para conformar distintas partes que definen una estructura vial, como elemento de asiento de una estructura caminera en cuyo caso la ponderación de su calidad debe ser encarada como elemento de fundación de una construcción civil.

Distinguidas las dos probables modalidades de uso del material, es necesario destacar que en uno u otro caso existirán exigencias de calidad que el material deberá cumplir para hacer posible su utilización o ser empleado con fundación.

Tenemos que pensar que en una estructura los materiales que se utilizan deben ir mejorando su calidad a medida que progresamos en altura.

A partir de este concepto surge que el suelo como material de uso vial requiere menos calidad para la base de asiento y capas inferiores de núcleo y deberá mejorar su calidad para capas superiores de núcleo y subrasante.

Dentro de lo que es material suelo, debemos distinguir los granulares de los finos, división que surge a partir del pasante el tamiz N° 4. Existen normas que indican que granular es aquel suelo cuyo pasante por el tamiz N° 4 es inferior al 95% en peso de la muestra y material fino aquel cuyo pasante por el tamiz N° 4 es superior al 95% en peso de la muestra (el criterio es similar al utilizado en la clasificación del SUCS, para el caso de las gravas y las arenas, en ese caso se considera como límite el 50% de retenido en el tamiz N° 4). De

aquí que en la técnica vial y en la dialéctica específica se llame granular al llamado por nosotros suelo granular y suelo ligante al fino calificado por nosotros.

Se considera que el suelo está constituido por dos componentes: el árido o granular, que incluye todas las partículas más gruesas que un límite arbitrario, como el tamiz N° 40 ó el N° 200 y consiste en granos predominantes redondeados, y el ligante que es la fracción fina que incluye los granos finos redondeados y los minerales arcillosos. El árido proporciona la fricción interna y la incompresibilidad e idealmente consiste en partículas fuertes y angulosas bien graduadas. El ligante proporciona la cohesión y la impermeabilidad; debe tener suficiente plasticidad para producir gran cohesión, pero no tanta que sea expansivo. De acuerdo con la experiencia, los mejores ligantes (más finos que el tamiz N° 40) son los suelos CL, con límites líquidos menores de 40 e índices de plasticidad entre 5 y 15.

Las cantidades relativas de árido y de ligante determinan las propiedades físicas del suelo estabilizado compactado. Si el suelo no tiene ligante, su fricción interna es alta y relativamente incompresible, porque las cargas son soportadas por los contactos entre los granos de partículas redondeadas, pero la cohesión es insignificante, Cuando se usan cantidades pequeñas de ligante una parte es atrapada entre los granos redondeados y comprimida fuertemente por la compactación, mientras que la parte restante llena parcialmente los poros. El resultado es un aumento muy marcado de la cohesión, una ligera disminución en el ángulo de fricción interna, una compresibilidad relativamente mayor y una permeabilidad relativamente alta (y un potencial ablandamiento por el agua que circula por los poros). La cantidad óptima de ligante se alcanza cuando el ligante compactado llena los poros sin destruir todos los contactos de grano a grano de las partículas redondeadas. El aumentar la cantidad de ligante después de alcanzado este punto, produce una rápida caída de la fricción interna, un pequeño aumento en la cohesión y mayor compresibilidad.

Es decir que al construir un camino o fundar la obra vial, la naturaleza nos provee dos materiales separados:

- Los granulares
- Los finos, o ligantes

En la composición de los materiales citados intervienen diferentes fracciones granulométricas como grava, arena, limo y arcilla.

Cada una de estas fracciones deberá ser compactada alcanzando su máxima densidad. Vale decir que dentro de esta mezcla las partículas más gruesas suministran fricción y resistencia al impacto, las intermedias acuñamiento de la estructura y las más finas el sostén de delgadas películas de agua, que desarrollarán una fuerte cohesión. Podemos resumir lo dicho mediante el siguiente cuadro:

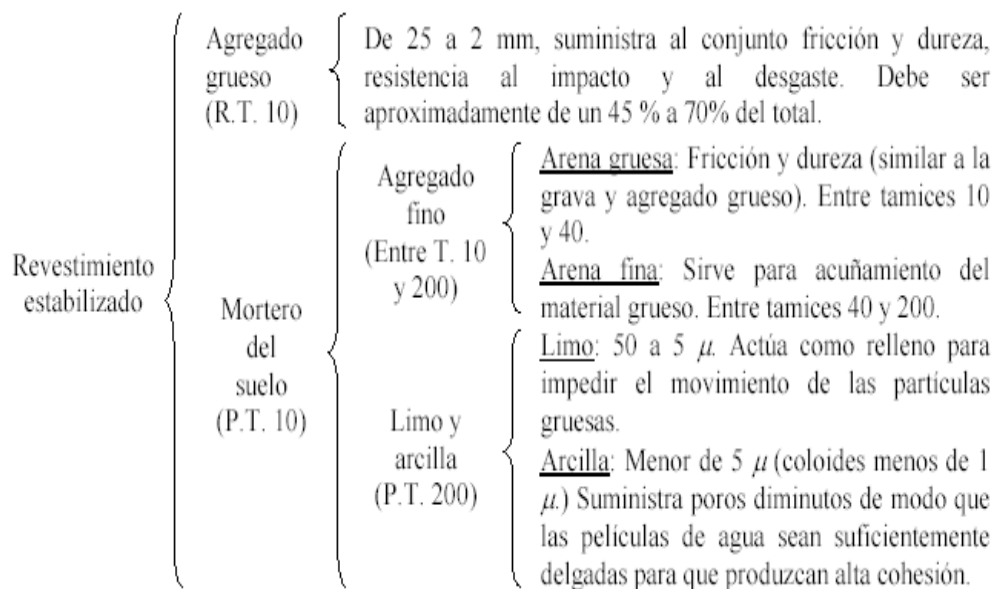


Figura 3.11. Granulometría en grupos y su función dentro de la estructura de un suelo.

Cuando las especificaciones de granulometría son correctamente satisfechas y el procedimiento constructivo es adecuado, pueden alcanzarse densidades de hasta 2,3 a 2,4 Kg/dm<sup>3</sup>.

Recordemos que la estabilización granulométrica de una subrasante consiste en ganar capacidad portante en el material recurriendo a ciertas modificaciones en él sin necesidad de incorporar agentes externos que modifiquen sus orígenes o su naturaleza.

Pero la capacidad portante significa al suelo la capacidad de resistir las cargas exteriores que se le aplican sin que se produzcan fallas como rotura o deformaciones excesivas.

Se ha planteado una fórmula fundamental que debemos respetar y que nos guiará a dilucidar los factores que inciden en esta propiedad: capacidad portante, ella es la ecuación de rotura de los suelos o expresión de Coulomb.

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

En ella intervienen la cohesión y la fricción. Una de ellas, la cohesión propiedad del material intrínseca, es decir invariable a pesar de la acción de los agentes externos, y la segunda; fricción dependiente de la carga exterior actuante.

La cohesión depende, como ya se conoce, de las características de plasticidad del material, situación que depende de la mayor o menor presencia de material fino pasante del tamiz 200. Su acción se traduce en una liga, adherencia o aglomeración dada por la cohesión propia de la fracción citada que mantiene unida al resto de las fracciones, arena, limo y grava.

La fricción quizás la más importante de las propiedades que confiere capacidad portante a un material depende de varios factores, entre ellos:

1. Forma de las partículas.
2. Granulometría del material.
3. Calidad de las partículas.
4. Tamaño máximo.
5. Grado de acomodamiento.

Como podrá apreciarse por lo que venimos analizando respecto a los materiales aquí considerados, se descarta una mayor capacidad portante en materiales granulares respecto a los materiales finos, teniendo en estos últimos, una incidencia bastante limitada la fricción y condicionada la cohesión a la plasticidad del material, de allí su desvinculación de uso en las partes de la estructura quedando relegados los materiales finos para las capas inferiores.

Disponiendo de un determinado material, fino o granular, supongamos granular, veremos que la forma de lograr incrementar su capacidad portante es incidiendo en 2 ó 3 de las propiedades vistas, ellas son:

1. El tamaño máximo.
2. La granulometría.
3. El grado de acomodamiento.

Las dos primeras propiedades hacen a una característica interna del material que se regula en el proceso de explotación y en el proceso de construcción. La tercera propiedad va a depender de una acción exterior, que se ejerce sobre el material mediante equipo adecuado y siguiendo una técnica constructiva suficientemente probada llamada *compactación* que conduce a un mejor acomodamiento de las partículas.

**Tamaño.-** El tamaño máximo del material se encuentra limitado por aspectos constructivos que hacen a detalles de terminación de la capa que se construye, normalmente las fracciones provenientes de explotación que contienen bochones, piedras de diámetro mayor a 15 cm. Se cortan en cantera para descartar ese grueso que genera problemas o bien tal material puede reservarse para la construcción de capas de núcleo y eventualmente de subrasante.

**Granulometría.-** En cuanto a la granulometría, estudios realizados e investigaciones avaladas mediante tramos experimentales permiten concluir en curvas granulométricas tipo o husos granulométricos a respetar que nos llevan a materiales cuya capacidad portante es adecuada.

<i>Abertura de la criba/número del tamiz</i>	<i>Abertura en mm</i>	<i>% en peso que pasa por cada tamiz o criba</i>
1"	25,40	100
3/4"	19,00	80-100
3/8"	9,50	50-90
N° 4	4,76	40-75
N° 10	2,00	30-55
N° 40	0,42	20-35
N° 200	0,074	10-20

Tabla: 3.7. Rangos de distribución granulométrica recomendables.

Ref.: Estabilización de suelos (Santiago Márquez 2005 – Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco)

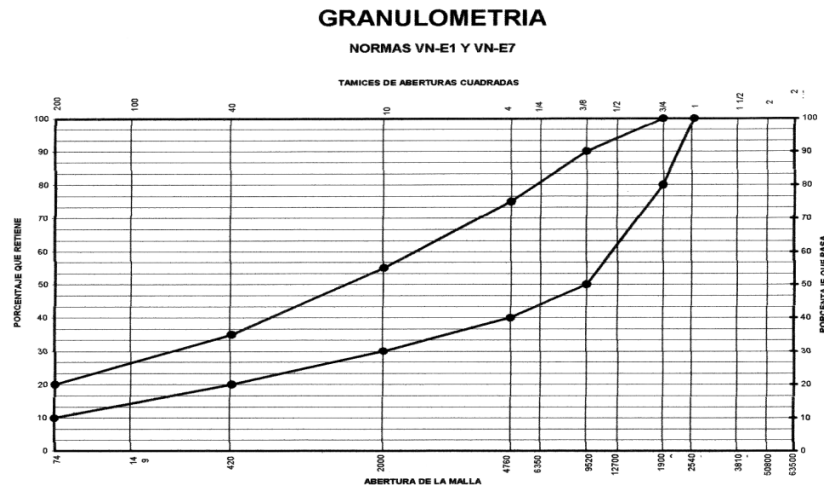


Figura 3.12. Especificaciones para curvas granulométricas recomendables.

Ref.: Estabilización de suelos (Santiago Márquez 2005 – Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco)

El logro de ambos objetivos esencialmente el huso granulométrico puede conseguirse el empleo de un material tal cual lo provee la naturaleza o bien, cuando la granulometría no es cumplida requerirá la combinación adecuada de materiales para tal fin, procedimiento que encarece y enlentece el proceso constructivo de la obra vial.

### 3.2.3.4. Determinación del porcentaje de material granular para la estabilización mecánica.

Con las investigaciones hechas sobre especificaciones y orientaciones por parte de personajes concedores en la materia es que se tomó la decisión de seguir la consigna de toda estabilización mecánica que como sabemos, la base está en la granulometría y tratando de no salirse de las especificaciones es que se hizo una serie de dosificaciones, que deben concluir en un material (mezcla) de calidad no mínima a la que ofrece un suelo clasificado

por la AASHTO como A-2-4. El cual es un material calificado de una calidad buena a excelente para la conformación de subrasantes.

Ahora en lo que respecta a las dosificaciones, el grupo de suelos al que pertenece un A-2-4 tienen en su composición granulométrica como máximo un 35% que pasa la malla N° 200. Es de esta forma que se partió de una dosificación, primeramente por debajo del límite de la tolerancia mezclando un 55% de suelo natural, con 45% de granular y se sometió a la mezcla resultante a todas las pruebas que exigen y rigen las especificaciones para subrasantes, con los resultados obtenidos se pasaron a hacer una segunda mezcla con porcentajes de 35% de suelo natural y 65% de material granular (dosificación recomendada), y una tercera mezcla con 15% de suelo natural y 85% de material granular, asiendo la comparación técnica de que porcentaje es el más adecuado y cumple con las especificaciones para subrasantes.

## CAPITULO IV

### APLICACIÓN PRÁCTICA

#### 4.1. INTRODUCCION.

En el Capítulo III de este estudio se mencionó las ventajas que tienen los sistemas de estabilización para mejorar relativamente la calidad y aptitud de los suelos. También se describió las características o propiedades más importantes del suelo estabilizado tanto por el sistema de estabilización con cal, con cemento y con la mezcla con otro suelo, así como también el procedimiento de dosificación, selección de componentes y construcción de cada sistema aplicado a los suelos característicos de la zona donde se realiza este estudio.

Ahora en este capítulo se presenta la aplicación práctica de los tres sistemas de estabilización de suelos analizados, la misma que se hace realidad utilizando como materiales componentes los provenientes de canteras locales y sometidas a pruebas de laboratorio convencionales y no convencionales.

De esta manera se presentan y discuten los resultados arrojados en un estudio experimental de las propiedades físicas y mecánicas fundamentales y necesarias, para llevar a cabo el análisis comparativo; tanto de carácter técnico, económico y ambiental entre los sistemas de estabilización analizados.

El emprendimiento para realizar este estudio nace de la inquietud personal por encontrarle una solución que sea la más adecuada y por consiguiente óptima para los problemas y daños que sufren la plataforma vial de esta zona periurbana de nuestra ciudad especialmente en épocas de lluvias. Estos daños se deben a la mala calidad de los suelos que son predominantes en esta zona, que se caracterizan por su alto grado de expansión y su plasticidad, la cual es un parámetro de gran relevancia para considerar la aptitud del suelo en obras viales.

Para ello el procedimiento de laboratorio se realizó en dos partes:

- *Primera:* Orientada a realizar la caracterización y evaluar las características de los diferentes materiales que intervienen en la mezcla, los distintos tipos de suelos, cal, cemento y suelo granular, estos ensayos permitieron encontrar las propiedades naturales o iniciales del estado del suelo. En esta parte de laboratorio se ensayó con 7 muestras para encontrar una que sea más representativa del barrio periurbano analizado.
- *Segunda:* destinada a ensayar las mezclas con cal, cemento y material granular para las cuales se realizaran pruebas de compactación, C.B.R. y resistencia y de compresión simple, esto para cada tipo de suelo una vez mezclado.

Con esto encontramos el contenido óptimo de cal, cemento y porcentaje adecuado de mezcla con material granular en función de las características y resultados obtenidos de las pruebas de evaluación.

## **4.2. EXPLORACIÓN Y MUESTREO.**

### **4.2.1. Ubicación de la Zona.**

El barrio el Constructor se encuentra ubicado en la parte Norte de la ciudad de Tarija; limita al norte con el Barrio Santa Rosa, al este con el Barrio Luis Espinal, al oeste con continuación de la Av. La Paz y al Sur con el barrio Pedro Antonio Flores. Su ubicación dentro de la ciudad la convierte en una zona Periurbana. Es por eso y por lo anterior que este trabajo tiene su aplicación en esta zona específica.

Actualmente la continuación de la Av. La Paz se convierte en el acceso principal a la zona, que a través de un acceso lateral se conecta a la zona específica, dicho camino se encuentra empedrado en su primer tramo y “enripiado” en el restante pero de una manera deficiente.

Las calles que se han aperturado en la zona de estudio se hallan desprotegidas, ya que después de su perfilado, estas no recibieron ningún tratamiento para su conservación lo que las deja expuestas a los deterioros graves que puede causar el agua que escurre en época de lluvias, debido a la mala calidad del suelo existente. Asimismo, los terrenos que presenta el área seleccionada son relativamente planos y se encuentra hoy por hoy con un alto grado de erosión, lo cual es evidente por los barrancos existentes en el lugar y que constituyen la red de drenaje natural del área.

#### **4.2.2. Realización del Muestreo.**

Para la obtención de una muestra representativa del lugar de estudio se realizó la extracción de 7 diferentes muestras ubicadas en diferentes puntos dentro de la zona de estudios (ver anexos 2 croquis de extracción de muestras).

Para el análisis del suelo en el área de estudio, el muestreo se realizó a través de cortes o perforaciones, llegando a obtener muestras alteradas, que son representativas para los fines que persigue este estudio. Debido a la profundidad a la que se hicieron los cortes que es de 1 a 1.5 metros, lo cual se hizo con herramientas ordinarias como ser picota y pala. En tales barrancos se verificó que el estrato existente es el apropiado para permitir la extracción de las muestras a dicha profundidad, las cuales fueron transportadas al laboratorio de suelos y hormigones de la U.A.J.M.S., para su análisis respectivo.

En lo que respecta a la obtención de muestras para la estabilización mecánica (material granular), se siguió el procedimiento empleado por los ingenieros responsables de la construcción y mantenimiento dependientes de la H.A.M. quienes para su fin, extraen y acarrear el material del Rio Guadalquivir, a la altura del barrio Miraflores, el cual está ubicado a 450 metros aproximadamente aguas abajo del puente Bolívar. Esta extracción se la hace primero, reuniendo el material necesario y adecuado, amontonándolo en grandes montículos, utilizando para este fin la maquinaria respectiva para luego ser acarreado en volquetas de 10 m<sup>3</sup> de capacidad al lugar donde se realizara este tipo de estabilización. Asimismo para nuestro caso tomamos una muestra representativa de los mismos

montículos utilizando para nuestro fin tan solo pala y bolsas, para luego ser transportadas al laboratorio de suelos y hormigones de la U.A.J.M.S., para su análisis respectivo.

Con relación a la cal hidratada y el cemento Portland el muestreo se realiza en un punto determinado de expendio de este producto, claro que debe reunir los requisitos de por lo menos un buen acopio, lo que implica un lugar seco para proteger al aditivo de la humedad.

#### **4.3. ESTUDIOS EN CONDICIONES NATURALES DEL SUELO.**

Todas las muestras de suelo que fueron extraídas de la zona en estudio, son llevadas al laboratorio de suelos y hormigones de la universidad, en donde fueron analizadas mediante pruebas convencionales estandarizadas, necesarias para hacer realidad este estudio con el fin de determinar las características físicas y propiedades mecánicas del suelo. Los detalles de los ensayos y la metodología utilizada fue la guía de laboratorio de suelos, se encuentran en el anexo 1 y se ajustan dentro de lo establecido en las especificaciones de la norma ASTM para el estudio de los suelos.

##### **4.3.1. Determinación de las Propiedades Físicas y Mecánicas del Suelo Natural en Estudio.**

Todos los ensayos se realizaron mediante planillas Excel y su detalle se encuentra en el anexo 3.

###### **4.3.1.1. Humedad.**

Se determinó la humedad inicial o natural utilizando la ecuación 2:4 descrita en el Capítulo 2 y apoyado en la practica N° 1 de la Guía de Laboratorio de Suelos (ver anexos N° 1). Se aplicó el mismo procedimiento para las siete muestras extraídas dando los siguientes resultados:

TABLA RESUMEN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Nº de Muestra	Contenido de humedad (%)
1	2,70
2	6,78
3	8,85
4	11,13
5	17,52
6	5,11
7	8,88
<b>valor promedio :</b>	<b>8,71</b>

Tabla 4.1.- Contenido de humedad del suelo natural.

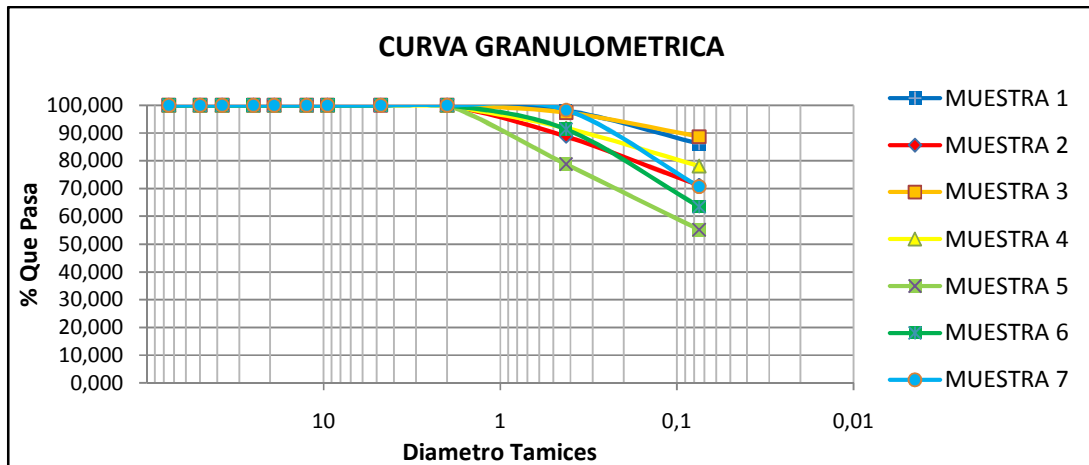
#### **Análisis de resultados.**

Si bien se observa una gran variación del contenido de humedad, esto es debido a que esta dependerá principalmente de las condiciones atmosféricas y del lugar de extracción de la muestra ya que pueden existir zonas donde la lluvia puede formar grandes charcos o zonas en que la evaporación no sea rápida.

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

#### **4.3.1.2. Granulometría.**

Para la realización de la granulometría del suelo analizado se realizó el procedimiento descrito en la Guía de Laboratorio de Suelos en la Práctica N° 2 (ver anexos N° 1), usando el método del lavado por tratarse de suelos finos. Se siguió el mismo procedimiento para las siete muestras extraídas. Dando la siguiente grafica de resumen de la curva granulométrica generada.



Grafica 4.1.- Curvas granulométricas de las muestras extraídas del suelo natural.

### Análisis de resultados.

Haciendo un análisis de las curvas de granulometría de las siete muestras analizadas se puede ver que en todos los porcentajes que pasa el tamiz N° 200 (0.075 mm de diámetro) es más del 50%, correspondiente a un material fino compuesto por limos o arcillas. También se puede observar que existe cierta amplitud entre las curvas siendo necesario el análisis de los límites, para poder así tener una clasificación exacta y tener un tipo de suelo que será una muestra representativa para nuestro estudio.

#### 4.3.1.3. Plasticidad.

Para la determinación del límite líquido se utilizó la ecuación 2:8, y para la determinación del límite plástico la ecuación 2:9 como así también en la determinación del índice de plasticidad la ecuación 2:10 ecuaciones que se encuentran fundamentadas en el capítulo II de este estudio, para el procedimiento se siguió la práctica N° 3 de la guía de laboratorio de suelos (ver anexos N° 1).

Se usó el mismo procedimiento para las siete muestras dando nos la siguiente tabla de resultados.

N° De Muestra	Limite Liquido	Limite Plástico	Índice de Plasticidad	Índice de Grupo
1	32,635	19,946	12,689	9
2	30,755	17,105	13,650	9
3	24,415	18,265	6,150	8
4	35,825	22,105	13,720	8
5	31,325	19,729	11,596	5
6	21,495	7,187	14,308	7
7	32,025	19,942	12,083	8

Tabla 4.2.- Resumen de los limites de plasticidad de las muestras del suelo natural.

### **Análisis de resultados.**

Se puede hacer el análisis que en todas las muestras tenemos el limite Liquido inferior a 50 que es el valor limite de las arcillas y limos de plasticidad elevada, también se puede observar que el índice de plasticidad es superior al 10% siendo el limite de acuerdo a la cantidad de arcillas que contienen nuestras muestras y el análisis del índice de grupo nos verifica que nuestras muestras se encasillan en suelos finos ya que suelos granulares tienen un máximo de 4 como índice de grupo.

#### **4.3.1.4. Clasificación.**

Para la clasificación del tipo de suelo de la zona del barrio “El Constructor” se hizo la toma de 7 diferentes muestras en diferentes ubicaciones del barrio, se siguió el mismo procedimiento para la determinación de la humedad, granulometría, plasticidad tabulando los datos y resultados en planillas Excel, (ver anexos N° 3) para el procedimiento y la metodología utilizada nos apoyamos en guía de laboratorio de suelos escrita (ver anexo N°1) se usaron las tablas y diagramas de clasificación de los métodos AASHTO y SUCS y se comprobaron resultados mediante el programa clasificación de suelos para la calculadora HP 49G “Clasificación de Suelos creado por Rómulo Lastreto”.

Para la clasificación se usaron las siguientes ecuaciones, tablas y diagramas descritos en el Capítulo 2.

- Tabla 2.3 para la clasificación AASHTO. (ver pag.Nº33)
- Diagrama 2.1. flujo grama de clasificación SUCS. (ver página Nº 31).

Los resultados del análisis de las 7 muestras se tabularon en la siguiente tabla:

#### **CUADRO RESUMEN DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS**

<b>Nº DE MUESTRA</b>	<b>CLASIFICACIÓN AASHTO</b>	<b>CLASIFICACIÓN SUCS</b>
MUESTRA Nº 1	A-6(9) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 2	A-6(9) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 3	A-4(8) suelo limoso	CL-ML mezcla limo y arcilla
MUESTRA Nº 4	A-6(8) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 5	A-6(5) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 6	A-6(7) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 7	A-6(8) suelo arcilloso	CL arcilla

Tabla 4.3.- Resumen de la clasificación de muestras del suelo natural.

#### **Análisis de resultados.**

Analizando los resultados obtenidos de clasificación se puede determinar que de las siete muestras analizadas 6 de éstas el suelo es clasificado según AASHTO en A-6 correspondiente a un suelo arcilloso, y en la clasificación SUCS en CL que es un suelo arcilloso de plasticidad media.

Se puede determinar una sola muestra representativa del lugar por la evaluación de las muestras ya que el 85% de estas nos da una misma clasificación de suelo entonces la tomas de muestras para los demás ensayos se harán del pozo Nº 2.

Como conclusión de la clasificación del suelo natural representativo de la zona ocupada por el barrio El Constructor se tiene:

- **Clasificación AASHTO: A-6(9)**
- **Clasificación SUCS: CL**
- **Límite Líquido: 30.755**
- **Índice de Plasticidad: 13.650**
- **Índice de Grupo: 9**

#### **4.3.2. Determinación de la máxima densidad y humedad óptima del suelo sin estabilizar mediante ensayo de compactación Proctor modificado T-180.**

La determinación de la humedad óptima de compactación y la densidad máxima alcanzada en laboratorio se realizó mediante el ensayo de compactación Proctor modificado T-180, por ser un ensayo que representa mejor las condiciones del campo o zona de estudio, donde las características del ensayo se explican en el Capítulo II y la metodología o procedimiento se realizó en base a las Guías de Laboratorio en la práctica N° 7 que lleva por título “compactación estándar y modificado” (ver anexos N° 1) los datos y cálculos se tabularon en planillas Excel y se utilizaron las siguientes fórmulas:

- (2:16).- Determinación del peso específico húmedo o densidad húmeda.
- (2:17).- Determinación del peso específico seco o densidad seca.

Los resultados del ensayo de compactación sobre el suelo natural se observan en la siguiente grafica.

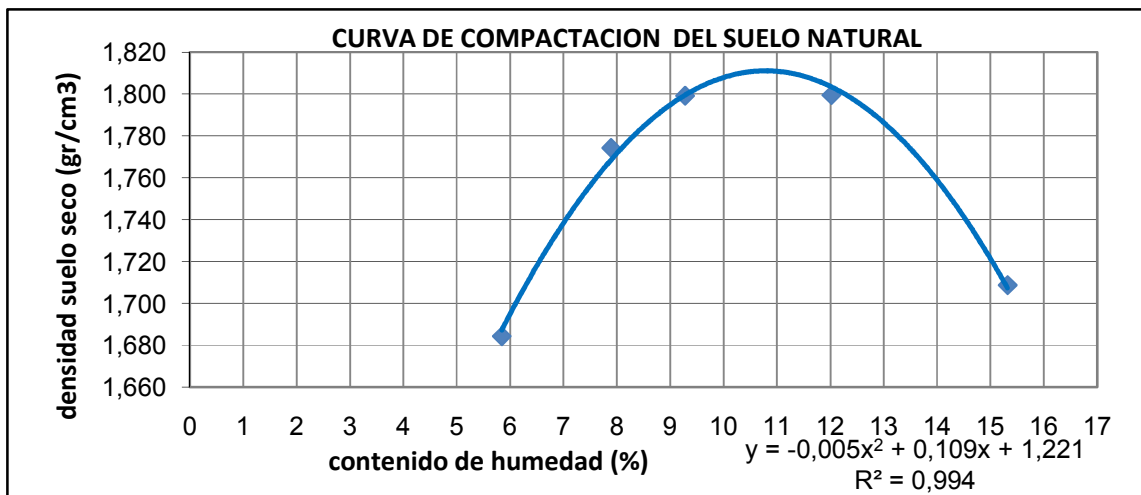


Grafico 4.2.- Curva de compactación del suelo natural.

Analizando la curva de compactación se puede tener las siguientes conclusiones:

- **Humedad Óptima: 10,9 %**
- **Densidad Seca Máxima: 1.815 gr/cm³**

#### **Análisis de resultados.**

Los valores iniciales de la humedad y densidad servirán para hacer comparaciones, y evaluaciones a los suelos estabilizados con cemento, cal y un suelo seleccionado. Sin embargo se ve que es un suelo con una densidad seca baja y una elevada humedad óptima de compactación característico de suelos arcillosos.

#### **4.3.3. Determinación de la resistencia y expansión del suelo sin estabilizar mediante ensayo de C.B.R.**

Para la determinación del CBR nos apoyamos en un conocimiento teórico más profundo explicado en el Capítulo II y el procedimiento y metodología seguida que la descrita en la Guía de Laboratorio de suelos en la Practica N° 9 “Ensayo de Capacidad Soporte CBR”

(ver anexos N° 1) donde para poder realizar el ensayo se sigue el siguiente procedimiento general.

Con los valores obtenidos en la compactación de Densidad Máxima y Humedad Óptima. Se compactaron 3 moldes para realizar el ensayo CBR en diversas condiciones, utilizando en todos los casos pares de moldes de 6", compactados con la máxima energía (5 capas, 56 golpes; 5 capas, 25 golpes y 5 capas, 12 golpes por capa), pisón de 4,5 kg. Y embebidos durante 4 días, previo a la penetración.

Las ecuaciones empleadas para la realización de este ensayo son:

- Ecuación (2:18).- ecuación genera para la determinación del CBR apoyada en la Tabla 2.4 que nos da cargas unitarias patrón.

Donde se deberá tomar en cuenta la determinación del CBR, para las penetraciones de 0,1" y 0,2".

- Ecuación (2:19).- para la determinación del porcentaje de expansión de acuerdo a las lecturas realizadas por 4 días consecutivos.
- Los datos y resultados se anotaron en planillas tomando como modelo de planilla la sugerida en la Guía de Laboratorio (ver anexos N° 1)
- Se tomará en cuenta la tabla (2.5).- que nos da una clasificación general del suelo y sus posibles usos de acuerdo al número de CBR obtenido en el suelo natural.

***Procedimiento de la expansión y CBR del suelo natural.***- Se determina sometiendo la muestra del suelo natural a un proceso de inmersión durante 4 días, aplicando una sobrecarga equivalente a la previsible en condiciones de uso de la carretera. Se efectuarán lecturas –una al inicio, y pasado un periodo de 24 horas hasta cubrir los cuatro días de

inmersión y otra al final del proceso, empleando un trípode con su extensómetro debidamente calibrado. Luego la muestra se colocara en la prensa donde se va lecturando el esfuerzo o carga que provoca el pistón causado por su penetración a diferentes alturas ya estandarizadas. El hinchamiento adquiere una especial importancia en suelos arcillosos o con alto contenido en finos, ya que puede provocar asientos diferenciales, origen de diversas patologías en todo tipo de construcciones.

Los valores obtenidos del CBR y la expansión del suelo natural son:

<b>CBR al 100 %:</b>	2,6
<b>CBR al 95%:</b>	2,2
<b>Expansión %:</b>	3,82

#### **Análisis de resultados.**

Se puede observar que el material que conforma el suelo natural de la zona en estudio es un material expansivo y de bajo valor de soporte, se puede decir que es un suelo que necesita ser mejorado ya que según especificaciones para la conformación de subrazantes, la expansión deberá ser menor a 3% y el CBR mayor a 4% según normativa local (Especificaciones técnicas generales, Administración Boliviana de Carreteras).

#### **4.3.4. Determinación de la resistencia a Compresión Simple del Suelo sin Estabilizar Mediante Ensayo a Compresión Simple.**

Para el ensayo a compresión simple nos apoyamos en la teoría del ensayo descrita en el capítulo II y la metodología en base a Guías de Laboratorio utilizadas en otros países y con ayuda del auxiliar de laboratorio puesto que es un ensayo que no se realiza dentro del avance de materia y Laboratorio de Suelos I y II (ver anexos N° 1).

Para este fin se realizaran probetas cuidando la humedad óptima de compactación encontrada mediante el ensayo compactación Proctor Modificado T-180 para lograr así

alcanzar su máxima densidad seca, y se someterán éstas a siete días de curado protegidos en bolsas con el fin de que la humedad se mantengan dentro de las mismas, después se pasaran a rompen dichas probetas en la prensa utilizada para CBR y se calcula la resistencia la corte utilizando la ecuación 2:20 del Capítulo II.

El ensayo de compresión simple realizado a la muestra de suelo natural dio la siguiente grafico de esfuerzo-deformación, y como resultado la resistencia a compresión simple ( $q_u$ ).

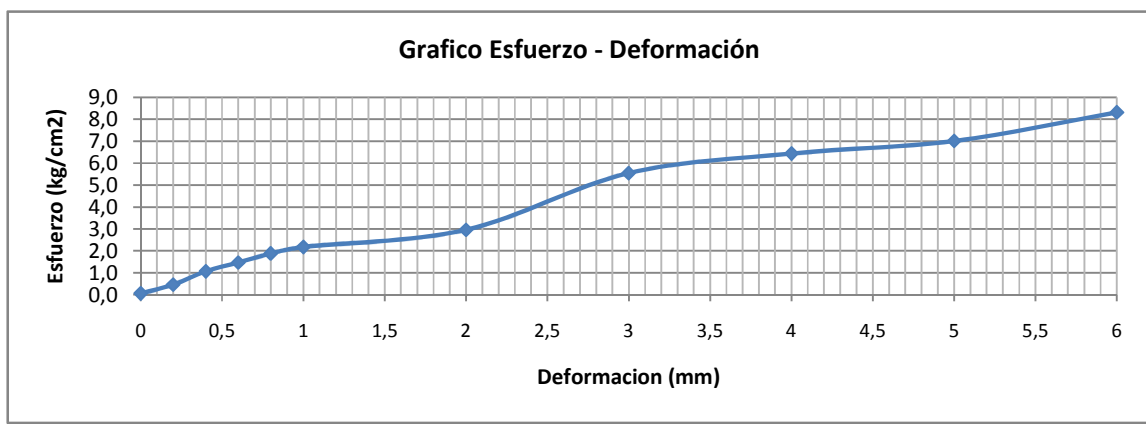


Grafico 4.3.- curva de esfuerzo-deformación del suelo natural.

**Análisis de resultados.-** En el grafico se puede analizar que el suelo natural (clasificado como CL) tiene deformaciones variables y ascendentes en todo momento hasta llegar a su máxima deformación antes de rotura, dando como resultado:

$$q_u = 8,3 \text{ Kg/cm}^2$$

#### 4.4. ESPECIFICACIONES TECNICAS PARA LA CONFORMACION DE LA SUBRASANTE.

Los materiales para la constitución de la subrasante deben de tener las características especificadas a continuación, de modo a permitir la construcción de un macizo estable y adecuado soporte de pavimento.

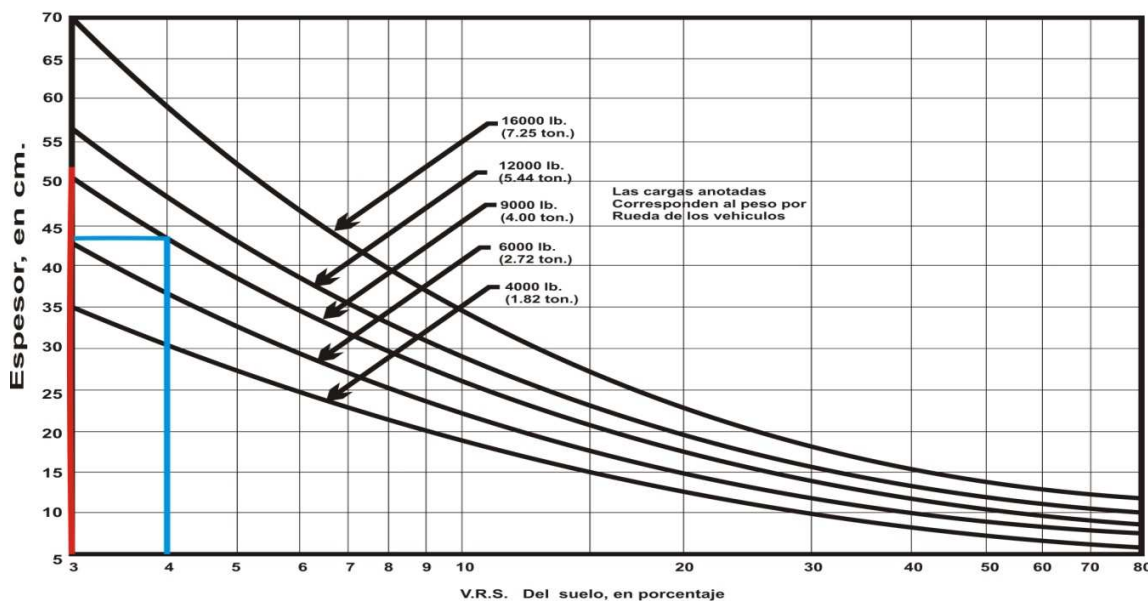
<b>CBR mínimo requerido (%)</b>	4
<b>Expansión máxima requerida (%)</b>	3

Tabla 4.4. Especificaciones del CBR y expansión de acuerdo a normativa local.

Fuente: Especificaciones técnicas generales (Administradora Boliviana de Carretera)

#### 4.5. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LA SUBRASANTE A ESTABILIZAR.

Para la determinación del espesor real que se deberá modificar se utilizó el ábaco de espesor de pavimentos para carreteras según el VRS (CBR) de la subrasante, donde se determinó primero el espesor del pavimento (sub base, base, capa de rodadura) para el valor de VRS del suelo en estado natural y de acuerdo a especificaciones de la subrasante y considerando que ésta se quiere mejorar hasta alcanzar un valor óptimo de 4% del valor relativo de soporte se determinó el espesor de pavimento para este valor de mejora, y por simple resta de valores se tiene el valor real del espesor del pavimento.



Abaco.: 4.1. Espesores de pavimentos en carreteras según el VRS.

Ref.: Mecánica de Suelos, Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos, Volumen 2 (Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico Rodríguez).

Del ábaco analizado se obtuvieron los siguientes valores:

<b>Características</b>	<b>VRS o CBR al 95%</b>	<b>Espesor pavimento (sub base, base, capa de rodadura)</b>
<b>Suelo en estado natural</b>	2 %	55 cm
<b>Especificación local subrasante (ABC)</b>	4 %	45 cm
<b>Espesor real a estabilizar</b>	<b>10 cm</b>	

Tabla 4.5.- Espesor real del pavimento determinado mediante ábaco 4.1.

#### **4.6. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.**

Todas las estabilizaciones realizadas con los diferentes estabilizantes utilizados se seguirán el mismo procedimiento ya mencionado para lograr determinar los valores óptimos de estabilizantes, y sus ventajas técnicas, económicas y ambientales, para así poder determinar cuál de los estabilizantes será el adecuado para el mejoramiento del suelo de la zona de estudio.

##### **4.6.1. Estabilización Química.**

###### **4.6.1.1. Estabilización suelo – cemento.**

Para la realización de la estabilización Suelo-Cemento se utilizan diferentes porcentajes de estabilizante, de acuerdo a porcentajes de cemento aproximados para proyectar las mezclas de Suelo-Cemento (ver Tabla 3.5 del capítulo III). Se evaluarán las características técnicas del porcentaje de estabilizante adecuado mediante los ensayos de Compactación Proctor Modificado T-180, CBR y comprensión simple analizando que porcentaje de cemento logra mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla.

###### **4.6.1.1.1. Determinación de la humedad óptima y la máxima densidad alcanzada en laboratorio utilizando diferentes porcentajes de cemento como estabilizante.**

Muestra suelo +	Suelo Natural	4 % Cemento	7 % Cemento	10 % Cemento	12 % Cemento
Humedad óptima (%)	10,90	12,70	12,50	12,67	14,67
Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1,82	2,10	2,25	2,27	1,99

Tabla 4.6.- Humedad óptima y máxima densidad alcanzada a diferentes porcentajes de suelo – cemento.

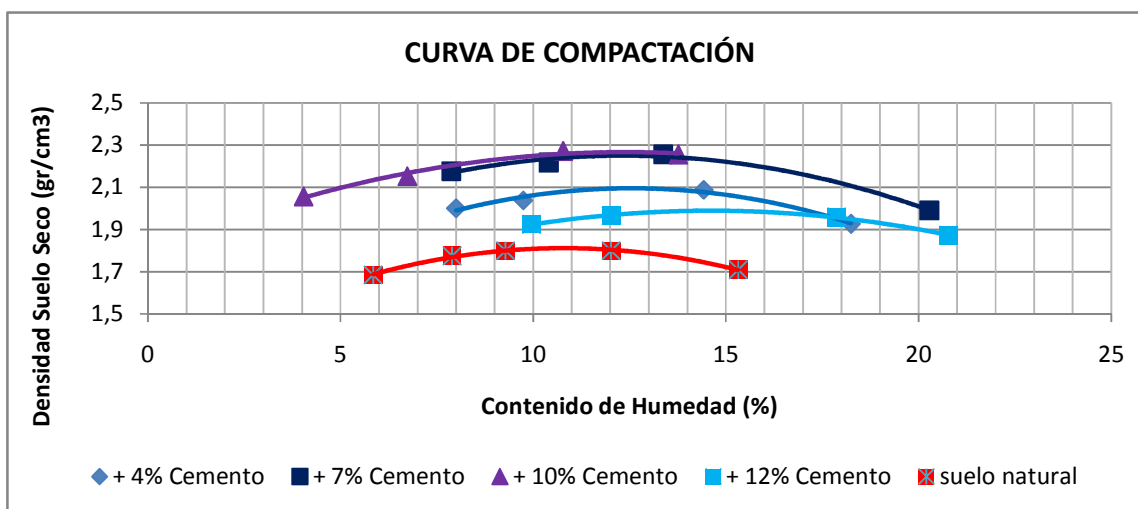


Gráfico 4.4.- Curvas de compactación para la mezcla suelo-cemento a diferentes porcentajes de estabilizante.

#### Análisis de resultados.

Se puede verificar que los valores asumidos de estabilizante para nuestro tipo de suelo (según la tabla 3:5 ver capítulo III) se verifican de acuerdo a nuestros resultados ya que estos valores oscilan entre 7-12% de cemento, también se observa que a contenidos de 7% y 10% de cemento, se tiene una máxima densidad seca y en contenidos de 12% o mayores a estos la máxima densidad seca alcanzada vuelve a bajar. El porcentaje óptimo de humedad tiende a subir a mayor contenido de cemento ya que el mismo en la mezcla absorbe mayor cantidad de agua.

#### 4.6.1.1.2. Determinación del CBR y expansión del suelo estabilizado a diferentes porcentajes de cemento como estabilizante

Muestra	Suelo Natural	4 % Cemento	7 % Cemento	10 % Cemento	12% Cemento
<b>CBR al 100%</b>	2,63	20,46	38,93	71,67	75,00
<b>CBR al 95%</b>	2,19	18,59	31,43	59,06	55,10

Tabla 4.7.- CBR al 100% y CBR al 95% de la mezcla suelo – cemento.

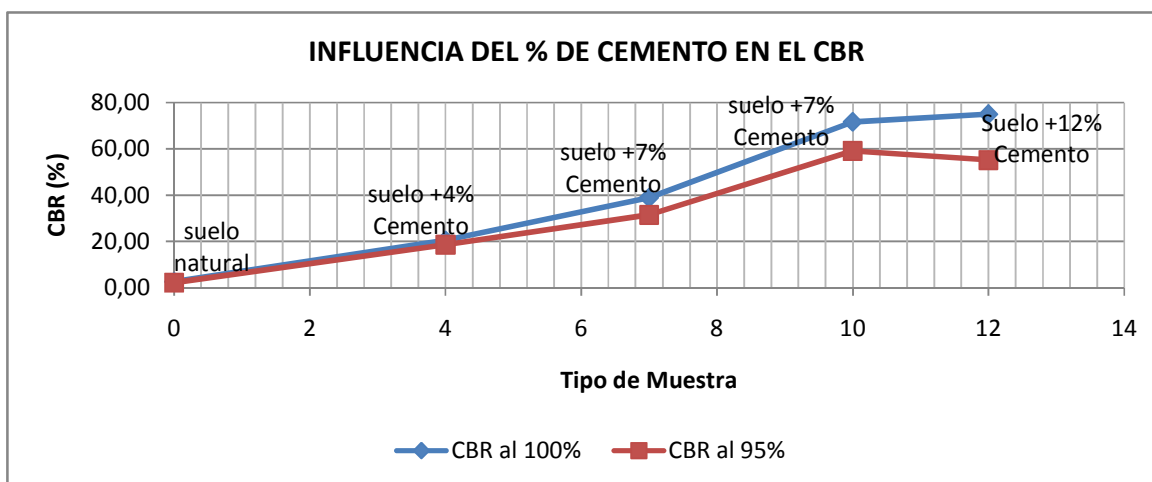


Grafico 4.5.- influencia del % de cemento en el CBR con relación al suelo natural.

### Análisis de resultados.

Se observa que ya a pequeñas cantidades de cemento aplicado sobre el suelo natural existe una gran elevación del porcentaje de CBR llegando a valores óptimos al 4%.

Muestra	Suelo Natural	4 % Cemento	7 % Cemento	10 % Cemento	12% Cemento
<b>Expansión</b>	3,82	0,08	-0,141	-0,131	0,111

Tabla 4.8.- Expansión de la mezcla suelo – cemento

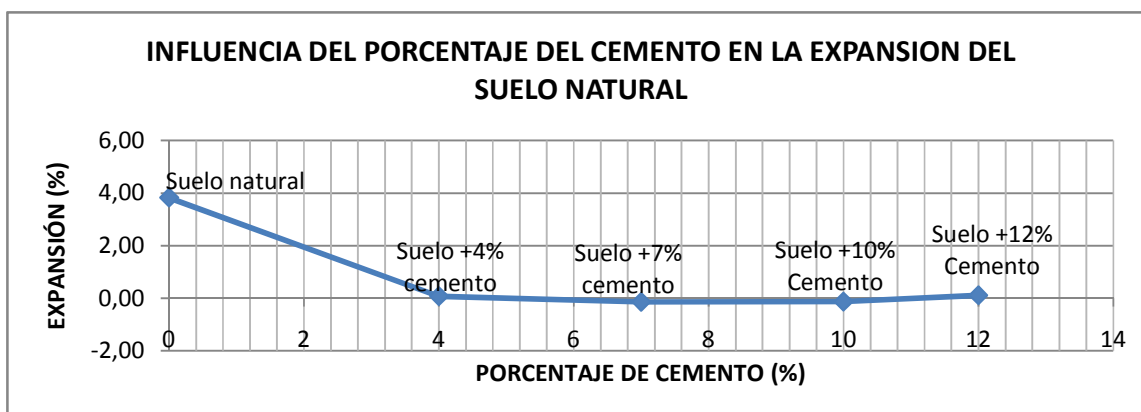


Grafico 4.6.- Influencia del % de cemento en la expansión con relación al suelo natural.

### Análisis de resultados.

Se observa en la grafica que el suelo natural no cumplen las especificaciones técnicas de expansión para una subrasante valor que deberá ser menor a 3%, sin embargo al hacer la mezcla suelo – cemento se ve una notoria mejoría ya que los valores de la expansión son prácticamente nulos e inclusive arrojan valores negativos, resultado de una contracción mínima que sufren las probetas en el 3 y 4 día de saturación en la prueba de CBR, contracción debida al efecto del cemento, al empezar su proceso de endurecimiento.

#### 4.6.1.1.3. Determinación de la resistencia a compresión simple.

Valores obtenidos en la prueba a compresión simple					
Muestra	Suelo Natural	4 % Cemento	7 % Cemento	10 % Cemento	12% Cemento
qu (kg/cm2)	8,30	12,24	15,135	17,233	22,529

Tabla 4.9.- Carga última prueba a compresión simple de la mezcla suelo-cemento.

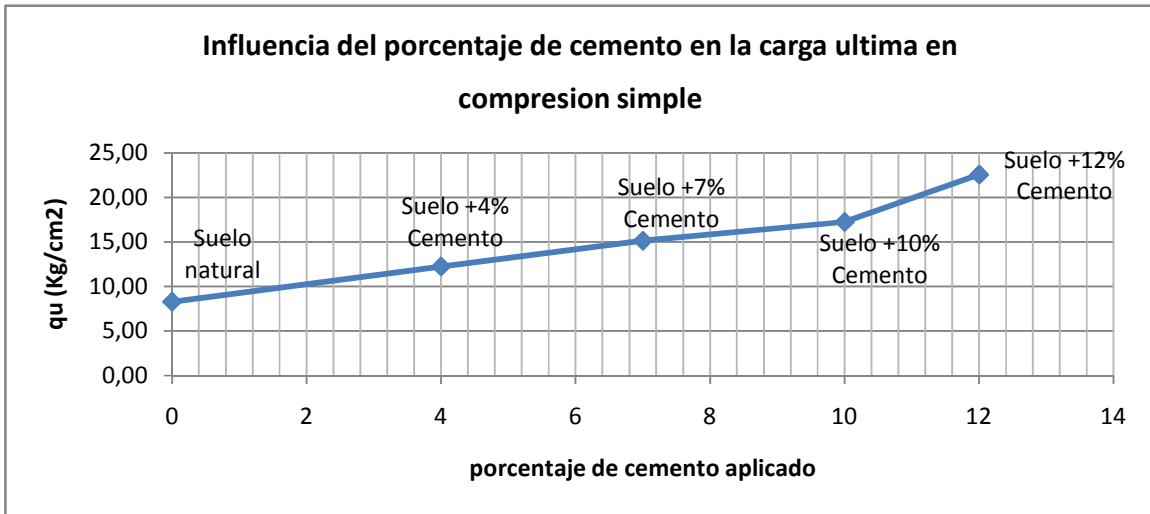


Grafico 4.7.- influencia del porcentaje de cemento en la resistencia a compresión simple.

#### Análisis de resultados.

Se ve un notable mejoramiento gradual a un mayor porcentaje de cemento llegando a cargas muy superiores comparada con la carga que máxima antes de rotura que puede presentar el suelo en estado natural.

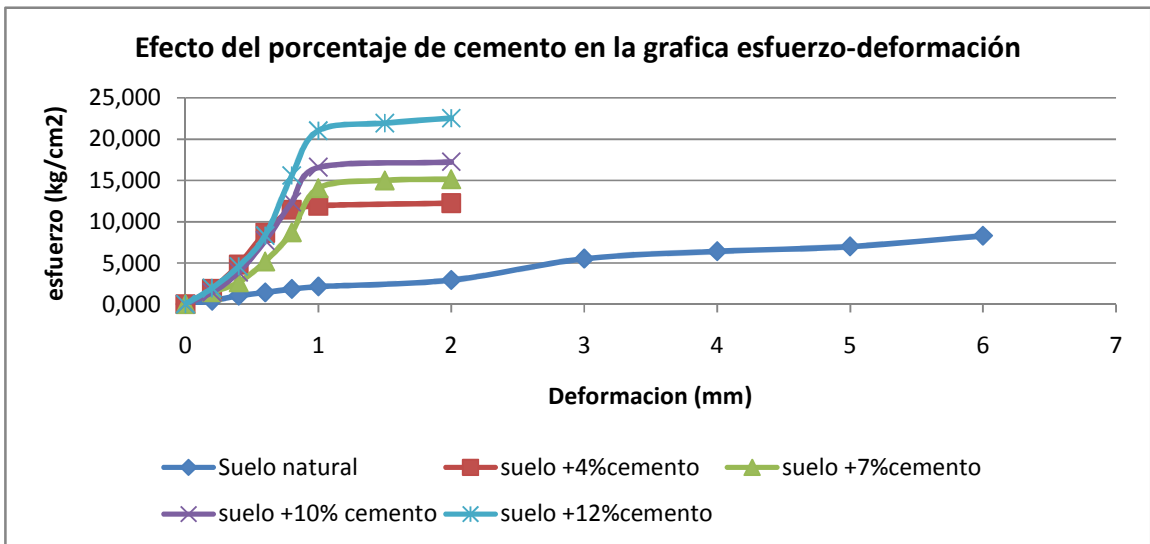


Grafico 4.8.- efecto del porcentaje de cemento en la relación esfuerzo-deformación.

### **Análisis de resultados.**

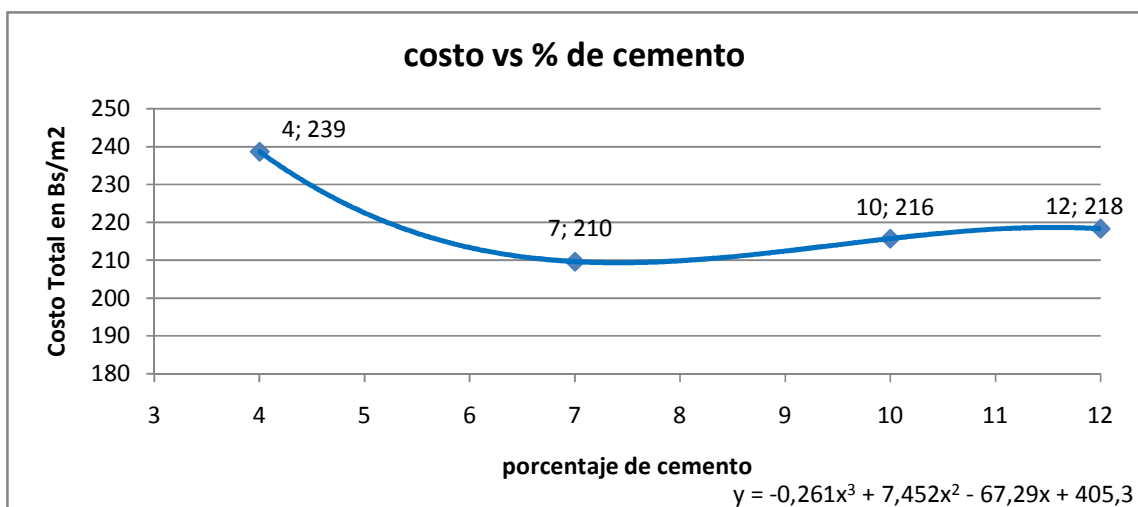
Se puede observar en la grafica que el suelo natural ofrece mayor grado de deformación pero a cargas no elevadas, presentando una deformación gradual accedente hasta su carga de ruptura, en cambio las mezclas suelo-cemento presentan una deformación constante accedente hasta valores de 1 mm de deformación después su deformación se mantiene casi constante en forma vertical hasta la carga de ruptura.

Se verifica que los materiales cementados ofrecen mayores cargas de ruptura pero a menores tramos de deformación por la pérdida de plasticidad causada por el efecto del cemento al endurecer.

#### **4.6.1.1.4. Determinación del espesor de las capas del pavimento y su costo para cada porcentaje de cemento aplicado.**

<b>Porcentaje de Cemento Aplicado:</b>	4	7	10	12
espesor sub base (cm):	0	0		
espesor base (cm):	6	5	0	0
espesor rodadura (cm):	12	10	10	10
costo sub base Bs/m2:	0,000	0,000	0,000	0,000
costo base Bs/m2:	7,467	4,667	0,000	0,000
costo rodadura Bs/m2:	198,565	165,471	165,471	165,471
costo estabilización Bs/m2:	32,647	39,492	50,239	52,854
<b>costo total (bs):</b>	<b>238,679</b>	<b>209,630</b>	<b>215,710</b>	<b>218,325</b>

Tabla 4.10.- espesores y costos según el porcentaje de cemento aplicado.



Grafica 4.9.- Variación del Costo Total Según el Cemento Aplicado

#### 4.6.1.1.5. Determinación del contenido óptimo de cemento.

Para la determinación del contenido óptimo de cemento se evaluarán los resultados obtenidos en los ensayos de Compactación Proctor Modificado T-180, CBR y compresión simple como así también será determinante el costo total, donde predominara el menor contenido de cemento que logre satisfacer las especificaciones requeridas, y el menor costo.

Propiedad	Ensayo	Resultados mezcla suelo +			
		4% cemento	7% cemento	10% cemento	12% cemento
Compactación	Humedad óptima (%)	12,70	12,50	12,67	14,67
	Densidad seca máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,10	2,25	2,27	1,99
Cambio volumétrico	Expansión (%)	0,08	-0,141	-0,131	0,111
Capacidad de soporte	CBR al 100%	20,46	38,93	71,67	75,00
	CBR al 95%	18,59	31,43	59,06	55,10
Resistencia a compresión	Carga ultima qu (kg/cm <sup>2</sup> )	12,24	15,13	17,23	22,53
Costo total	Bs/m <sup>2</sup>	238,679	209,630	215,710	218,325

Tabla 4.11.- resumen de resultados mezcla suelo – cemento.

### **Análisis de resultados.**

Se determinara el contenido óptimo de cemento al valor que proporcione un CBR mayor o igual a 4%, teniendo en cuenta que éste debe cumplir con el valor máximo de expansión del 3% y que sea el de menor costo total según análisis de la gráfica 4.9.

**Contenido Óptimo de Cemento = 7 %**

**Costo Total = 209.63 Bs/m<sup>2</sup>**

#### **4.6.1.2. Estabilización suelo – cal.**

Para realizar la estabilización con cal fue necesario investigar sobre las características que tiene la cal hidratada proveniente de las canteras de la zona de El Puente. Estas características como el contenido de óxidos se muestran a continuación en la tabla 4.12. En un resumen del análisis químico de la cal.

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CONTENIDO EN PORCENTAJE</b>
Ca O	40.65
Mg O	26.98
Si O <sub>3</sub>	1.15
Otros	31.22
Total	100
Clasificación	Cal árida o magra
Índice pH	12.50

Tabla 4:12.- Análisis Químico de la cal.

La información que se muestra en el cuadro 4.6. Establece que la cal hidratada proveniente de El Puente no es un producto netamente óxido de calcio, por el contrario, presenta un buen porcentaje de óxido de magnesio, lo cual es perceptible a simple vista pues este óxido le quita la blancura total a este aditivo y consecuentemente lo clasifica como una cal dolomítica o cal árida o magra, esto debido justamente a su elevado contenido de magnesio.

Ahora veremos los resultados alcanzados de la estabilización del suelo con cal hidratada. Para este fin fue necesario obtener una dosificación óptima de cal para este suelo. Esto se

logra con la prueba sugerida por la National Lime Association basada en el pH de la mezcla de suelo y cal, la cual deberá ser corroborada con los resultados de las pruebas mecánicas a las que se somete la mezcla.

Como el criterio que adopta y sugiere la National Lime Association se basa en el pH que debe presentar la mezcla de Suelo-Cal, el cual alcanza un valor de 12.40 para una mezcla estabilizada en una dosificación óptima. Por consiguiente si varias dosis de cal en la mezcla arrojan el mismo valor de 12.40, se adopta la mezcla que contenga menor porcentaje de cal que nos dé un valor en el pH de 12.40.

Las mezclas consisten en mezclas de 20 gramos de suelo seco mezclados con diferentes porcentajes de cal. Éstas mezclas se disuelven en agua (100 ml.), y por medio de un medidor de pH, se mide su índice pH.

En la siguiente tabla se observan los resultados del índice de pH de las diferentes mezclas suelo – cal.

<b>MUESTRA NÚMERO</b>	<b>DILUCIÓN SUELO/AGUA</b>	<b>% DE CAL</b>	<b>INDICE pH</b>
2	1/5	12%	12.5
4	1/5	8%	12.4
7	1/5	5%	12.4
8	1/5	2%	12.2
9	1/5	0%	12.1

Tabla 4.13.- índice de pH de la mezcla suelo – cal.

### **Análisis de resultados.**

Con la información que se tiene de este análisis es que se tiene el diseño de la mezcla de manera preliminar claro, pero que es un punto de referencia bastante importante. Este dato nos dice que una proporción del 5% de cal en la mezcla resultante, es suficiente para producir las reacciones esperadas en la capa estabilizada. Esta dosificación preliminar debe ser corroborada con las pruebas físicas y mecánicas a realizar sobre la mezcla estabilizada.

#### 4.6.1.2.1. Determinación del límite líquido, plástico e índice de plasticidad.

Uno de los efectos de la cal en los suelos es de cambiar apreciablemente su plasticidad, es así que se hicieron ensayos de Límites de Atterber, partiendo de mezclas realizadas con el suelo en estado natural (A-6(9)) y con diferentes porcentajes de cal, y realizando el ensayo de límites cada 24 horas.

Dándonos los siguientes resultados:

**Muestras: suelo A-6(9) con 3% de cal.**

<b>Día</b>	<b>21/07/11</b>	<b>22/07/11</b>	<b>25/07/11</b>	<b>26/07/11</b>	<b>27/07/11</b>	<b>28/07/11</b>	<b>29/07/11</b>
<b>Tiempo</b>	24	48	72	96	120	144	168
<b>Límite Líquido</b>	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51
<b>Límite Plástico</b>	23,12	26,43	26,55	30,93	22,92	20,67	26,09
<b>Índice de Plasticidad</b>	8,39	5,08	4,96	0,58	8,59	10,84	5,42

Tabla 4.14. Límites de Atterberg en la mezcla suelo natural con 3% de cal.

**Muestra: suelo A-6(9) con 5% de cal.**

<b>Día</b>	<b>21/07/11</b>	<b>22/07/11</b>	<b>25/07/11</b>	<b>26/07/11</b>	<b>27/07/11</b>	<b>28/07/11</b>	<b>29/07/11</b>
<b>Tiempo</b>	24	48	72	96	120	144	168
<b>Límite Líquido</b>	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51
<b>Límite Plástico</b>	26,43	29,22	30,19	28,19	30,52	28,12	24,9
<b>Índice de Plasticidad</b>	5,08	2,29	1,32	3,32	0,99	3,39	6,61

Tabla 4.15. Límites de Atterberg en la mezcla suelo natural con 5% de cal.

Muestra: suelo A-6(9) con 8% de cal.

Día	21/07/11	22/07/11	25/07/11	26/07/11	27/07/11	28/07/11	29/07/11
Tiempo	24	48	72	96	120	144	168
Limite Liquido	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51	31,51
Limite Plástico	25,72	28,83	29,7	19,54	27,21	25,44	22,88
Indicé de Plasticidad	5,79	2,68	1,81	11,97	4,30	6,07	8,63

Tabla 4.16. Limites de Atterberg en la mezcla suelo natural con 8% de cal

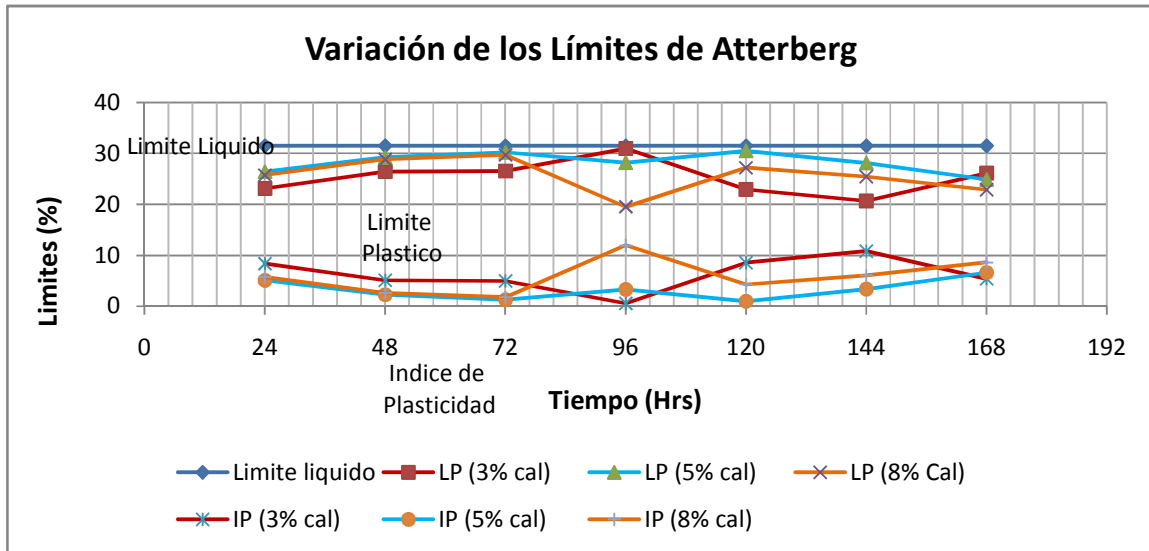


Grafico 4.10. Variacion de los limites de atterberg en la mezcla suelo-cal.

### Analisis de resultados.

Se observa que en un tiempo transcurrido de 72 horas, la mezcla con cal aumenta el Limite Plastico, ocasionando que el Indice Plastico baje, despues se ve un quiebre en las curvas, observandose que a las 96 horas, con el 3% de cal el indice plastico se reduce notablemente hasta llegar a casi valores nulos, viendose lo contrario con el 8% de cal que a las 96 horas si indice plastico nuevamente vuelve a subir.

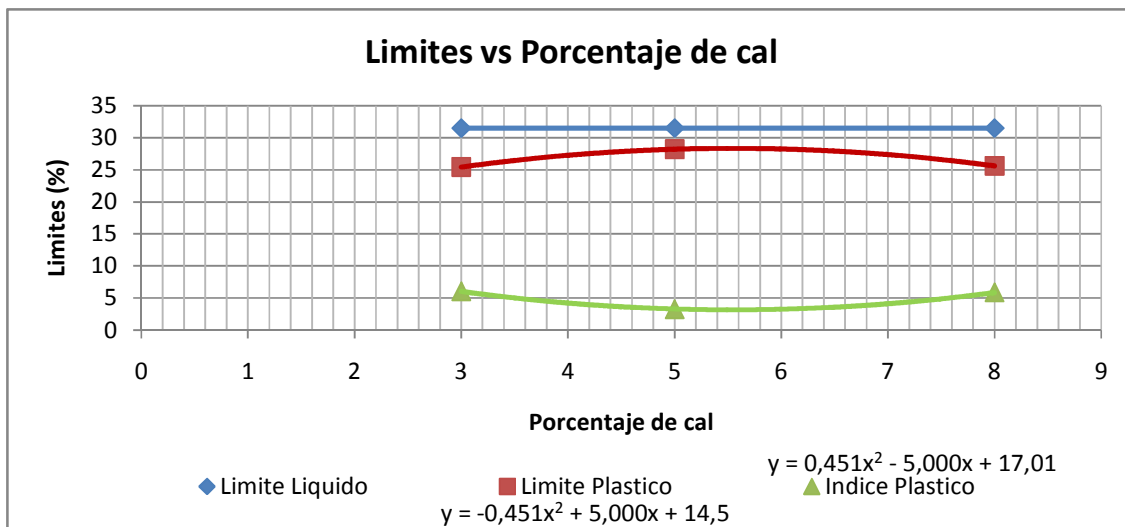


Grafico 4.11.- Variación de los límites de Atterberg con el contenido de cal.

### Análisis de resultados.

Se observa que se forman dos curvas de optimización dándonos el máximo valor técnico, que reduce el Índice Plástico por la reacción de la mezcla suelo-cal. Se deberá tomar en cuenta que este valor óptimo no contempla el factor económico, ya que económicamente se deberá determinar al primer valor de la curva que logre reducir el índice plástico según especificaciones, logrando así reducir la expansión del suelo.

#### 4.6.1.2.2. Determinación de la humedad óptima y la máxima densidad alcanzada en laboratorio utilizando diferentes porcentajes de cal como estabilizante.

Muestra suelo +	Suelo Natural	2 % Cal	5% Cal	8 % Cal	12% Cal
<b>Humedad óptima (%)</b>	10,90	10,67	12,50	12,25	11,00
<b>Densidad seca (gr/cm3)</b>	1,82	2,14	2,16	2,23	2,22

Tabla 4.17. Humedad óptima y máxima densidad alcanzada a diferentes porcentajes de suelo-cal.

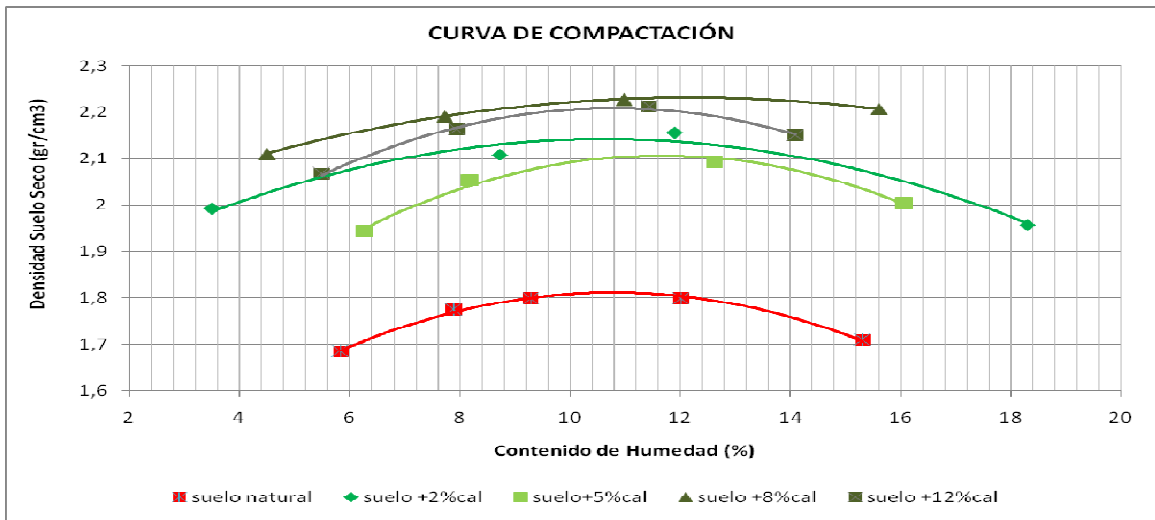


Gráfico 4.12.- Curvas de compactación para la mezcla suelo-cal a diferentes porcentajes de estabilizante.

#### Análisis de resultados.

Se observa que a contenidos de 5% y 8% de cemento, se tiene una máxima densidad seca y en contenidos de 12% o mayores a estos la máxima densidad seca alcanzada vuelve a bajar. Comparando con los valores sugeridos mediante el índice de pH nuestros valores de 5% y 8% de cal concuerda con el método del índice de pH. El porcentaje óptimo de humedad tiende a subir a mayor contenido de cal hasta valores del 8%.

#### 4.6.1.2.3. Determinación del CBR y expansión del suelo estabilizado a diferentes porcentajes de cal como estabilizante.

Muestra	Suelo Natural	2 % Cal	5 % Cal	8 % Cal	12 %cal
<b>CBR al 100%</b>	2,63	6,69	24,29	33,63	23,25
<b>CBR al 95%</b>	2,19	5,79	16,57	19,69	20,48

Tabla 4.18.- CBR al 100% y CBR al 95% de la mezcla suelo –cal.

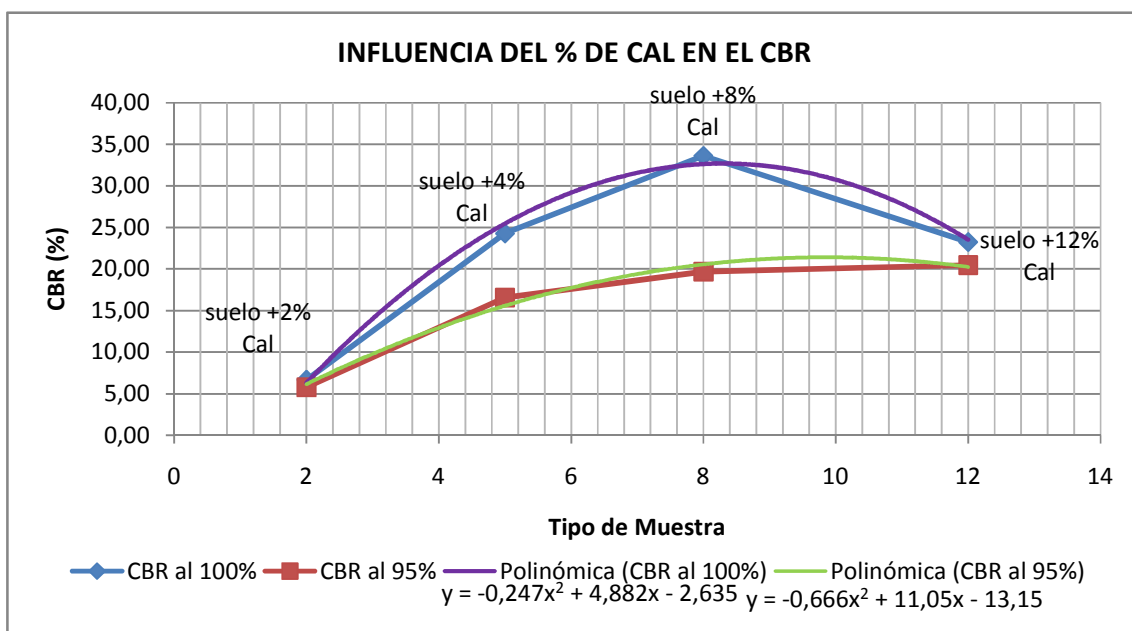


Grafico 4.13.- influencia del % de cal en el CBR con relación al suelo en estado natural.

### Análisis de resultados.

Se observa que el % de CBR va mejorando gradualmente a mayor cantidad de cal, formando una curva de optimización con un valor óptimo máximo alcanzado. Analizando las curvas de tendencia se puede determinar el valor exacto del porcentaje de cal que de un valor óptimo del CBR de 4%, teniendo como resultado:

Especificación	CBR al 100%	CBR al 95%
Subrasante mejorada al 4% de CBR	1,73 % de cal	1,5 % de cal.

Tabla 4.19.- Determinación del porcentaje adecuado de cal para alcanzar un CBR del 20% en la subrasante.

Muestra	suelo natural	2 % Cal	5 % Cal	8 % Cal	12 % Cal
Expansión	3,82	3,34	2,216	3,077	-0,500

Tabla 4.20.- Expansión de la mezcla suelo – cal.

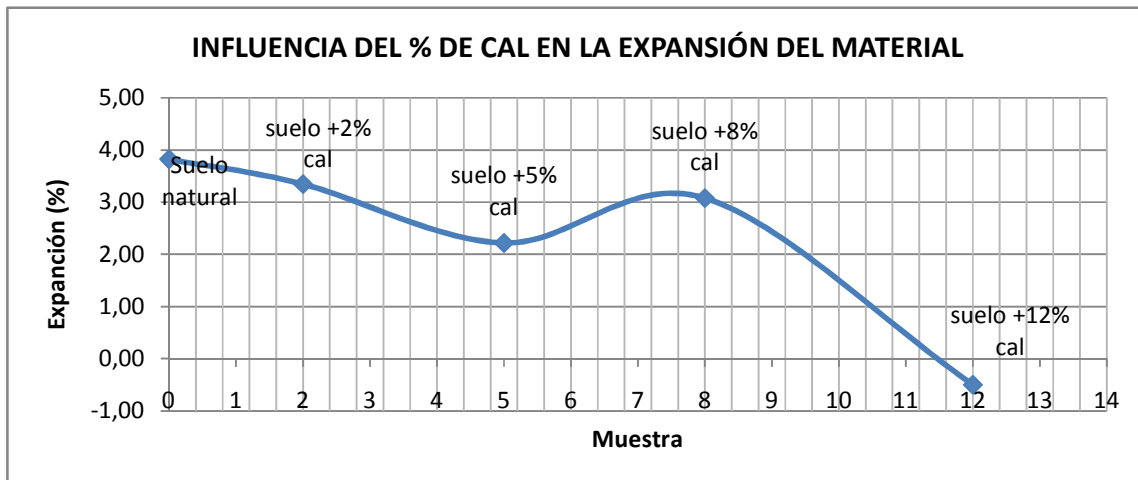


Gráfico 4.14.- Influencia del % de cal en la expansión con relación al suelo natural.

#### Análisis de resultados.

Se observa en la grafica que el suelo natural no cumplen las especificaciones técnicas de expansión para una subrasante valor que deberá ser menor a 3%, sin embargo al hacer la mezcla suelo – cal se ve una notoria mejoría de la expansión, observando que en la mezcla del 5% y 12% de cal se obtiene el menor porcentaje de expansión. También se observa en la grafica un quiebre al 8% de cal donde la expansión vuelve a subir.

#### 4.6.1.2.4. Determinación de la resistencia a compresión simple.

Valores obtenidos en la prueba Compresión simple de la mezcla suelo-cal					
Muestra	suelo Natural	2 % Cal	5 % Cal	8 % Cal	12 %cal
qu (kg/cm2)	8,30	9,26	10,594	11.337	10,476

Tabla 4.21.- Carga última prueba a compresión simple de la mezcla suelo-cal.

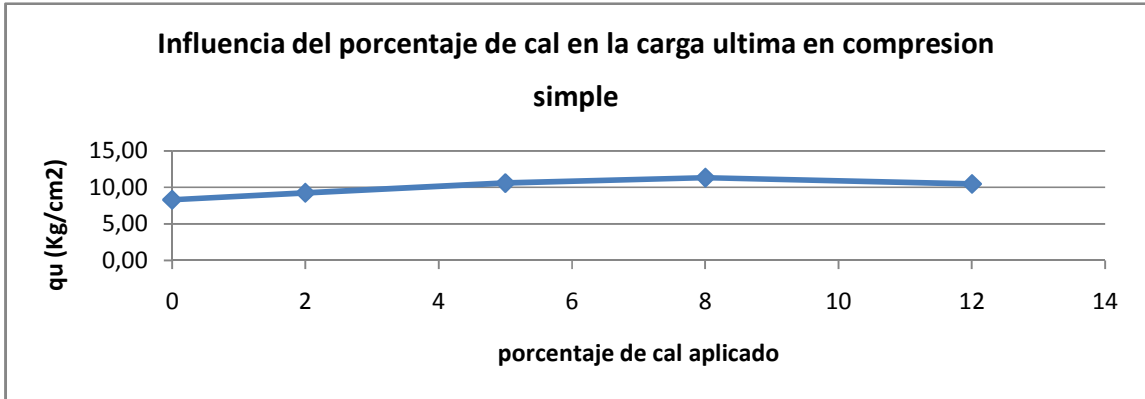


Grafico 4.15.- Influencia del porcentaje de cal en la resistencia a compresión simple.

### Análisis de resultados.

Se ve un notable mejoramiento gradual a un mayor porcentaje de cal llegando en las mezclas con el 5 y 8% a cargas aceptables dentro del rango de las especificaciones para subrasantes comparada con la carga máxima antes de rotura que puede presentar el suelo en estado natural.

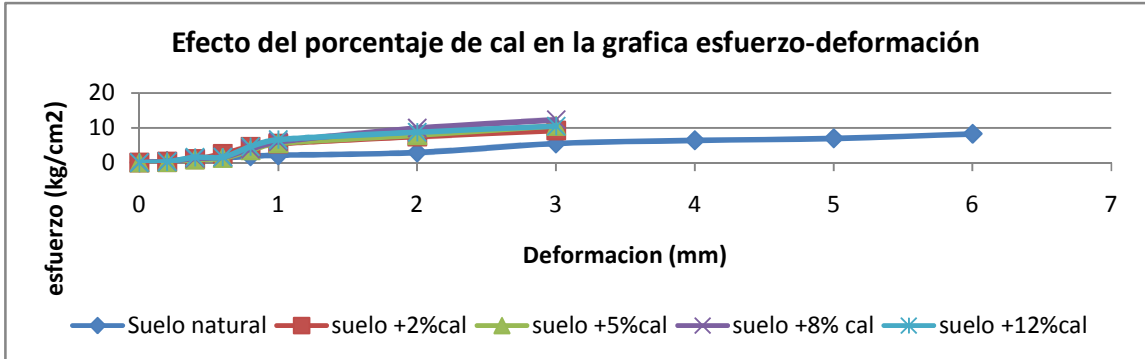


Grafico 4.16.- efecto del porcentaje de cal en la relación esfuerzo-deformación.

### Análisis de resultados.

Las mezclas suelo-cal presentan una deformación variable hasta la deformación de 1 mm y luego una deformación constante accedente hasta valores de 3 mm de deformación hasta la carga de ruptura. También se verifica que el suelo con el 8% de cal presenta mejores características de deformabilidad alcanzando mayores esfuerzos hasta su carga de ruptura.

**4.6.1.2.5. Determinación del espesor de las capas del pavimento y su costo para cada porcentaje de cal aplicado.**

porcentaje de cal:	2	5	8	12
espesor sub base (cm):	17	3	0	0
espesor base (cm):	8	6	8	6
espesor rodadura (cm):	10	10	10	10
costo sub base Bs/m2:	12,703	2,242	0,000	0,000
costo base Bs/m2:	7,467	5,600	7,467	5,600
costo rodadura Bs/m2:	165,471	165,471	165,471	165,471
costo estabilización Bs/m2:	15,062	18,877	30,916	38,537
<b>costo total (bs):</b>	200,703	192,190	203,854	209,608

Tabla 4.22.- espesores y costos según el porcentaje de cal aplicado.

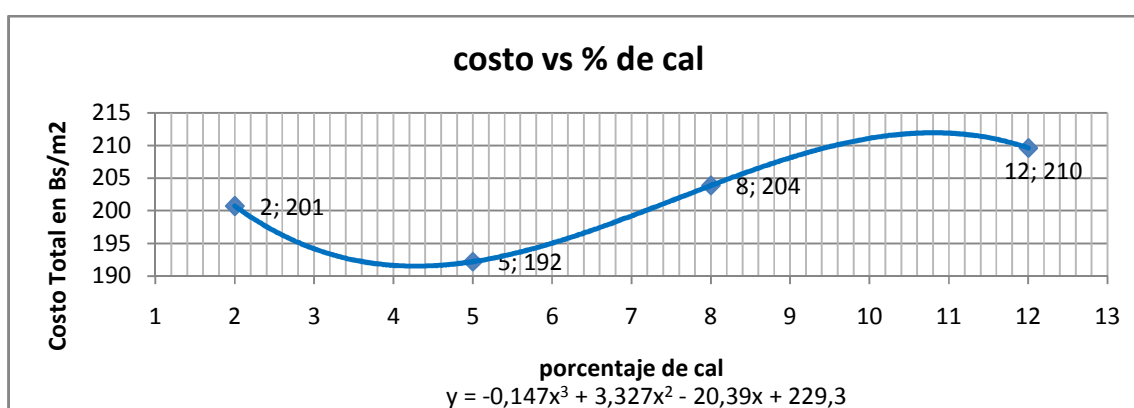


Gráfico 4.17.- variación del costo total según el porcentaje de cal.

**4.6.1.2.6. Determinación del contenido óptimo de cal.**

Para la determinación del contenido óptimo de cal se evaluarán los resultados obtenidos en los ensayos de Compactación Proctor Modificado T-180, CBR y comprensión simple y se tomara la recomendación del índice de pH donde predominara el menor contenido de cal que llegue al valor de 12.4 y que logre satisfacer las especificaciones requeridas para la

construcción de subrasantes, será predominante el costo en la determinación del valor óptimo de cal.

Propiedad	Ensayo	Resultados mezcla suelo +			
		2%cal	5%cal	8%cal	12%cal
Compactación	Humedad óptima (%)	10,67	12,50	12,25	11,00
	Densidad seca máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,14	2,16	2,23	2,22
Cambio volumétrico	Expansión (%)	3,34	2,22	3,08	-0,50
Capacidad de soporte	CBR al 100%	6,69	24,29	33,63	23,25
	CBR al 95%	5,79	16,57	19,69	20,48
Resistencia a compresión	Carga última qu (kg/cm <sup>2</sup> )	9,26	10,59	11,34	10,48
Costo total	Bs/m <sup>2</sup>	200,70	192,19	203,85	209,61

Tabla 4.23.- resumen de resultados mezcla suelo – cal.

#### **Análisis de resultados.**

Se determinara el contenido óptimo de cal al primer valor que logre cumplir con las características técnicas de una subrasante buena, teniendo en cuenta que este debe cumplir con el valor máximo de expansión del 4% y una capacidad de soporte CBR de un valor mínimo de 20, se tomara en cuenta el menor costo total de porcentaje de cal que entre dentro de las especificaciones nombradas.

**Contenido Óptimo de Cal = 4,8 %**

**Costo Total = 191.45 Bs/m<sup>2</sup>**

#### **4.6.2. Estabilización Mecánica de Suelos**

Con investigaciones hechas sobre especificaciones se tomó la decisión de seguir la consigna de toda estabilización mecánica que como sabemos, la base está en la granulometría y tratando de no salirse de las especificaciones es que se hizo una serie de dosificaciones, que deben concluir en un material (mezcla) de calidad no mínima a la que

ofrece un suelo clasificado por la AASHTO como A-2-4. El cual es un material calificado de una calidad buena a excelente para la conformación de subrasantes.

Ahora en lo que respecta a las dosificaciones, el grupo de suelos al que pertenece un A-2-4 tienen en su composición granulométrica como máximo un 35% que pasa la malla N° 200.

Es de esta forma que se partió de una dosificación, primeramente bajo el límite de la tolerancia mezclando un 55% de arcilla con 45% de granular y se sometió a la mezcla resultante a todas las pruebas que exigen y rigen las especificaciones para subrasantes.

Al observar los resultados arrojados en la primera dosificación, se hizo una segunda dosificación y una tercera que fue la que nos dejó más satisfechos por las características de la mezcla resultante. Estas dos últimas dosificaciones se las hizo variar en una reducción gradual en 20% del material arcilloso, obteniendo así mezclas de 35% arcilla + 65% material granular; y 15% arcilla + 85% material granular respectivamente.

#### 4.6.2.1. Determinación de las propiedades físicas de la mezcla suelo-granular.

PROPIEDAD	ENSAYO	suelo + 45% granular	suelo + 65% granular	suelo + 85% granular
granulometría	% pasa tamiz 3/4"	72,492	62,091	52,878
	% pasa tamiz 1/2"	68,625	54,588	42,553
	% pasa tamiz 3/8"	65,225	48,947	38,361
	% pasa tamiz N° 4	63,178	44,912	32,277
	% pasa tamiz N° 10	59,590	40,443	27,187
	%pasa tamiz N° 40	57,341	37,655	19,962
	%pasa tamiz N° 200	55,371	34,548	14,961
Plasticidad	Limite Liquido	29,745	29,005	27,485
	Limite Plástico	19,823	20,249	21,039
	índice de Plasticidad	9,922	8,756	6,446
Clasificación	AASHTO	A-4(4)	A-2-4(0)	A-2-4(0)
	SUCS	CL	GC	GC-GM

Tabla 4.24. Características físicas de las mezclas de suelo-granular.

#### Análisis de resultados.

Como se puede observar en la tabla la primera mezcla de 55% arcilla y 45% granular, no llega a cumplir las especificaciones del tipo de suelo según AASHTO adecuados para

subrasantes, siendo este el caso de la segunda, tercera y cuarta mezcla. Se observa también que el índice plástico va reduciendo a mayor cantidad de material granular y menores cantidades de arcilla factor que se considera importante para ofrecer estabilidad a la subrasantes.

**4.6.2.1.1. Determinación de la humedad óptima y la máxima densidad alcanzada en laboratorio usando diferentes dosificaciones de suelo como estabilizante.**

Muestra suelo +	suelo natural	45% granular	65% granular	85% granular
<b>Humedad óptima (%)</b>	10,90	11,03	10,04	8,17
<b>Densidad seca (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1,82	2,02	2,24	2,35

Tabla 4.25.- Humedad óptima y máxima densidad alcanzada a diferentes porcentajes de material granular.

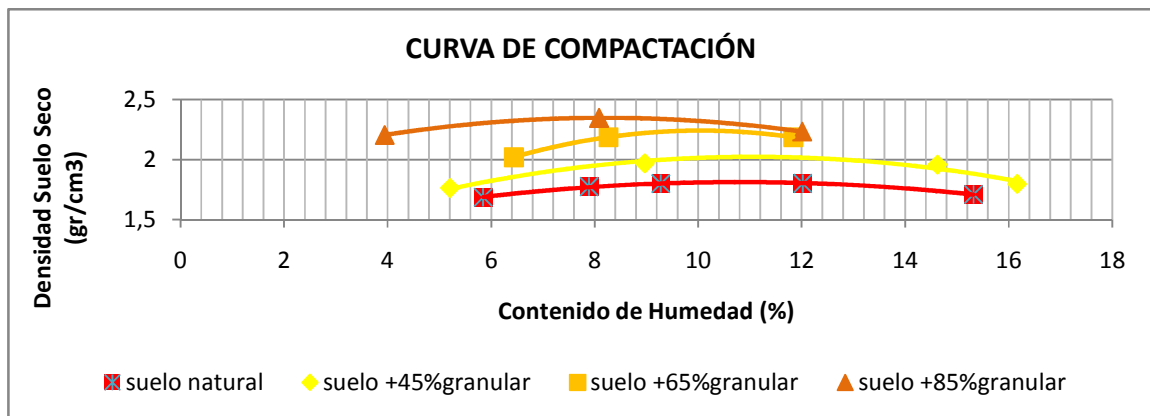


Gráfico 4.18.- Curvas de compactación para la mezcla suelo-suelo a diferentes porcentajes de material granular.

**Análisis de resultados.**

Se puede observar que para valores de 65% y 85% de material granular el porcentaje de humedad óptima se reduce a mayor y la densidad máxima va subiendo considerablemente comparada con el suelo natural.

**4.6.2.1.2. Determinación del CBR y expansión del suelo estabilizado a diferentes dosificaciones de suelo como estabilizante.**

Muestra	suelo natural	45% granular	65% granular	85% granular
<b>CBR al 100%</b>	2,63	9,95	29,75	54,94
<b>CBR al 95%</b>	2,19	5,14	22,75	47,59

Tabla 4.26.- CBR al 100% y CBR al 95% de la mezcla suelo –suelo.

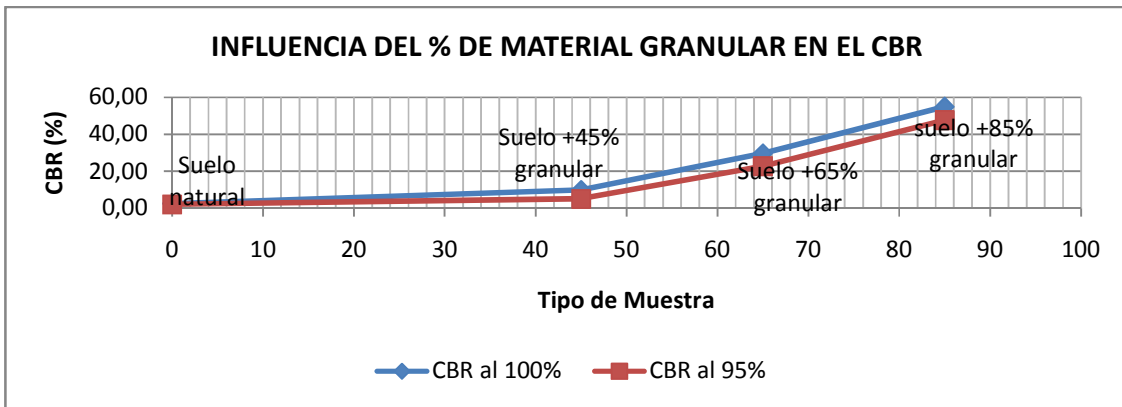


Grafico 4.19.- influencia del % de material granular en el CBR con relación al suelo natural.

**Análisis de resultados.**

Se observa que el % de CBR va mejorando gradualmente a mayor cantidad de material granular, pero este llegando a un valor máximo de 86,83 % en un porcentaje del 95% de material granular y 5% de arcilla, valor que se encuentran dentro del rango de bases de calidad muy buena.

Muestra	suelo natural	45% granular	65% granular	85% granular
<b>Expansión</b>	3,82	3,091	2,863	0,070

Tabla 4.27.- Expansión de la mezcla suelo – granular.

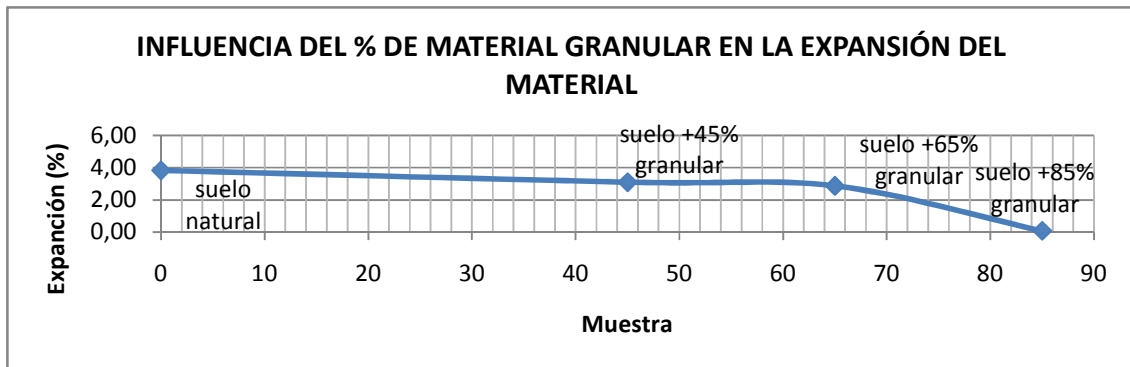


Grafico 4.20.- Influencia del % de material granular en la expansión con relación al suelo natural.

#### Análisis de resultados.

Se observa que mezcla suelo – granular se ve una notoria mejoría ya que a porcentajes mayores de 45% de material granular los valores de la expansión ya son iguales a 3%, valor aceptable para la conformación de una subrasante.

#### 4.6.2.1.3. Determinación del espesor de las capas del pavimento y su costo para cada porcentaje de material granular aplicado.

porcentaje de granular aplicado:	45	65	85
espesor sub base (cm):	27	0	
espesor base (cm):	8	8	2
espesor rodadura (cm):	10	10	10
costo sub base Bs/m2:	20,175	0,000	0,000
costo base Bs/m2:	7,467	7,467	1,867
costo rodadura Bs/m2:	165,471	165,471	165,471
costo estabilización Bs/m2:	26,676	35,214	43,751
<b>costo total (bs):</b>	<b>219,788</b>	<b>208,151</b>	<b>211,089</b>

Tabla 4.28.- espesores y costos según el porcentaje de material granular aplicado.

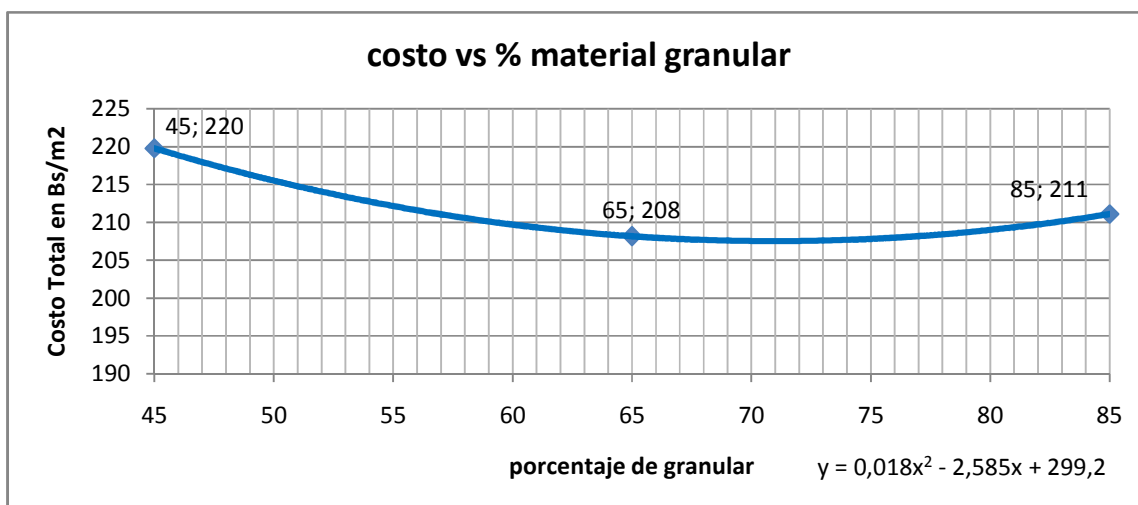


Gráfico 4.21.- Variación del costo total según el porcentaje de material granular aplicado.

#### 4.6.2.1.4. Determinación del porcentaje óptimo de material granular en la mezcla suelo – suelo.

Para la determinación del porcentaje óptimo de suelo granular se evaluarán los resultados obtenidos en los ensayos de Compactación Proctor Modificado T-180, CBR.

Propiedad	Ensayo	Resultados mezcla suelo +		
		45% granular	65% granular	85% granular
Compactación	Humedad óptima (%)	11,03	10,04	8,17
	Densidad seca máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,02	2,24	2,35
Cambio volumétrico	Expansión (%)	3,09	2,86	0,07
Capacidad de soporte	CBR al 100%	9,95	29,75	54,94
	CBR al 95%	5,14	22,75	47,59
Costo total	Bs/m <sup>2</sup>	219,79	208,15	211,09

Tabla 4.29.- resumen de resultados mezcla suelo – suelo.

### **Análisis de resultados.**

Se determinara el porcentaje optimo de material granular al valor que logre cumplir con las características técnicas de una subrasante, teniendo en cuenta que este debe cumplir con el valor mínimo de expansión del 4% y una capacidad de soporte CBR de un valor mínimo de 20% para subrasantes buena. También será fundamental el costo total de acuerdo a los diferentes porcentajes de material granular aplicado.

**Porcentaje Óptimo de Granular = 69 %**

**Costo Total = 206.53 Bs.**

Se determina este valor principalmente por estar dentro de las especificaciones y ser el valor con menor costo.

### **4.6.3. Análisis de Precios Unitarios Referenciales.**

El estudio de costos contempla básicamente la elaboración de tres precios referenciales, los cuales corresponden a tres alternativas de estabilización con métodos de construcción optimizados y adecuados a la maquinaria con la que se cuenta en nuestro medio para la aplicación de cada alternativa. Tales alternativas se aplican a la misma zona y por ende a la misma subrasante. En la primera alternativa, se emplean equipos comunes de construcción de una subrasante, como ser: motoniveladora, camión aguatero y compactadores, etc. En cambio en la segunda y tercera alternativa, además de la maquinaria antes mencionada se emplea un tractor agrícola, lo cual de seguro incidirá en parte, en los costos de construcción de estas alternativas.

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

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

#### **4.6.3.1. Costos Directos.**

a).- Materiales de construcción.

Se considera en cada tipo de estabilización un solo material fundamental para lograr la tarea o el objetivo propuesto como son: el material granular de banco en la estabilización mecánica; y la cal y cemento por el lado de la estabilización química.

Por parte de la estabilización granulométrica el costo y rendimiento del material granular de banco, se obtiene de información proporcionada por los ingenieros encargados de la construcción y mantenimiento de la H.A.M. los cuales son aplicados cotidianamente en nuestro medio.

Ahora en la estabilización suelo-cal el precio de la cal se obtiene de la cotización en diferentes puntos de distribución pero esto al por mayor con el fin de abaratar los costos. Asimismo el rendimiento de este aditivo se obtiene de los ábacos sugeridos por la U.S. Air Force cuyo detalle nos muestra la figura 3.8. (Ver anexos 5), así mismo para la determinación del rendimiento del cemento se realiza con ayuda de los ábacos sugeridos por el libro de estabilización de suelos de Santiago Márquez 2005 (ver anexos 5).

b).- Mano de obra.

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

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

c).- Maquinaria y equipo.

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

#### **4.6.3.2. Costos Indirectos.**

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

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

#### **4.6.3.3. Precios Unitarios de las Estabilizaciones Analizadas.**

En base a todos los conceptos establecidos en las secciones anteriores se elaboran las planillas de precios unitarios de cada alternativa de estabilización que fue sujeta a comparación en este estudio. El detalle de tales planillas se muestran en el anexo 4 y un resumen de los resultados obtenidos se presenta en la tabla 4:27.

<b>Item. o Actividad</b>	<b>Costo total Su\$/m<sup>2</sup></b>	<b>Costo total Bs/m<sup>2</sup></b>
Estabilización suelo – 7 % cemento	29.90	209.63
Estabilización suelo – 4.8 % cal.	27.31	191.45
Estabilización suelo – 69% granular.	29.46	206.53

Tabla 4.30.- Resultado de cálculo de precios unitarios para las alternativas de estabilización de suelos.

#### **4.6.4. Análisis de Actividades de Mayor Impacto Ambiental en la Realización de las Estabilizaciones Planteadas.**

El análisis de impacto ambiental que pueden causar la realización o que se pueden presentar dentro del proceso constructivo de cada alternativa de estabilizante planteada, solo se lo realiza detallando que actividades principales pueden causar algún efecto sobre el medio ambiente se tomara en cuenta también el procedimiento de elaboración de los agentes estabilizantes como la cal y cemento.

##### **4.6.4.1. Impacto ambiental causado por la estabilización suelo-cemento.**

<b>Impacto ambiental causado por la estabilización suelo - cemento.</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Impacto ambiental</b>
Conformación y nivelado	Contaminación a la flora del entorno con la pérdida de cobertura vegetal y generación de polvos
Escarificación Previa	Contaminación atmosférica con la generación de ruido y polvo del suelo natural
Esparcimiento del cemento	Generación de basura con bolsas de cemento, generación de polvo del cemento.
Humectación de suelo	Explotación de agua con el uso fuentes de ríos principalmente

<b>Impacto ambiental causado por la elaboración del cemento</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Impacto ambiental</b>
Explotación de materia prima	Explotación de recursos naturales como la utilización de piedras calizas y otros agregados
Manejo, almacenamiento y molienda	Contaminación atmosférica por la generación de gases tóxicos
Calcinación	Contaminación atmosférica por emisión de gases y quema de grandes cantidades de combustible.

Tabla 4.31.- actividades que generan impacto ambiental causado por la estabilización suelo-cemento.

#### 4.6.4.2. Impacto ambiental causado por la estabilización suelo-cal.

<b>Impacto ambiental causado por la estabilización suelo - cal</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Impacto ambiental</b>
Conformación y nivelado	Contaminación a la flora del entorno con la pérdida de cobertura vegetal y generación de polvos
Escarificación Previa	contaminación del aire con la generación de ruido y polvo del suelo natural
Esparcimiento de la cal	Generación de basura con bolsas de cal, generación de polvo.
Humectación de suelo	Explotación de recursos naturales con el uso de agua de fuentes de ríos.
Curado	Contaminación con líquidos provenientes de la lechada de la cal

<b>Impacto ambiental causado por la elaboración de la cal</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Impacto ambiental</b>
Preparación, transporte, trituración, almacenamiento.	Explotación de recursos naturales como la utilización de piedras calizas, generación de polvos.
Cocción.	Generación de ruidos y uso de combustibles.
apagado	Utilización de grandes cantidades de agua.

Tabla 4.32.- actividades que generan impacto ambiental causado por la estabilización suelo-cal.

#### 4.6.4.3. Impacto ambiental causado por la estabilización suelo-suelo.

<b>Impacto ambiental causado por la estabilización suelo - suelo</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Impacto ambiental</b>
Conformación y nivelado	Contaminación a la flora del entorno con la pérdida de cobertura vegetal y generación de polvos
Acarreo de material	Explotación de recursos naturales provenientes de lechos de ríos.
Escarificación Previa	Contaminación del aire con la generación de polvo del suelo natural
Esparcimiento del material granular	Contaminación atmosférica por la generación de ruido y polvo
Humectación de suelo	Explotación de recursos naturales con el uso de agua de fuentes de ríos.

Tabla 4.33.- actividades que generan impacto ambiental causado por la estabilización suelo-granular

#### 4.7. RESULTADOS OBTENIDOS.

##### 4.7.1. Resultados alcanzados por los estabilizantes óptimos analizados.

PROPIEDAD	ENSAYO	ESTABILIZANTE ANALIZADO		
		SUELO + CEMENTO	SUELO + CAL	SUELO + SUELO
Porcentaje optimo de estabilizante		7% de Cemento	4.8 % de Cal	69% de granular
Compactación	Humedad óptima (%)	12,50	12,38	9,66
	Densidad seca máxima (gr/cm3)	2,25	2,158	2,33
Cambio volumétrico	Expansión (%)	-0,141	2,291	2,48
Capacidad de soporte	CBR al 100%	38,93	24,54	34,78
	CBR al 95%	31,43	15,11	27,72
Resistencia a compresión	Carga ultima qu (kg/cm2)	15,135	10,51	
Costo total	kg/m2	209,63	191,45	206,53

Tabla 4.34.- Resumen de resultados obtenidos por los valores óptimos de cada estabilizante analizado.

#### 4.7.2. Análisis Técnico de resultados.

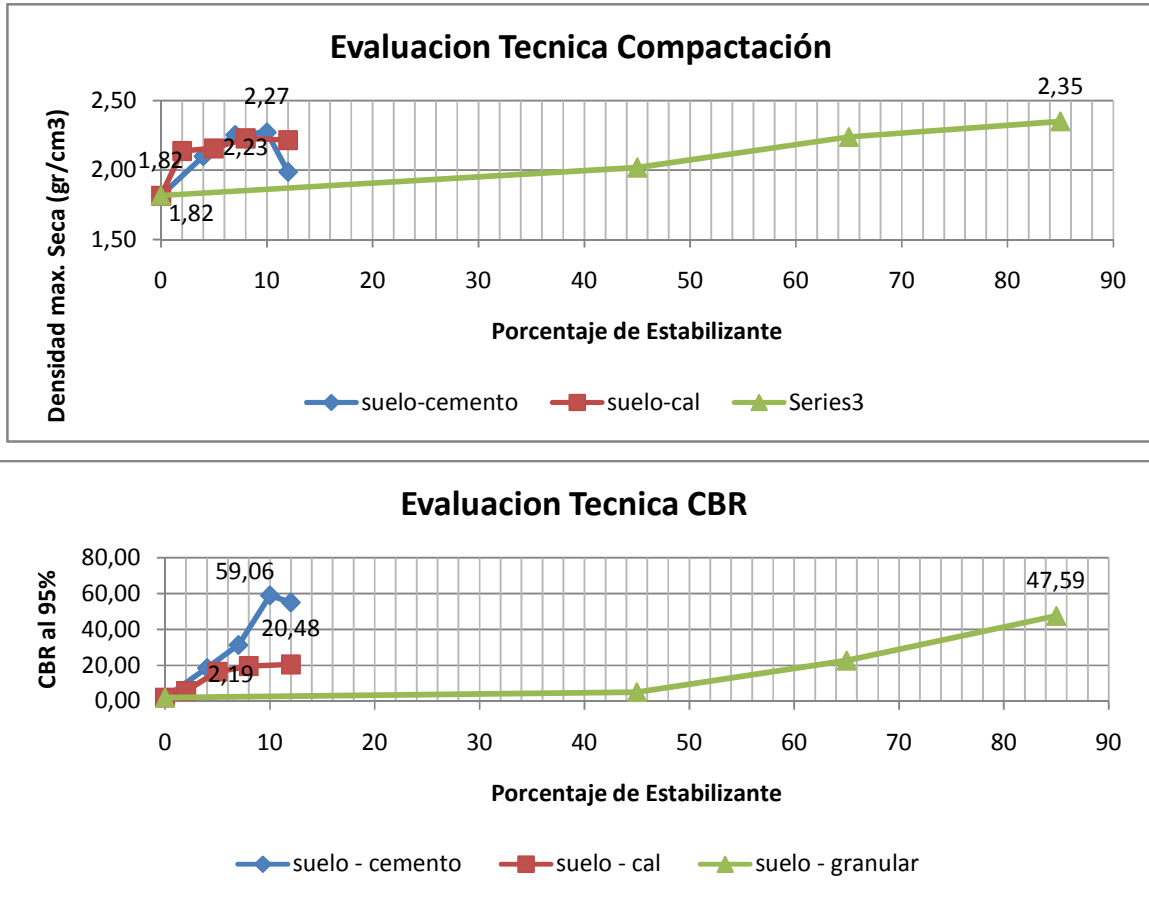


Grafico 4.22.- Evaluación de la humedad óptima, densidad máxima, y CBR.

- Al evaluar el ensayo de compactación se determina que la mezcla de estabilizante suelo-granular, es la que logra alcanzar mayor densidad seca con valores menores de humedad óptima comparada con los otros estabilizantes analizados.
- **La mezcla suelo-granular, es la que logra alcanzar mayor densidad seca de 2,35%, mejorando la densidad del suelo en un 64,56%.**

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

- se determina a la mezcla suelo – cemento y la mezcla suelo -suelo como las mejores alternativas de estabilizante que logran alcanzar menores valores de expansión, factor que influye directamente en el cambio volumétrico que sufrirá nuestra subrasante al estar está sometida a saturación de agua y con presión del tráfico vehicular, así mismo estas mezclas logra alcanzar niveles altos del porcentaje de CBR tanto al 100% y al 95% llegando a ofrecer subrasantes de elevada calidad.
- **Se determina a la mezcla suelo–cemento, como alternativa que logra alcanzar valores nulos de expansión, mejorando la expansión del suelo natural en un 100%, factor que influye directamente en el cambio volumétrico que sufrirá nuestra muestra.**
- **La mezcla suelo – cemento alcanza un mayor valor de CBR, 59,06% al 12% de cemento.**

Evaluación de la carga ultima alcanzada en el ensayo de compresión simple.

- solo se realiza el análisis de las mezclas suelo – cemento y suelo – cal ya que para la mezcla suelo – suelo no se pueden realizar las probetas ya que estas se desmoronan fácilmente por el alto contenido de material granular, la mezcla suelo – cemento logra alcanzar valores más altos de carga, siendo estos considerados en la especificaciones de las Subrasantes.

### 4.7.3. Análisis Económico.

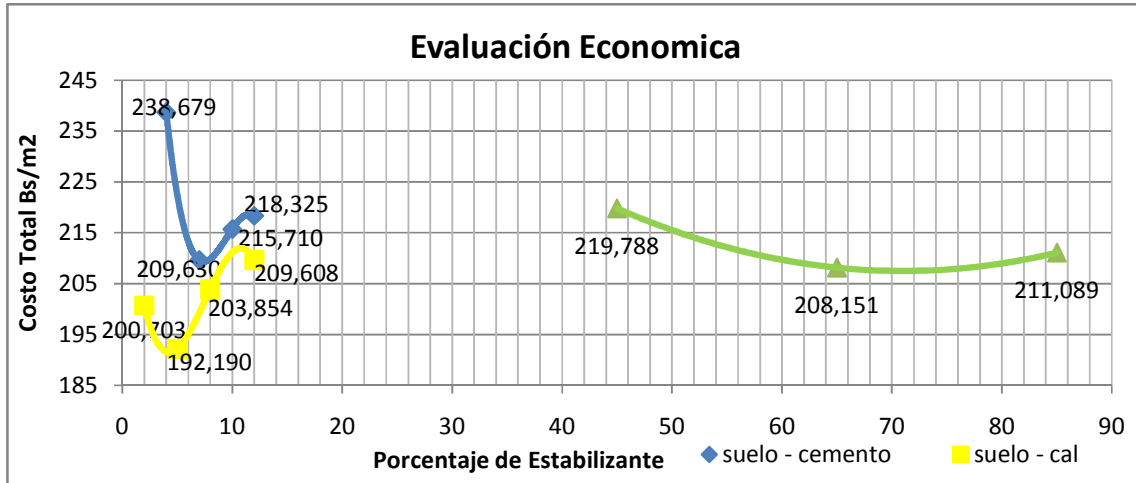


Gráfico 4.23. Evaluación económica de los valores óptimos de cada estabilizante analizado.

En lo que respecta al costo que implica cada alternativa de estabilización se tiene:

Por un lado la estabilización mecánica tiene un costo relativamente menor, tomando en cuenta solo el proceso de estabilización de la subrasante, pero para un costo final de acuerdo al espesor de las capas sub base y base su costo se eleva llegando a estar a la par del cemento.

Por otro lado la estabilización con cal o con cemento tiene un costo bajo en la realización de la estabilización por usar pequeños porcentajes de estos materiales, en comparación con el de la estabilización con material granular, pero las propiedades mejoradas se presentan en algunos casos más sustancialmente que la primera alternativa. De la misma manera esta capa estabilizada puede ser utilizada como base para pavimentos futuros tal es el caso de la estabilización con cemento que logra dar especificaciones elevadas que se consideran para el uso de bases de pavimentos.

Hasta ahora hemos visto parámetros y características visibles, pero veamos el caso de la textura y la rugosidad que presentará la superficie de rodadura, la cual en el caso de la estabilización con cal y cemento que ofrecen al conductor confort y marcha agradable en el vehículo en comparación con la superficie rugosa y muchas veces calaminosa de la

estabilización mecánica aspecto que influye de sobre manera si se considera la transitabilidad de los vecinos tanto peatonalmente como vehicular.

El anterior aspecto de seguro repercutirá de manera bastante considerable en el parámetro Costo- Beneficio que presenta una vía o lo que se llama doble economía de escala. Tal como se tiene experiencias ocurrirá, que la carpeta Suelo-Suelo colocada como subrasante por el efecto del desgaste provocado por los vehículos y la acción erosiva del agua desencadenarán en el material, pérdidas del poco porcentaje de fino que contiene derivando esto, en prontos ahuellamientos y un material parecido a un “empedrado suelto, llegando a tener características similares a la de la subrasante inicial. Esto de seguro coloca a la estabilización con cal o con cemento en situación ventajosa, ya que con el paso del tiempo y el efecto de lluvias las mezclas de suelo cal adquieren mayor resistencia aún, todo debido a la reacción de la cal con los minerales que posee la arcilla (autocurado) y la estabilización de cemento convierte al suelo prácticamente en impermeable. Y con esto hará que los costos de operación de los vehículos en los pavimentos estabilizados mecánicamente, sean mucho más elevados que los estabilizados con cal o con cemento.

También no debemos dejar de lado que la conservación del pavimento es mucho menor en el caso de la estabilización con cal o con cemento respecto al costo total de su sistema.

#### **4.7.4. Análisis Ambiental.**

Al hacer un análisis del impacto ambiental que pueden causar en el procedimiento de las estabilizaciones planteadas, se puede determinar que la contaminación causada por los efectos de la estabilizaciones suelo-cal o suelo-cemento son mínimas, ya que estas dentro de sus actividades no hacen una explotación considerable de recursos naturales, el punto más considerable de contaminación de estas alternativas es la de generación de polvos de cal o cemento, pero esta contaminación se puede controlar con una humectación previa del suelo a estabilizar reduciendo así en lo mínimo la generación de polvos.

Pero este análisis se ve desfavorecido si se toma en cuenta el impacto ambiental causado en la elaboración de la cal o cemento, ya que estos para su elaboración usan grandes cantidades de recursos naturales, quemando mucho combustible para su elaboración,

Por otro lado el mayor impacto que se presenta dentro de las estabilizaciones es la explotación de áridos de los lechos de ríos, causado por la estabilización mecánica de suelos ya que esta dependerá de un elevado porcentaje de material granular seleccionado (71% de materia granular).

Y para finalizar este análisis debemos dejar en claro que para la estabilización química se hace mayor uso de los materiales propios de la zona evitando de esta manera la explotación irracional de los áridos que se hace en los lechos de nuestro río Guadalquivir y el acarreo desde o hacia el sitio a estabilizar, lo que también es un punto a favor para la estabilización química.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES.

A la conclusión del presente trabajo, de comparación de tres alternativas que se usan en la estabilización de subrasantes para acondicionar ésta como una obra vial y fundamentando los resultados arrojados de un análisis técnico complementado por el económico, es que se puede enunciar las conclusiones más importantes que genera esta investigación.

- Para el desarrollo del estudio dentro de la zona de estudio, se vio la necesidad de determinar una muestra representativa del lugar, para lo que se realizó la extracción de siete muestras de suelos, llevadas a laboratorio para la realización de los ensayos de, humedad, granulometría, plasticidad y finalmente poder así clasificar nuestra muestra representativa dándonos los siguientes resultados.

Nº DE MUESTRA	CLASIFICACIÓN AASHTO	CLASIFICACIÓN SUCS
MUESTRA Nº 1	A-6(9) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 2	A-6(9) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 3	A-4(8) suelo limoso	CL-ML mezcla limo y arcilla
MUESTRA Nº 4	A-6(9) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 5	A-6(5) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 6	A-6(7) suelo arcilloso	CL arcilla
MUESTRA Nº 7	A-6(8) suelo arcilloso	CL arcilla

Tabla 5.1.- Clasificación muestras de suelos.

Quedando determinada la muestra representativa como un **suelo A-6(9) o Cl clasificando al suelo como arcilla.**

- Se determinaron las propiedades del suelo en estado natural, realizando diferentes ensayos y se verifico si este cumple con las características mínimas requeridas para la formación de subrasantes, dando así los siguientes resultados:

<b>Ensayo Realizado</b>	Suelo Natural	Especificaciones para la Conformación de la Subrasante	Verificación
Humedad natural (%)	8.71	-	-
Humedad óptima (%)	10.9	-	-
densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	1.82	-	-
CBR al 100%	2.6	≥ 4%	<b>NO CUMPLE</b>
CBR al 95%	2.2	≥ 4%	<b>NO CUMPLE</b>
Expansión máxima (%)	3.82	≤ 3%	<b>NO CUMPLE</b>
Resistencia a compresión simple. (Kg/cm <sup>2</sup> )	8.3	recomendación Mínimo 10 Kg/cm <sup>2</sup>	<b>NO CUMPLE</b>

Tabla. 5.2.- Propiedades del suelo en estado natural.

- Con los ensayos realizados y analizando sus resultados se puede determinar que el suelo en estado natural no cumple con los requisitos mínimos indispensables para la conformación de la subrasante, determinando así que será necesario realizar un proceso de mejoramiento de suelos.
- Se determino el espesor real que se debe estabilizar, tomando como dato el CBR de la subrasante misma, y asumiendo un CBR del 4% como requisito mínimo, que es en este caso un objetivo a alcanzar, con estos datos gráficamente se determino un espesor de 10 cm para estabilizar, y poder así alcanzar el objetivo planteado de mejoramiento.
- Realizando el análisis técnico, económico de las tres alternativas de estabilizantes se determinaron las propiedades de los porcentajes óptimos de cada estabilizante:

<b>ensayo realizado</b>	<b>suelo - cemento</b>	<b>suelo - cal</b>	<b>suelo - granular</b>
porcentaje optimo	<b>7 % de Cemento</b>	<b>4,8 % de Cal</b>	<b>69% de granular</b>
Humedad óptima (%)	12,50	12,38	9,66
densidad máxima (gr/cm3)	2,25	2,158	2,33
CBR al 100%	38,93	24,54	34,78
CBR al 95%	31,43	15,11	27,72
Expansión máxima (%)	-0,141	2,291	2,48
Resistencia a compresión simple. (Kg/cm3)	15,135	10,51	
costo (Bs/m2)	<b>209,63</b>	<b>191,45</b>	<b>206,53</b>

Tabla 5.3.- resultados obtenidos del análisis técnico de porcentajes óptimos de estabilizantes analizados.

- Mediante un análisis de los resultados alcanzados se puede determinar las siguientes conclusiones técnicas:

1) En los ensayos de límites de Atterberg de la mezcla suelo-cal. Se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Se determina que la reacción de la cal en la mezcla con el suelo A-6(9), en el transcurso del tiempo, no afecta al límite líquido.
- En el transcurso de las primeras 72 horas la reacción de la mezcla suelo-cal ocasiona que el límite plástico suba reduciendo así el índice de plasticidad, que es indicador directo de las propiedades expansivas del suelo analizado.
- Se observa que con 3% cal en la mezcla, en el transcurso de las primeras 96 horas, prácticamente anula el índice de plasticidad, uniendo la frontera entre el límite líquido y límite plástico. Lo que no ocurre a porcentajes mayores del 5 y 8% de cal, ya que estas mezclas un aumento del índice plástico.

- Se puede determinar curvas de optimización del límite plástico y el índice de plasticidad, de acuerdo al comportamiento de las mezclas en el transcurso del tiempo y con diferentes porcentajes de cal. De estas curvas se puede determinar que el valor óptimo de cal para la reducción del índice plástico es de 5,5%.
- 2) En el ensayo de compactación se observa que en los estabilizantes químicos la humedad aumenta al igual que su densidad seca máxima, esto ocurre porque los estabilizantes químicos tienen la característica de absorber mayor cantidad de agua, tanto en su manipuleo como en su curado. Para el estabilizante de material granular se observó que a una mayor cantidad de material granular menor el porcentaje óptimo de humedad y mayor la densidad seca alcanzada.
- 3) Con el dato de la humedad óptima se procedió a realizar los ensayos de CBR, fundamentales para nuestro estudio ya que de este valor dependerá el dimensionamiento de las capas que conforman el paquete estructural de una carretera y de igual manera de este dependerá directamente el costo final de acuerdo al estabilizante utilizado.
- Se procedió a determinar los CBRs al 95% (valor óptimo en campo), de los diferentes porcentajes de estabilizantes utilizados, tanto en la estabilización química y mecánica, en este ensayo se puede hacer las siguientes conclusiones.
  - En el caso del cemento se observa que a bajos porcentajes de cemento el CBR aumenta en más del 845%. En el ensayo de expansión se observa que a pequeñas cantidades de cemento prácticamente anula la expansión, también se observó en la práctica valores negativos de expansión, producto del efecto de contracción del cemento, en su etapa de curado del mismo.
  - En el caso de la cal se observa que el valor de soporte (CBR) tiende a subir hasta su valor máximo de 20,48% de CBR al aplicar 12% de cal, y a valores mayores de cal el CBR empieza a bajar, comprobando recomendaciones bibliográficas de porcentajes adecuados

de cal, ocurriendo el mismo fenómeno en su expansión, también se observó en este ensayo que al usar cal viva este generara calor y una gran expansión los 2 primeros días de saturación reduciéndose esta los demás días de curado en agua, este fenómeno no ocurre al usar cal apagada ya que esta ya se encuentra hidratada y no necesita de agua para su reacción.

- En el caso del material granular usado se ve que el CBR no llega a valores esperados, observándose que esto ocurre por las propiedades expansivas del suelo natural, se observa que para cumplir con los requisitos mínimos para la conformación de la subrasante, sería necesario el empleo de un gran porcentaje de material granular, lo que en la investigación pasaría de ser estabilización a un remplazo del material analizado.
- 4) Se procedió a realizar pruebas de comprensión simple principalmente en las estabilizaciones químicas con el objetivo de verificar si los valores alcanzados entraban en el rango de especificaciones recomendadas en algunas bibliografías analizadas.
- 5) Con el valor del CBR se procedió a determinar el costo de la estabilización para cada porcentaje de estabilizante utilizado, también se determino el costo de la realización de las capas sub base, base y rodadura (carpeta asfáltica), con el fin de tener un costo más real y final que se debería aplicar en obra, teniendo determinados los costos se procedió a hacer el análisis Costo, estabilizante, con el fin de poder determinar en una forma más apegada a la realidad, el porcentaje optimo de cada estabilizante utilizado. Determinando las siguientes conclusiones:
- Tanto en el caso del cemento como la cal se formaron graficas con forma de una ese horizontal, indicándonos estas dos valores correspondientes al mínimo valor de costo y a su máximo valor, con esta grafica se determino el valor optimo de estabilizante que de un costo menor y este dentro del rango de especificaciones y objetivos planteados. Teniendo así como resultado que para cemento se necesitaría 7 % y para cal un 4,8%.

- En el caso del material granular se formo un curva polinomial de segundo grado dándonos un solo valor optimo de material granular respecto a su costo. Siendo así el valor de 69% de materia granular.
  - Al analizar los costos se determina que el porcentaje óptimo de 4,8% de cal tiene un costo menor, con relación a los otros estabilizantes.
- 6) También como respaldo y complementación del estudio se realizo un estudio del impacto ambiental que se causa tanto en el procedimiento de construcción de una estabilización como en la misma elaboración de los materiales utilizados como estabilizantes, llegando a la siguiente conclusión:
- Que si bien en la estabilización mecánica se llega a utilizar mucho material granular sacado de ríos principalmente, este impacto se deberá comparar con su similar en la extracción de materiales necesarios para la elaboración del cemento y la cal, sin olvidar que dentro de su procedimiento, existe el uso de grandes cantidades de combustibles y agua y la generación de sustancias toxicas. Analizando desde ese punto de vista se ve claramente que en la elaboración de cal o cemento, se hace más daño ambiental tanto a recursos naturales como daños al medio ambiente, quedando claramente en ventaja la estabilización mecánica.

## **5.2. RECOMENDACIONES.**

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

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

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

**a) Recomendación Técnica.-** Se recomienda realizar la mezcla suelo – 7% de cemento por las siguientes características:

- Aumento de máxima densidad seca de 1,82 a 2,25 gr/cm<sup>3</sup>.
- Aumento del CBR (al 95%) de 2,2 % a 31,43%.
- Reducción de la expansión de 3,82 a 0%.

**b) Recomendación Económica.-** Se recomienda realizar la mezcla suelo – 4,8% cal por tener un costo final menor (estabilización, construcción paquete estructural) de 191,45 Bs. Inferior a las demás estabilizaciones analizadas.

**c) Recomendación Ambiental.-** Se recomienda la estabilización suelo – 69% material granular, por ser esta la de menor impacto ambiental, analizado desde la elaboración misma de los estabilizante como así del proceso constructivo de estabilización.

**RECOMENDACIÓN FINAL:** SE RECOMIENDA REALIZAR LA ESTABILIZACION CON 4,8% DE CAL SIENDO ESTE EL DE MENOR COSTO, Y CUMPLE CON LAS LOS REQUISITOS MINIMOS INDISPENSABLES PARA LA CONFORMACION DE SUBRAZANTES EN VIAS URBANAS