

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las estabilizaciones son procedimientos físicos y/o químicos que nos permiten modificar las características de un suelo con la finalidad de mejorar su comportamiento en cuanto a resistencia y deformación. Para disminuir los cambios en las propiedades en un suelo, se puede incorporar un aditivo a éste.

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de estabilización son: Estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad.

Las estabilizaciones tradicionales son las que tienen como conglomerante la cal, el cemento etc. Con este proyecto buscamos nuevas y mejores alternativas para el tratamiento de suelos.

CON-AID es un estabilizador químico (iónico) de suelos que mejora y amplía las prestaciones de los materiales locales en la construcción de caminos. Esta tecnología es aplicada en varios países alrededor del mundo para la estabilización permanente de suelos y controlar así los efectos perjudiciales del barro en épocas de lluvia, así como del polvo y de la erosión en épocas secas.

En nuestro país y más concretamente en nuestra ciudad *CON-AID* no es muy conocido, razón por la que no es utilizado para la estabilización de suelos en nuestra región.

Con este proyecto se pretende probar a *CON-AID* en diferentes tipos de suelos de nuestra ciudad, para analizar su influencia en las propiedades de estos suelos.

Contar con vías transitables libres de polvo y barro es muy importante para la población, por esta razón es que este proyecto estudia una nueva alternativa para el mejoramiento de estos caminos.

El presente proyecto comprende un estudio en laboratorio de las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes suelos finos (A-4, A-6, A-7) mezclados con CON-AID. Los ensayos van desde la clasificación ASHTTO hasta los ensayos de compactación y CBR.

1.1.-Justificación

Como sabemos unas buenas vías de comunicación significan el desarrollo económico de nuestro país pues mediante ellos es posible trasladar todo tipo de mercancías, materias primas y productos elaborados así como el traslado de personas.

La presencia de suelos malos (arcillas) en nuestros caminos con llevan a que estos se vuelvan intransitables ya sea por la producción de barro y de polvo o peor aún la destrucción del pavimento.

Por estas razones es necesario un mejoramiento del suelo ya que el reemplazo del material insitu puede ser demasiado costoso. En la actualidad en nuestro departamento los métodos más usados de estabilización son los tradicionales es decir la estabilización con cal y la estabilización con cemento, de ahí parte la idea de buscar nuevas y mejores alternativas para estos tratamientos.

El aditivo químico CON-AID es usado con gran éxito en países vecinos como Argentina y Brasil, con este proyecto se pretende probar el producto en los suelos de nuestro departamento para su posterior implementación al mercado tarijeño.

La falta de información técnica y experiencia con este tipo de estabilizador hacen que en nuestra región no se aplique esta tecnología, con el presente trabajo de investigación se quiere cambiar esta situación marcando un precedente para incentivar su aplicación.

Con el uso de CON-AID se tendrá un mayor valor de soporte del suelo y menor mantenimiento frente a los métodos tradicionales.

Como aporte académico se mostrará el análisis de los resultados mostrando la variación de las propiedades mecánicas de los suelos con el aumento y disminución del aditivo CON-AID.

1.2.-Problema

¿Cuál es la incidencia del aditivo CON-AID, aplicado a diversos tipos de suelos finos?

1.3.- Hipótesis

Se hace un estudio y se propone la aplicación en el laboratorio del aditivo CON-AID en diferentes tipos de suelo, para ensayos probatorios entonces se podrá observar la diferencia en los resultados, lo que implica saber la incidencia de este aditivo en los suelos finos para su estabilización.

1.4.-Objetivos

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

1.4.1.-Objetivo General

Realizar un estudio detallado en el laboratorio de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla de diferentes tipos de suelo con el aditivo CON-AID para así facilitar estos datos a la comunidad técnica y regional y se ponga en consideración como una alternativa de solución a los problemas de tratamiento de suelos para su uso vial.

1.4.2.-Objetivos Específicos

- Determinar en qué tipo de suelo se comporta mejor el aditivo CON-AID.
- Analizar las propiedades de los diferentes suelos finos (A-4, A-6 y A-7).
- Observar cómo se comporta el suelo con la disminución y aumento del aditivo.
- Comparar las características mecánicas con datos obtenidos del material sin estabilizar y frenteal material estabilizado.

- Determinar la cantidad óptima del aditivo que debe agregarse a los distintos tipos de suelo para una buena estabilización.
- Determinar los costos de una estabilización con el aditivo CON-AID.

1.5.-ALCANCE

Realizar el estudio enmarcado del aditivo químico “CON-AID” en diferentes tipos de suelos finos (A-4, A-6, A-7) Las muestras de suelo se obtendrán de diferentes sectores de nuestra ciudad.

Se estudiará la aplicación del estabilizador CON-AID para mejorar el comportamiento de la subrasante, cuando esta se encuentre en malas condiciones.

Verificar si los ensayos realizados en laboratorio establecen que las mezclas resultantes de la estabilización, cumplen con las exigencias mínimas requeridas para su utilización en la subrasante de caminos.

Este estudio contemplara, los ensayos necesarios en laboratorio para su clasificación e identificación de los materiales en análisis, para verificar las propiedades mecánicas de las muestras de suelo obtenidas, entre estos ensayos se realizara la clasificación AASHTO, también los ensayos de compactación y de CBR.

Determinación del mejor tipo de suelo para la combinación con el aditivo iónico “CON-AID” desde el punto de vista de la ingeniería para su aplicación en la mejora de la subrasante.

Veremos las características del aditivo CON-AID, se obtendrán resultados con y sin la inclusión del mismo por último se hará una comparación de los resultados.

Finalizando el presente estudio se emitirán conclusiones y se darán algunas recomendaciones que ayuden a que el aditivo iónico CON-AID sea una alternativa más para el tratamiento de suelos.

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS Y LA SUBRASANTE

2.1.- Los suelos

En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas.

La granulometría o gradación de las partículas de un suelo tiene por su tamaño una gran influencia en las propiedades del mismo. El análisis granulométrico es necesario para la clasificación de un suelo y permite establecer una clasificación básica según el tamaño de sus partículas. Grava, arena, arcilla, limo, etc.

Las gravas y las arenas constituyen los llamados suelos granulares o de grano grueso, en tanto que limos y arcillas son suelos finos o de grano fino.

Los suelos granulares provienen de la alteración de la roca. En esta alteración está el origen de la forma de sus partículas (redondeada o angulosa). Contienen una proporción reducida de finos, por lo que la plasticidad es nula o muy baja, no tienen cohesión y por lo tanto su resistencia se debe únicamente al rozamiento interno.

Entre los suelos finos, se puede diferenciar claramente los limos de las arcillas. Los limos son suelos finos formados por partículas normalmente entre 0,075 y 0,002 mm que no llegan a presentar plasticidad elevada, aunque si suelen ser algo plásticos, en seco los terrones pueden ser desmenuzados con la mano.

Las arcillas están constituidas de partículas muy pequeñas, en su mayoría coloidales el tamaño de las partículas es menor a 0,002 mm presentan en consecuencia una gran capacidad de absorber agua lo que se produce en variaciones de volumen producidas por la variación de la humedad. Los suelos cohesivos se hinchan y se contraen, pudiendo presentar una pérdida de capacidad resistente.

Por su estructura generalmente laminar, las arcillas pueden absorber cantidades importantes de agua variando su densidad, propiedades mecánicas y sufrir hinchamiento, en estado seco, un terrón de arcilla es casi imposible de desmenuzar con los dedos.

2.2.- Tamaño de las Partículas del Suelo.

Independientemente del origen del suelo, los tamaños de partículas en general, que conforman un suelo, varían en un amplio rango. Los suelos en general son llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas, varias organizaciones desarrollaron límites de tamaño de suelo separados.

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas) < 0.075	

Tabla II-1 Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica

Los suelos de grano fino son aquellos cuyo tamaño de partículas es menor que 0,075 mm, tales como los limos y las arcillas. Se selecciona la línea divisoria de 0,075 mm porque generalmente ese es el tamaño de grano más pequeño que puede verse a simple vista.

Las arcillas son principalmente partículas submicropospicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales. Como muestra la tabla II-1. Las partículas se clasifican como arcilla con base en su tamaño y no tienen necesariamente minerales arcillosos.

Las arcillas se definen como aquellas partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua”.

2.3.- Análisis Mecánico del Suelo

El análisis mecánico es la determinación del rango del tamaño total. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas del suelo: análisis por cribado, para tamaños de partículas mayores de 0,075 mm de diámetro, y análisis por hidrométrico, para tamaños de partículas menores de 0,075 mm de diámetro.

Se describen a continuación los principios básicos de los análisis por cribado e hidrométrico.

2.3.1.- Análisis por Cribado

El análisis por cribado consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas que tienen aberturas progresivamente más pequeñas. Los números de las mallas estándar con sus tamaños de aberturas se dan a continuación en la Tabla II-2

Malla No.	Abertura (mm)
4	4.750
6	3.350
8	2.360
10	2.000
16	1.180
20	0.850
30	0.600
40	0.425
50	0.300
60	0.250
80	0.180
100	0.150
140	0.106
170	0.088
200	0.075

Tabla II-2

Fuente: Braja M. Das.

Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica

Primero el suelo se seca en el horno y luego todos los grumos se disgregan en partículas pequeñas antes de ser pasados por las mallas. La Figura muestra un conjunto de estos, así también se muestra un detalle de la abertura de los tamices. Después de que el periodo de vibración concluye se determina la masa de suelo retenida en cada malla. Cuando se analizan suelos cohesivos, resulta difícil disgregar los grumos en partículas individuales. En tal caso, el suelo se mezcla con agua para formar una lechada que luego se lava a través de las mallas. Las porciones retenidas en cada malla se recolectan por separado y se secan en horno antes de que la masa retenida en cada malla sea determinada.



Figura II-1 Fuente: Fotografía

Los resultados del análisis por cribado se expresan generalmente como porcentaje del peso total de suelo que ha pasado por las diferentes mallas.

2.3.2.- Análisis Hidrométrico

El análisis hidrométrico se basa en el principio de sedimentación de granos de suelo en agua, cuyo tamaño de partículas es menor a 0,075 mm. Cuando un espécimen de suelo se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad, se supone que todas las partículas de suelo son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes según la cual.

$$v = \frac{p_s - p_w}{18n} D^2$$

Dónde:

v = Velocidad

ps = Densidad de las partículas de suelo

pw = Densidad del agua

n = Viscosidad del agua

D = Diámetro de las partículas del suelo

De la ecuación (2.1)

$$D = \sqrt{\frac{18nv}{p_s - p_w}} = \sqrt{\frac{18n}{p_s - p_w}} \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Dónde:

$$v = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{L}{t}$$

Note que:

$$p_s = G_s p_w$$

Combinando las ecuaciones (2.2) y (2.3) se obtiene:

$$D = \sqrt{\frac{18n}{(G_s - 1)p_w}} \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Si las unidades de n son (g .s)/cm², pw en g/cm³, L está en cm, t está en min y D está mm, entonces:

$$\frac{D(mm)}{10} = \sqrt{\frac{18 \left(\frac{g \cdot s}{cm^2}\right)}{(G_s - 1)p_w \left(\frac{g}{cm^3}\right)} \sqrt{\frac{L(cm)}{t(min) * 60}}$$

$$D = \sqrt{\frac{30n}{(G_s - 1)p_w} \sqrt{\frac{L}{t}}}$$

Si se supone que p_w es aproximadamente igual a 1 g/cm^3 , tenemos

$$D(mm) = K \sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)}}$$

$$K = \sqrt{\frac{30n}{(G_s - 1)}}$$

Note que el valor de K es una función de G_s y n que son dependientemente de la temperatura de la prueba.

En el laboratorio, la prueba del hidrómetro se conduce en un cilindro de sedimentación con 65g de muestra seca en el horno, el cilindro de sedimentación tiene 457 mm de altura y 63,5 mm de diámetro; el cilindro está marcado para un volumen 1000 ml. Como agente dispersor se usa generalmente el hexametáfosfato de sodio, el volumen de la suspensión de suelo se lleva hasta los 1000 ml añadiendo agua destilada.

Cuando un tipo de hidrómetro ASTM 152H se coloca en la suspensión de suelo (Figura) en un tiempo t , medido desde el principio de la sedimentación, mide la densidad de sólidos en la vecindad de su bulbo a una profundidad L . La densidad de sólidos es una función de la cantidad de partículas de suelo presentes por volumen unitario de suspensión en esa profundidad. En un tiempo t , las partículas de suelo en suspensión a una profundidad L tendrán diámetro menor que D , calculado según la ecuación (penúltima), las partículas más grandes se habrán asentado más allá de la

zona de medición. Los hidrómetros son diseñados para dar la cantidad de suelo, en gramos aún de suspensión. Los hidrómetros son calibrados para suelos que tienen una densidad de sólidos (G_s) de 2,65; para suelos de otra densidad de sólidos, es necesario hacer correcciones.

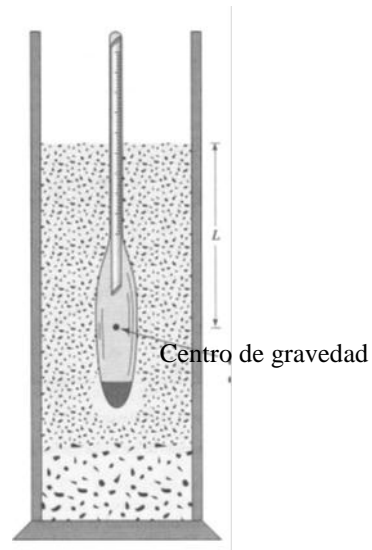


Figura II-2 Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica

Conocida la cantidad de pesos en suspensión, L y t , podemos calcular el porcentaje de suelo por peso más fino que un cierto diámetro. Note que L es la profundidad medida desde la superficie del agua hasta el centro de gravedad del bulbo del hidrómetro donde se mide la densidad de suspensión.

2.3.3.- Curva de distribución Granulométrica

Los resultados del análisis mecánico (análisis por cribado e hidrométrico) se presentan generalmente en graficas semilogarítmicas como curvas de distribución granulométrica (o de tamaño de grano). Los diámetros de las partículas se grafican escala logarítmica y el porcentaje correspondiente de finos en escala aritmética. Por ejemplo, en la Figura se muestra la curva de distribución granulométrica combinando los resultados del análisis por cribado y el análisis hidrométrico para la fracción de finos.

Cuando los resultados del análisis por cribado y del análisis hidrométrico se combinan, generalmente ocurre una discontinuidad en el rango que estos se traslapan. La razón para la discontinuidad es que las partículas del suelo son generalmente irregulares en su forma. El análisis por cribado da la dimensión intermedia de una partícula; el análisis hidrométrico da el diámetro de una esfera que se asentaría a la misma razón que la partícula de suelo.

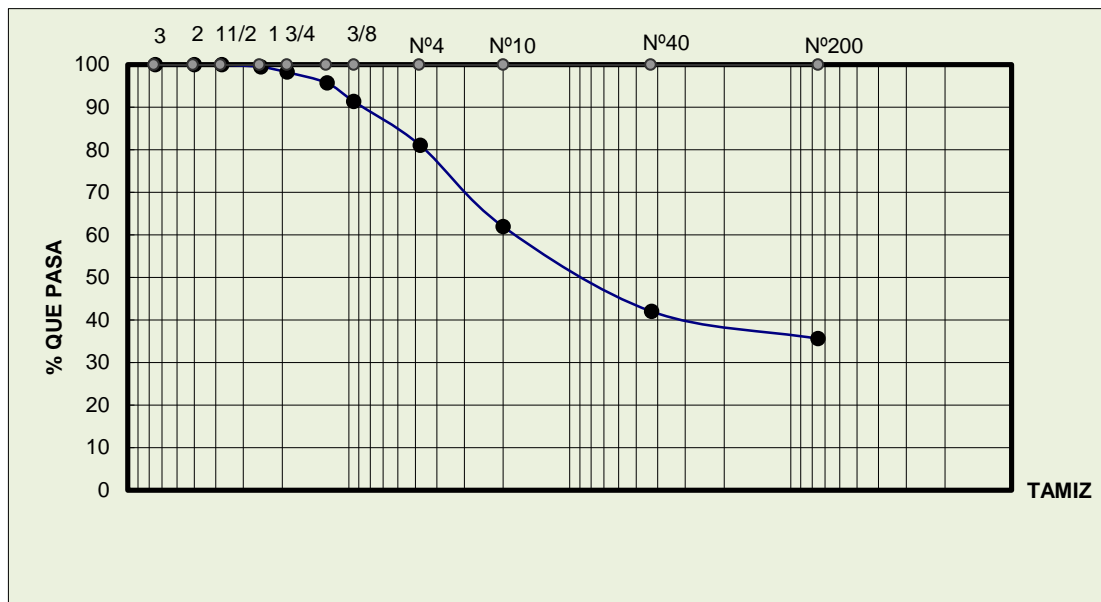


Figura II-3 Fuente: Elaboración Propia

2.4.-Plasticidad de los Suelos

La plasticidad es la propiedad más característica de los suelos de arcilla, esto es su capacidad para adquirir y retener una nueva forma cuando se moldean. Nuevamente son el tamaño y la forma de las partículas en combinación con la naturaleza de la capa absorbida, las que controlan esta propiedad. Los suelos con valores de superficie específica altos, como los de montmorilonitas son los plásticos y los compresibles.

2.4.1.- Estados de Consistencia

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios, de los cuales uno solo, el debido a Atterberg hizo ver que en primer lugar, la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, si no circunstancial y dependiente de su contenido de agua, desarrollo un método para describir la consistencia de los suelos con contenidos de agua variables. A muy bajo contenido de agua el suelo se comporta como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto el suelo y el agua fluyen como un líquido, por lo tanto dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos: Sólido, semisólido, plástico y líquido como se muestra en la Figura:

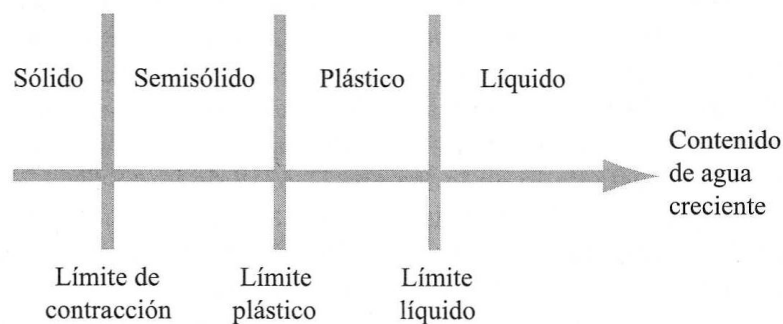


Figura II-4 Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica

2.4.1.1.-Límite Líquido

El límite líquido, o LL se define como el contenido de humedad para el cual el suelo va a fluir hasta que se cierre una ranura de 12,7 mm de ancho, que se practica en la muestra de suelo colocada en la copa de aparato de Casagrande con un ranurador laminar, al hacer caer la copa de este equipo estándar para determinar LL, 25 veces contra la base del aparato por medio de una manivela.

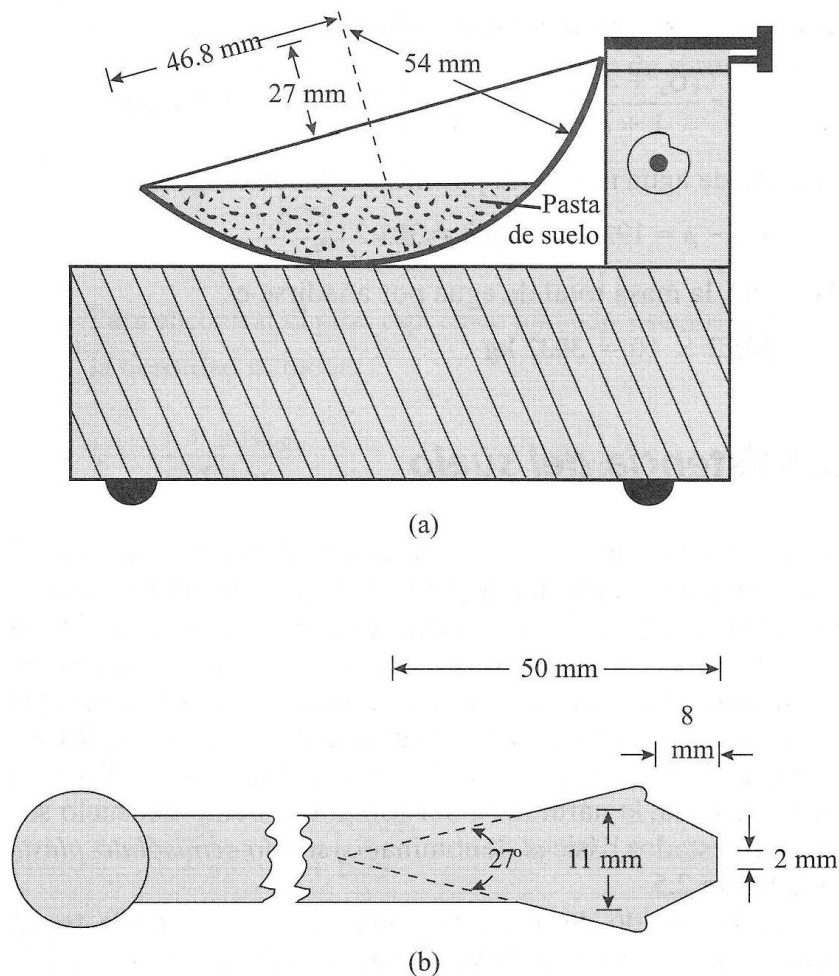


Figura II-5 Prueba del límite líquido: (a) dispositivo para la prueba
 (b) ranurador; (c) pasta de suelo antes de la prueba; (d) pasta de suelo
 después de la prueba

Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica

Se muestra el equipo usado para la determinación del LL. éste equipo fue desarrollado por Casagrande, quien trabajo para estandarizar las pruebas de los límites de Atterberg. En la práctica es difícil obtener el contenido exacto de humedad para la cual la ranura se va a cerrar exactamente a los 25 golpes, por lo que se realiza la prueba para diversos contenidos de humedad y se registra el número de golpes que se requieren para que cierre la ranura para cada contenido de humedad.

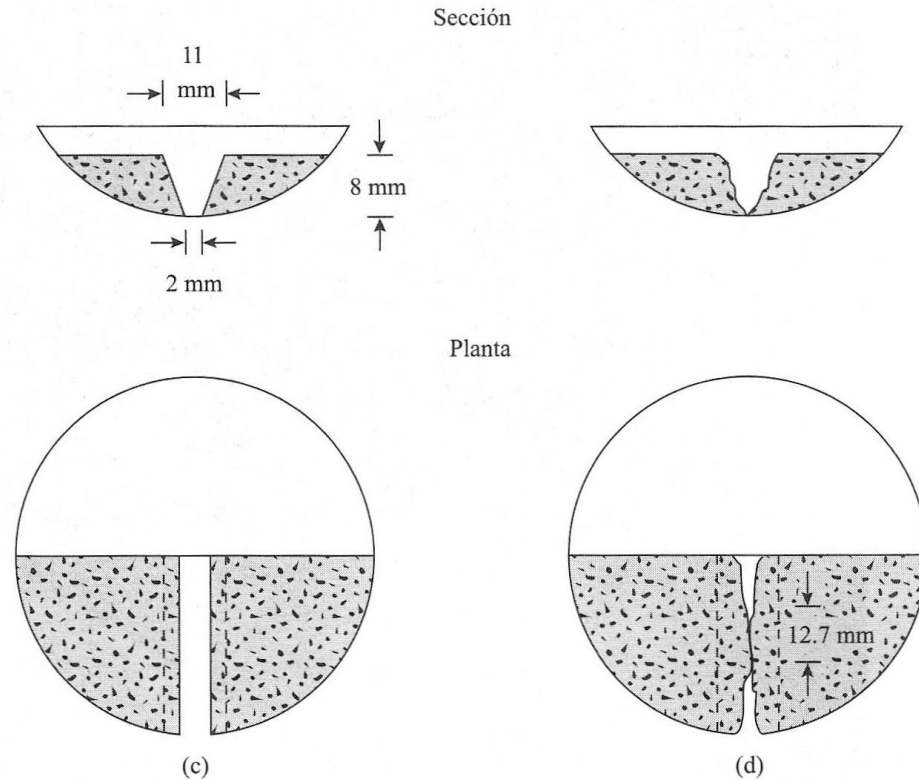


Figura II-5 (Continuación)

Entonces se traza una gráfica del contenido de humedad contra el logaritmo del número de golpes (generalmente una línea recta que se conoce como la curva de flujo). El contenido de humedad como ordenada que corresponde a la abscisa 25 golpes en la curva de flujo es el LL.

2.4.1.2.-Límite Plástico

El límite plástico, o LP, se define como el contenido de humedad para el cual el suelo se desmorona cuando se moldea con la forma de un cilindro de 3,2 milímetros de diámetro (Figura II-6). El contenido de humedad es mayor que el LP si el suelo puede moldearse hasta que adopte la forma de un cilindro con un diámetro menor que 3,2

milímetros, y el contenido de humedad es menor que el LP si el suelo se desmorona antes de poder moldarlos como un cilindro de 3,2 milímetros de diámetro.

El rango de contenido de humedad para el cual el suelo se encuentra en el estado plástico, es la diferencia entre el LL y el LP y se le conoce como el índice plástico IP

$$IP = LL - LP$$

Dónde

IP = Índice de Plasticidad

LL = Límite Líquido

LP = Límite Plástico

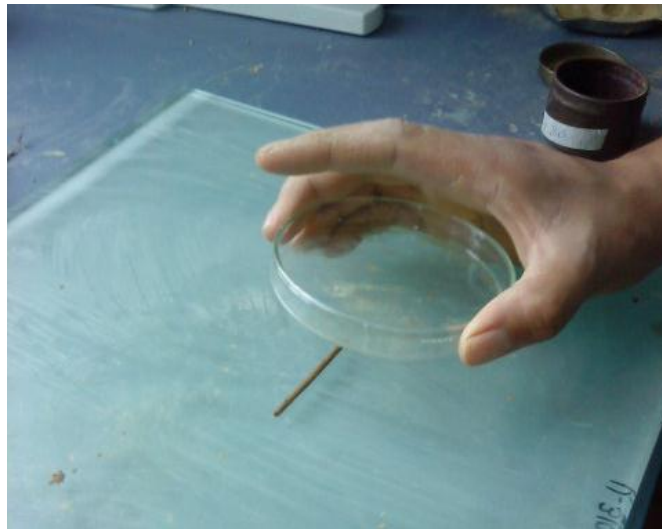


Figura II-6 Fuente: Fotografía

2.4.2.- Carta de Plasticidad

Los límites líquido y plástico son determinados por medio de pruebas de laboratorio relativamente simples que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos

cohesivos. Las pruebas son usadas ampliamente por ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo así como para la identificación del mismo.

Casagrande estudio la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido en una amplia variedad de suelos naturales. Con base en los resultados de pruebas, propuso una carta de plasticidad que muestra la Figura II-7. La característica importante de esta carta es la línea A empírica dada por la ecuación $IP = 0,73(LL - 20)$. La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Los puntos graficados de los índices de plasticidad contra límites líquidos para las arcillas inorgánicas se encuentran arriba de la línea A y aquellos para limos inorgánicos se hayan bajo la línea A. Los limos orgánicos se grafican en la misma región (debajo de la línea A y con el LL variando de 30 y 50) que los limos inorgánicos de compresibilidad media. Las arcillas orgánicas se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (debajo de la línea A y LL mayor a 50). La información proporcionada en la carta de plasticidad es de gran valor y es la base para la clasificación de los suelos de grano fino en el sistema unificado de clasificación de suelos.

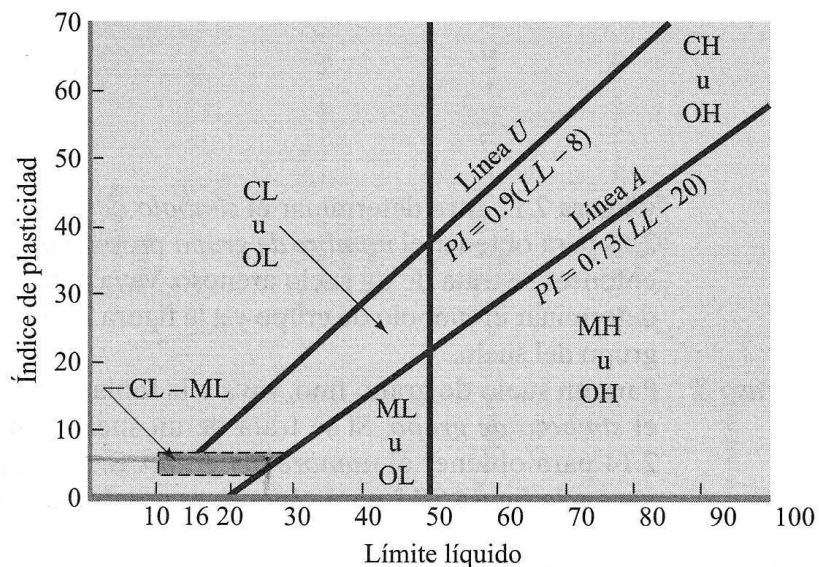


Figura II-7 (Carta de Plasticidad) **Fuente:** Braja M. Das Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica

2.5.- Clasificación de Suelos

Dada la gran variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, la mecánica de suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos. Cada uno de estos métodos tiene, prácticamente, su campo de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado. Es así que se tiene la clasificación de los suelos según: la clasificación de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (AASHTO), el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (S.U.C.S); estos dos sistemas de clasificación usan la distribución por tamaño de grano y la plasticidad de los suelos como elementos fundamentales para expresar de forma concisa las características generales de los suelos.

2.5.1.-Clasificación de suelos AASTHO

De acuerdo con este sistema de clasificación, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan la criba No.200. Los suelos de los que más del 35% pasan por la criba No.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

Los suelos A-1, A-2 y A-3 corresponden a los suelos granulares, con un máximo del 35% pasando por el tamiz 200. Se trata de gravas, arenas y zahorras (mezclas de grava y arenas) cuyo comportamiento a explanadas suele ser de bueno a excelente excepto con los suelos A-2-4 y A-2-7 que por su elevada plasticidad se comporta como los suelos arcillosos, siempre que el porcentaje de finos supere un 15%-20%. El grupo A-3 aparece antes que el A-2 por esa razón y no porque los suelos que los constituyen tengan mejores propiedades.

Los suelos A-4, A-5, A-6 y A-7 comprenden a los suelos limo-arcillosos con más de un 35% de material pasando por el tamiz N200. Para su clasificación se atiende

únicamente al límite líquido y al índice de plasticidad. El comportamiento de estos suelos en explanadas pueden calificarse en general de regular a malo.

Para la evaluación de la calidad de un suelo como material de subrasante de carreteras se incorpora también un número llamado índice de grupo (GI) junto con los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe en paréntesis después de la designación de grupo o subgrupo. El índice de grupo está dado por la ecuación.

$$GI = (F - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F - 15)(PI - 10)$$

Dónde: F= porcentaje que pasa la malla No200

LL= límite líquido

P = índice de plasticidad

El primer término de la ecuación, es decir, $(F-35) [0,2+0,005(LL-40)]$, es el índice de grupo parcial determinado a partir del límite líquido. El segundo término, es decir $0,01(F-15) (PI-10)$, es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad. A continuación se dan algunas reglas para determinar el índice de grupo:

Si la ecuación da un valor negativo para GI, este se toma igual a 0.

El índice de grupo calculado se redondea al número entero más cercano.

No hay un límite superior para el índice de grupo.

El índice de grupo de suelos que pertenecen a los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 siempre es 0.

Al calcular el índice de grupo para suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, use el índice de grupo parcial para PI, o

$$GI = 0,01(F - 15)(PI - 10)$$

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

Tabla II-3 Clasificación AASHTO de Materiales para Subrasantes de Carreteras**Fuente:** Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica.

Clasificación general	Materiales Granulares (35% o menos de la muestra que pasa la malla No. 200)						Materiales limo-arcilla (más del 35% de la muestra que pasa la malla No. 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que Pasa No.10 No.40 No. 200	50 max. 30 max. 15 max.	50 max. 25 max.	51 min. 10 max.	35 max.				36 min			
Características de la porción que pasa por el tamiz No. 40 Limite Líquido Índice de Plasticidad	6 max		NP	40 max. 10 max	41 min. 10 max.	40 max. 11 min.	41 min. 11 min.	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min
Componentes Significativos	Fragmento de piedra grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Tasa general de las Subrasantes	De excelente a bueno						De mediano a pobre				

Para: A-7-5, $PI \leq LL - 30$ A-7-6, $PI > LL - 30$

2.5.2.-Clasificación de suelos SUCS

La forma original de este sistema fue propuesto por Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida en el cuerpo de ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial. En cooperación con la Oficina de Restauración de Estados Unidos, el sistema fue revisado en 1952. Hoy en día, es ampliamente usado por los ingenieros (Prueba D-2487 de la ASTM). El sistema unificado de clasificación se presenta en las tablas; clasifica a los suelos en dos grandes categorías:

Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava o suelo bien gravoso y S significa arena o suelo arenoso.

Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos también son usados para la clasificación:

- W: bien graduado
- P: mal graduado
- L: baja plasticidad (límite líquido menor que 50)
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50)

Para una clasificación apropiada con este sistema, debe conocerse algo o todo de la información siguiente:

- Porcentaje de grava, es decir la fracción que pasa la malla 76,2 mm y es retenida en la malla No. 4 (abertura de 4,75mm).
- Porcentaje de arena, es decir, fracción que pasa la malla No. 4 (abertura de 4,75 mm)y es retenida en la malla No. 200 (abertura de 0,075 mm).

- Porcentaje de arcilla, es decir , la fracción de finos que pasan la malla No. 200 (abertura de 0,075 mm).
- Coeficiente de uniformidad (Cu) y coeficiente de curvatura (Cz).
- Limite líquido e índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla No. 40.

Tabla II-4 Sistema Unificado de Clasificación; Símbolos de Grupo para Suelos Tipo Grava

Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica.

Simbolo de grupo	Criterios
GW	Menos del 5% pasa la malla No. 200; Cu mayor o igual a 4; Cz entre 1 y 3.
GP	Menos del 5% pasa la malla No. 200; no cumple ambos criterios para GW.
GM	Mas de 12% pasa la malla No. 200; los limites de Atterberg se grafican debajo de linea A o el indice de plasticidad menor que 4
GC	Mas de 12% pasa la malla No. 200; los limites de Atterberg se grafican debajo de linea A ; indice de plasticidad mayor que 7
GC-GM	Mas de 12% pasa la malla No. 200; los limites de Atterberg caen en el area sombreada marcada CL-ML
GW-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 esta entre 5 y 12; cumple los criterios para GW Y GM
GW-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 esta entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GC
GP-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 esta entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GM
GP-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 esta entre 5 y 12; cumple los criterios para GP-GC

Tabla II-5 Sistema Unificado de Clasificación; Símbolo de Grupo Para Suelos Arenosos**Fuente:** Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica.

Simbolo de grupo	Criterios
SW	Menos del 5% pasa la malla No. 200; Cu mayor o igual a 6; Cz entre 1 y 3.
SP	Menos del 5% pasa la malla No. 200; no cumple ambos criterios para SW.
SM	Mas de 12% pasa la malla No. 200; los limites de Atterberg se grafican debajo de linea A o el indice de plasticidad menor que 4
SC	Mas de 12% pasa la malla No. 200; los limites de Atterberg se grafican arriba de linea A ; indice de plasticidad mayor que 7
SC-SM	Mas de 12% pasa la malla No. 200; los limites de Atterberg caen en el area sombreada marcada CL-ML
SW-SM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 esta entre 5 y 12; cumple los criterios para SW Y SM
SW-SC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 esta entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SC
SP-SM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 esta entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SM
SP-SC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 esta entre 5 y 12; cumple los criterios para SP-SC

Tabla II-6 Sistema Unificado de Clasificación; Símbolo de Grupo Para Suelos Arcillosos**Fuente:** Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica.

Simbolo de grupo	Criterios
CL	Inorganico; LL menor a 50, IP mayor a 7; se grafica sobre o arriba de la linea A
ML	Inorganico; LL menor a 50, IP menor a 4; se grafica sobre o arriba de la linea A
OL	Organico;(LL - seco en horno)/(LL - sin secar);menor a 0,75; LL menor que 50
CH	Inorganico; LL mayor o igual a 50; PI se grafica sobre o arriba de la linea A
MH	Inorganico; LL mayot o igual a 50,PI se grafica debajo de la linea A
OH	Organico;(LL - seco en horno)/(LL - sin secar);menor a 0,75; LL mayor o igual que 50
CL - ML	Inorganico; se grafica en la linea sombreada
Pt	Turba, lodos y otros suelos altamente organicos

2.6.- Compactación de los Suelos

En la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierra y muchas otras estructuras de ingeniería, los suelos deben ser compactados para incrementar sus pesos específicos. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellas. La compactación disminuye también la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes. Los rodillos de ruedas lisas, los rodillos patas de cabra, los rodillos con neumáticos de hule y los rodillos vibratorios son usados generalmente en el campo para la compactación de los suelos.

2.6.1.- Principios Generales

Para que la carretera ofrezca al usuario unas condiciones de rodadura adecuadas y de carácter permanente, debe ser construida de forma que alcance estabilidad volumétrica y resistencia frente a las acciones:

- Las cargas de tráfico.
- Peso propio del firme.
- El agua infiltrada provocada por la variación de la humedad a lo largo del tiempo.

Para lograr la estabilidad volumétrica se adopta de forma generalizada, debido a su reducido costo y gran efectividad, “la compactación”, que se constituye en un tratamiento eficaz que mejora los suelos para que resistan las solicitaciones indicadas anteriormente, con deformaciones permanentemente admisibles.

Cuando el suelo va a usarse como material de terraplén o de subrasante en la construcción de carreteras, es esencial que el material se coloque en capas uniformes y se compacte hasta una alta densidad. La compactación adecuada del suelo va a reducir hasta un mínimo el asentamiento y cambios volumétricos subsecuentes amplificando con ello la resistencia del terraplén o de la subrasante.

La resistencia del suelo compactado se relaciona directamente con la densidad máxima en seco que se alcanza mediante la compactación. La relación entre la densidad en seco y el contenido de humedad, para prácticamente todos los suelos, adopta la forma mostrada en la Figura II-8.

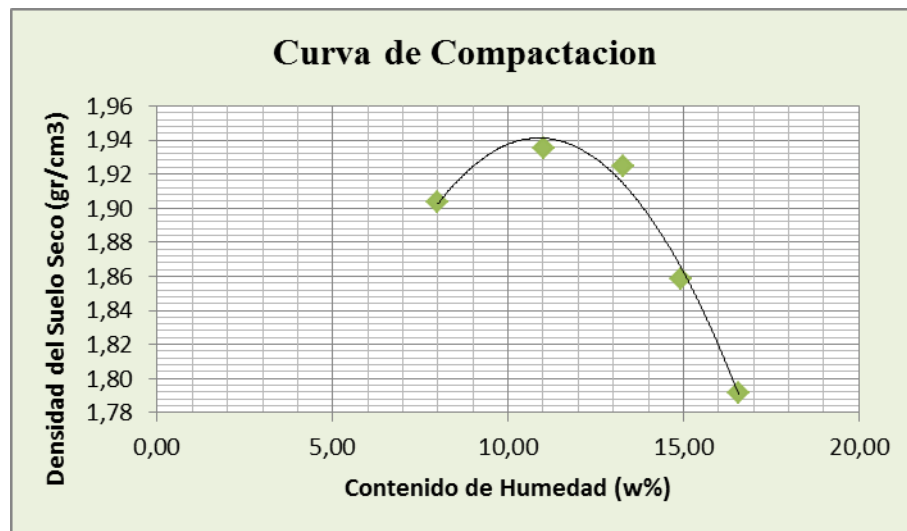


Figura II-8 Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica.

Puede verse en esta relación, que para un esfuerzo de compactación dado, la densidad en seco que se alcanza es baja para contenidos de humedad bajos. La densidad en seco aumenta hasta llegar a un contenido de humedad óptimo. Un incremento adicional del contenido de humedad conduce a una disminución de la densidad en seco alcanzada. Este fenómeno se debe al efecto de la humedad en las partículas de suelo. Para un contenido de humedad bajo, las partículas de suelo no están lubricadas, y la fricción entre partículas adyacentes evita la densificación de las partículas.

A medida que aumenta el contenido de humedad, se desarrolla una película de agua más grande sobre las partículas, haciendo que el suelo se haga más plástico y que sea más fácil para las partículas moverse y densificarse. Sin embargo, cuando se alcanza el contenido de humedad óptimo, se obtiene el máximo grado práctico de saturación.

El grado de saturación para el contenido de humedad óptimo no puede incrementarse con la compactación adicional debido a la presencia de aire atrapado en los espacios vacíos y alrededor de las partículas. Por lo que con la adición de mayor humedad resulta en que los vacíos se saturen con agua, sin que le acompañe una reducción del aire. Las partículas del suelo son separadas y se produce una reducción de la densidad en seco.

2.6.2.- Contenido de Humedad

La determinación del contenido de humedad óptimo de cualquier suelo, que se va usar como material para terraplén o subrasante, es necesario antes comenzar cualquier trabajo de campo. Actualmente la mayoría de las dependencias de carreteras úsan pruebas dinámicas o de impacto para determinar el contenido de humedad óptimo y la densidad en seco máxima. En cada una de estas pruebas, las muestras de suelo que van a ensayarse se compactan por capas hasta llenar un molde tamaño específico. El esfuerzo o energía de compactación se obtiene dejando caer un martillo, de peso y de dimensiones conocidos, desde una altura conocida, un número específico de veces para cada capa, el número de capas y el volumen del molde también son datos que se conocen.

$$E = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{numero de golpes} \\ \text{por capa} \end{array} \right) * \left(\begin{array}{c} \text{numero} \\ \text{de capas} \end{array} \right) * \left(\begin{array}{c} \text{peso} \\ \text{del} \\ \text{martillo} \end{array} \right) * \left(\begin{array}{c} \text{altura} \\ \text{caida} \\ \text{del martillo} \end{array} \right)}{\text{Volumen del molde}}$$

Dónde:

E = Energía de compactación por volumen unitario

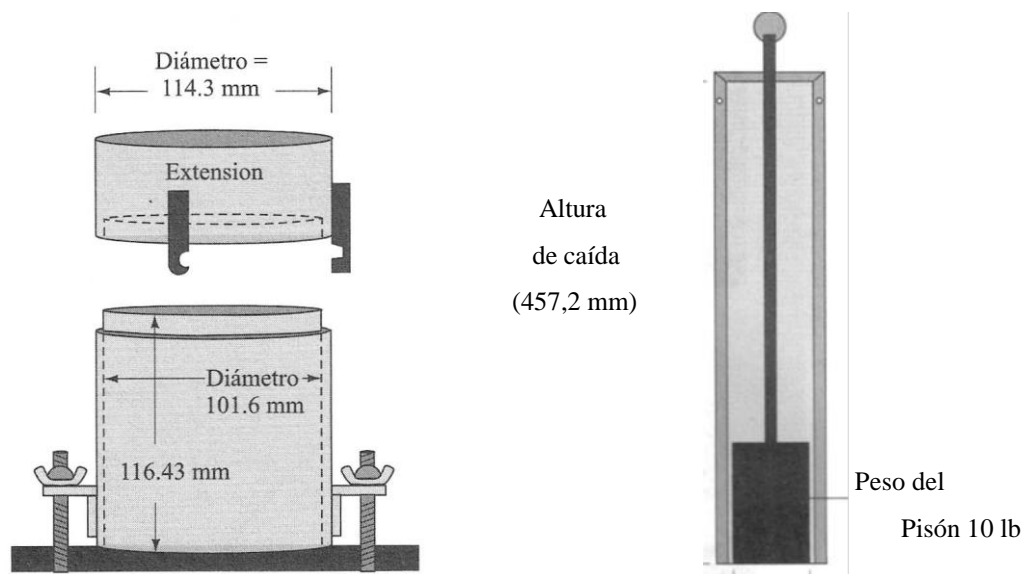
Entonces se obtiene el contenido de humedad del material compactado y se determina la densidad en seco a partir del peso medido del suelo compactado y del volumen conocido del molde. Luego el suelo es extraído o se obtiene otra muestra del mismo suelo. Posteriormente se aumenta el contenido de humedad y se repite la prueba. El

proceso se repite hasta que se observa la reducción de la densidad, generalmente se requiere un mínimo de cuatro o cinco ensayos individuales de compactación. Después se traza una gráfica de la densidad en seco contra el contenido de humedad óptimo. Los dos tipos de ensayos que se usan comúnmente son la prueba estándar AASHTO designada como T-99, y la prueba modificada AASHTO designada como T-180.

2.6.2.1.- Prueba de Proctor Modificado

Con el desarrollo de rodillos pesados de compactación, la prueba de Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones en campo. A esto se la llamo prueba de Proctor modificada (Prueba T-180 de AASHTO). Para llevar a cabo la prueba de Proctor modificada se usa el mismo molde con un volumen de 943 cm³, como en el caso de prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un pistón que pesa 10 libras. La caída del martillo es de 18 pulgadas (457,2 mm). El número de golpes del martillo por capa es de 25 como en el caso de la prueba Proctor estándar. En la Figura II-9. Se muestra el equipo de compactación utilizado en la prueba Proctor Modificada para el método “A” T-180 de la AASHTO

Figura II-9 Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica.



Debido a que con el cambio del martillo de compactación se incrementa la energía o esfuerzo e compactación por volumen unitario de suelo, la prueba Proctor modificada resulta en un incremento del peso específico seco máximo del suelo. El incremento del peso específico seco máximo es acompañado por un decremento del contenido de agua óptimo.

En lo anterior, las especificaciones dadas para las pruebas Proctor adoptadas por AASHTO respecto al volumen del molde (943,3 cm³) y el número de golpes (25 golpes por capa), son generalmente las adoptadas para los suelos grano fino que pasan la malla N. 4. Sin embargo bajo cada designación de prueba, tres métodos sugeridos diferentes reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de partículas en un suelo usado para la prueba. En la Tabla II-7. Se da un resumen de los resultados utilizados para la prueba del Proctor modificado.

Tabla II-7 Especificaciones para la prueba de Proctor T-180 de la AASHTO y D-1557 de la ASTM

Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica.

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del pisón	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de caída del pisón	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 kN-m/m ³	2696 kN-m/m ³	2696 kN-m/m ³
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No. 4 (4.57 mm). Se usa si 20% o menos por peso de material es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 9.5 mm. Se usa si el suelo retenido en la malla No. 4 es más del 20%, y 20% o menos por peso es retenido en la malla de 9.5 mm.	Porción que pasa la malla de 19 mm. Se usa si más de 20% por peso de material es retenido en la malla de 9.5 mm, y menos de 30% por peso es retenido en la malla de 19 mm.

2.7.- Capacidad de soporte de los Suelos

La superficie obtenida con las explanaciones sobre las que se apoya la estructura, se denomina explanada. Constituye el soporte directo del firme, por lo que debe tener una resistencia y una regularidad geométrica adecuadas en el proyecto de diseño del firme intervienen otros factores fundamentales el tráfico previsto de vehículos pesados y las características de resistencia del cimiento del firme, representadas generalmente por la capacidad de soporte de la explanada.

El comportamiento de un firme depende en gran medida de las características de los suelos sobre los que se apoya por otro lado, las capas del firme deben distribuir las cargas del tráfico a fin de que las presiones que lleguen a la explanada sean suficientemente reducidas para que no produzcan deformaciones permanentes que se reflejarían inevitablemente en la superficie de rodadura. Por esta razón la calidad del cimiento del firme influye directamente en las características y en los espesores de las capas firme, en consecuencia se conoce como capacidad de soporte del cimiento del firme a su resistencia a la deformación bajo las cargas de tráfico. Los factores principales que intervienen en esta capacidad de soporte son:

- La resistencia al esfuerzo cortante de los materiales que la constituyen, que depende a su vez de la densidad alcanzada y de su humedad puesta en obra.
- La humedad existente en cada momento. Los suelos saturados tienen una capacidad de soporte inferior a los suelos no saturados, por lo que en general a mayor humedad el suelo presenta una mayor capacidad de soporte.

Por lo tanto, la capacidad de soporte de un determinado tramo vial será variable en el espacio y en el tiempo debido a la variabilidad de los suelos existentes, su grado de compactación y su contenido de humedad.

La capacidad de soporte del cimiento, así considerada, se refiere a las máximas deformaciones que se pueden garantizar que serán resitidad por dicho cimiento. En consecuencia, el firme debe diseñarse de forma que las cargas de trafico transmitidas al cimiento no superen este valor (el cimiento cedería) ni sean sensiblemente

inferiores (el diseño no sería económico). En este proceso debe tenerse en cuenta que tanto la sollicitación como la respuesta de los materiales es de carácter dinámico y, en general, no lineal. Además, debe considerarse el efecto de la aplicación repetida de cargas (fatiga).

En carreteras suelen emplearse ensayos de C.B.R. (en laboratorio), aunque en esta prueba las deformaciones impuestas al suelo en este ensayo son generalmente muy superiores a las que pueden producir las cargas de tráfico, las magnitudes de las cargas aplicadas no son iguales a las del tráfico y su velocidad de aplicación es mucho más lenta (aunque no sean ensayos estáticos propiamente dichos), su utilidad reside en correlaciones empíricas con el comportamiento del cimiento de las obras viales y por ello su empleo es prácticamente universal.

2.7.1.- Evaluación en Laboratorio

El ensayo de C.B.R. (California Bearing Ratio) fue propuesto por Porter en 1928 y fue puesto en servicio por la división de carreteras del estado de California como parte de un método para el dimensionamiento de firmes flexibles, esta prueba es probablemente el ensayo utilizado en todo el mundo para estimar la capa de soporte de los suelos constitutivos de los cimientos firmes.

Se trata de un ensayo en el que el suelo se somete a la penetración de un vástago cilíndrico a una velocidad constante de 0,127 mm/min (0,05 pulg./min), anotando las cargas ejercidas cada 0,063 mm (0,025 pulg.) hasta llegar a 12,7 mm (0,5 pulg.)

El suelo se compacta con la humedad y energía de compactación obtenidos de laboratorio, colocando la muestra sobre una placa perforada y sobre cargándola con una presión (10 lb.) que representa el peso de las capas del firme que existan por encima del suelo que se ensaya, se sumerge en agua y en el proceso de saturación se mide, además, el eventual hinchamiento vertical que pueda experimentar el suelo a medida que se satura, leyendo al menos al principio y al final de la inmersión de cada uno de los cuatro días en el que el material está siendo sometido a saturación.

El resultado de esta prueba es el índice de C.B.R. que representa la capacidad de soporte del suelo comparado con la de una grava patrón, en porcentaje. El C.B.R. es pues, el porcentaje de la presión ejercida por un pistón sobre el cual con relación a la presión ejercida por una muestra tipo cuando este patrón es introducido en la muestra de suelo con una velocidad de penetración constante.

2.8.- Las arcillas

2.8.1.-Suelos expansivos

Las arcillas en el sentido mineralógico son cristales microscópicos con átomos dispuestos en planos.

Muchas arcillas se expanden considerablemente cuando se agrega agua y luego se contraen con la pérdida de las mismas. Bajo este principio, se puede establecer que un suelo expansivo es aquel que presenta un incremento en el volumen cuando se encuentra sometido a humedad y el cual tiende a su estado inicial cuando esta se pierde. Esto se debe principalmente a la capacidad de absorción que tiene este tipo de suelo. Los cambios generados se pueden ver reflejados durante la construcción y operación de cualquier tipo de estructura

2.8.2.-Características

Al realizar un análisis mineralógico y químico de este tipo de suelo, se puede establecer que está compuesto principalmente de minerales como la montmorillonita e illita entre otros, los cuales contienen en su estructura átomos de aluminio y silicio, que de acuerdo a la valencia que tienen se pueden combinar con los átomos de oxígeno, los cuales conforman una serie de cadenas que determinan las características de arcillas.

2.8.3.-Tipos de arcilla

Las principales arcillas son la caolinita, que presenta una baja capacidad de intercambio y dos capas de cationes, se llama arcilla 1/1(capa tetraédrica + capa octaédrica) la illita y la montmorillonita que son arcillas 2/1 con una capacidad de

intercambio media en la illita y alta en la montmorillonita (arcilla hinchable o expansiva)

Los minerales de arcilla producen caolinita si el clima es tropical drenado y en especial cuando el material parental es granito, illita si se da en clima seco y frio y montmorillonita que se asocia a bentonita si se da en suelos alcalinos pero mal drenados.

La caolinita es rica en sílice y aluminio, colores: blanco, amarillo, verde y pardo. Muestra una perfecta exfoliación, es apreciada para fabricar utensilios.

La illita. Está ligada por potasio, con sílice y aluminio; normalmente amarilla o roja, si tiene hierro, o blanca si es pura.

La montmorillonita. Presenta magnesio o aluminio hidratado entre láminas de silicio. Tiene en su estructura molecular o moléculas de agua; el parámetro n variable que le da su característica expansiva.

Para distinguir entre limos y arcillas debemos precisar que la cohesión entre las partículas de arcilla es mayor, tanto en el estado seco como húmedo. Un trozo de arcilla seco es duro y resistente, el de limo tiende a pulverizarse. Dentro de ciertos grados de humedad la arcilla es plástica, mientras el limo trata de agrietarse. Los granos de arcilla son más finos y se precipitan tardíamente en aguas tranquilas, siendo el tiempo de asentamiento para el material disperso en una vasija, de horas a días para la arcilla y de minutos u horas para los limos.

2.8.4.-Efecto de las arcillas en obras civiles

Para el desarrollo de cualquier clase de obra civil siempre se debe tener en cuenta el tipo de material sobre el cual se construirá debido a que las características de este material determinaran el diseño estructural necesario, además se deben analizar las condiciones ambientales que interviene en la zona del proyecto.

La presencia de arcilla en exceso en los proyectos hace que se presente condiciones desfavorables incrementando el valor de obra y haciendo más complejo el diseño.

Las arcillas al perder casi por completo su resistencia al estar en contacto con el agua, exigen un estricto control de los niveles freáticos del terreno, de lo contrario se podrían presentar problemas de estabilidad del suelo afectando las obras civiles de diversas maneras, como son los asentamientos diferenciales o disminuyendo la vida útil del proyecto.

Algunas soluciones a problemas ocasionados por los suelos expansivos. Debido a que se presenta una variación el comportamiento de los suelos en cuanto a su volumen, las estructuras se pueden ver afectadas debido principalmente a las fuerzas de levantamiento provocadas sobre la cimentación, haciendo que se presente desde una variación en el nivel de fundación hasta la falla misma.

Para contrarrestar los efectos provocados por este tipo de suelo se sugiere las siguientes soluciones:

Reemplazar una porción de suelo expansivo, por otro tipo de suelo, preferiblemente de tipo granular, con el fin de que el peso generado por el relleno no permita que se expanda al suelo restante.

Adecuación de estructuras con el fin de que no permita el paso del agua hacia el suelo de fundación.

Aplicación de aditivos que no permitan que se genere algún tipo de expansión cuyo procedimiento consta en tomar porción de suelo, el cual es remoldeado con alguna clase de aditivo y luego es adecuado sobre el terreno, de manera que este sea compactado.

La inestabilidad mostrada por estos suelos se debe a su estructura molecular, la que ocasiona una débil unión entre sus partículas minerales.

La afinidad que dichas arcillas tiene con el agua es la causa principal del hinchamiento o expansión que experimentan, con fuertes presiones de empuje y levantamiento cuando se saturan. Inversamente, se presentan altas contracciones y agrietamientos cuando se secan.

Generalmente, los suelos expansivos caen dentro de grupo de las arcillas finas de alta plasticidad (CH) y en menor proporción con las de baja plasticidad (CL).

2.9.-La Subrasante

2.9.1.-Definición y características

Es el suelo de fundación (suelo natural libre de vegetación y compactado) en el que se apoya todo el paquete estructural.

De la calidad de esta 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 expansivo, pueden ocasionar graves daños a las estructuras que se apoyan sobre este, 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 estos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, cemento, cal o con otros aditivos como en nuestro caso.

La capacidad de soporte de la subrasante en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de

rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de afirmado, que se colocara encima.

Identificaremos cinco tipos de Subrasante

S0: Subrasante muy pobre	CBR < 3%
S1: Subrasante pobre	CBR = 3%-5%
S2: Subrasante regular	CBR = 6%-10%
S3: Subrasante buena	CBR = 11%-19%
S4: Subrasante muy buena	CBR > 20%

Se consideran como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. En caso de ser menor, se procederá eliminar esa capa de material inadecuado y se colocara un material granular con CBR mayor a 6%; para su estabilización

2.9.2.- 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 compormiento 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 obligara a replantear la estrategia actuando directamente sobre el terreno existente para intentar mejorar sus cualidades.

A priori es difícil establecer que espesor marca la frontera entre ambos métodos, ya que existe gran cantidad de variables específicas para cada caso que inclinaran la balanza para una u otra solución.

Es conveniente realizar siempre en este tipo de suelos 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

2.9.3.-Estabilización de la subrasante

La subrasante puede estar conformada por el suelo natural pero cuando este no cumpla con los requerimientos. Se puede cambiar el suelo con otro con mejores propiedades o mejorar el mismo al estabilizarlo. La estabilización de un suelo es un proceso que tiene el objetivo aumentar su resistencia a la deformación, disminuir su sensibilidad al agua, controlar la erosión y los cambios de volumen, etc. Con ello se pueden aprovechar suelos mediocres e inadecuados inicialmente para su utilización en la subrasante.

La estabilización puede ser mecánica, por mezcla e suelos de diferentes características, a fin de obtener uno suelo con características suficientes en cuanto a plasticidad permeabilidad etc.

También se estabiliza el suelo incorporando aditivos que actúan física o químicamente sobre las propiedades del suelo, las más comunes son el cemento y la cal.

En los procesos de estabilización con aditivos, el grado de estabilización que puede alcanzarse depende fundamentalmente del tipo de suelo, del aditivo utilizado de la cantidad añadida y, muy especialmente, de la ejecución. Cuando se trata únicamente de mejorar ligeramente las propiedades de un suelo por adición de una pequeña cantidad de un aditivo, es usual hablar de “suelo mejorado con...”, en cambio, la mezcla que ofrece finalmente una resistencia y rigidez apreciables suele designarse como “suelo estabilizado con...”.

CAPÍTULO III

TIPOS DE ESTABILIZACIONES DE SUELOS – ESTABILIZACIÓN

CON-AID

3.1.- La estabilización de suelos

Es frecuente que el ingeniero civil encuentre no adecuados en algún sentido los suelos que ha de utilizar para un determinado fin, en un lugar específico. Este hecho abre obviamente tres posibilidades de decisión.

- Aceptar el material tal como lo encuentre, pero tomando en cuenta realísimamente su calidad en el diseño efectuado.
- Eliminar el material insatisfactorio o prescindir de usarlo, substituyéndolo por otro de características adecuadas.
- Modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos.

La última alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos. En rigor son muchos los procedimientos que pueden seguir para lograr esa mejoría de las propiedades de los suelos, con vistas a hacerlos apropiados para algún uso específico, lo que constituye la estabilización. La siguiente lista de tipos de procedimientos no agota seguramente el tema, aunque reúna los más comunes:

- Estabilización por medios mecánicos, de los que la compactación es el más conocido, pero entre los que las mezclas de suelos se utilizan también muy frecuentemente.
- Estabilización por drenaje.
- Estabilización por medios eléctricos, de los que la electroósmosis y la utilización de pilotes electrometálicos son probablemente los mejor conocidos.

- Estabilización por empleo de calor y calcinación.
- Estabilización por medios químicos, generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, el asfalto u otros.
- Estabilización química usando nuevas tecnologías, las cuales se basan en un intercambio de partículas.

Desde un principio tiene que reconocerse que la estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos y desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que tener claro que el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre los que se lograra mejorarlas y el esfuerzo y dinero que en ello haya de invertirse. Solo balanceando cuidadosamente estos factores podrá llegarse a un correcto empleo de la estabilización de suelos.

3.2.-Propiedades de los suelos que más se estudian en estabilización

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problema de estabilización son:

- Estabilidad volumétrica
- Resistencia
- Compresibilidad
- Durabilidad

Frecuentemente será posible utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente varias de esas propiedades, pero también debe estarse preparado a encontrar evoluciones contradictorias en la lista, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras. No debe verse a la estabilización solo como una medida correctiva; algunos de los mejores usos de estas técnicas representan más bien medidas preventivas contra condiciones adversas susceptibles de ulterior desarrollo. A continuación se insiste un poco sobre las propiedades de los suelos más susceptibles de ser mejoradas por estabilización.

3.2.1.-Estabilidad volumétrica

La expresión se refiere por lo general a los problemas relacionados con suelos expansivos por cambio de humedad, relacionado con variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para estos suelos, diferente del uso de carga, capas permeables, introducción de agua, etc., que forman la gama de líneas de acción más usual. Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva bien sea en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión. Esto se logra por tratamientos químicos o térmicos, la experiencia muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas.

3.2.2.-Resistencia

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos pero todos ellos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen importantes contenidos de materia orgánica, circunstancia desafortunada, dado que como es bien sabido muchos de los graves problemas de falta de resistencia ocurren precisamente en suelos orgánicos.

La compactación es de hecho una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos, como uno de sus objetivos más comunes, el empleo de mayores cantidades de compactación no siempre conduce a valores más altos de resistencia, muy especialmente si se considera la necesidad de mantener dicho parámetro en valores razonables durante tiempos largos. Algunas de las formas de estabilización más usadas para elevar resistencia son las siguientes.

- Compactación
- Vibroflotación

- Precarga
- Drenaje
- Estabilización mecánica con mezclas de otros suelos.
- Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos.

La estabilización con calor se ha utilizado también, aunque mucho más raramente.

3.2.3.-Permeabilidad

Es la capacidad que tiene un medio de transmitir agua (u otra sustancia); el medio es permeable cuando éste deja pasar a través de él una cantidad significativa de fluido, y es impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. El suelo se puede definir como permeable pues presenta poros; en este caso son los espacios vacíos que le permiten absorber el agua; a su vez estos espacios vacíos están interconectados de tal forma que dispone de caminos por los que el agua puede pasar fácilmente; si no ocurre esto, es decir, la cantidad de espacios vacíos es mínima; entonces el suelo será impermeable.

No suele ser muy difícil modificar substancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de defloculantes (por ejemplo, polifosfatos) puede reducir la permeabilidad también significativamente; el uso de floculantes (muchas veces hidróxido de cal o yeso) aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad.

3.2.4.-Compresibilidad

Es el grado en que la masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga. Esta propiedad afecta a otras como la permeabilidad; también altera la magnitud y el sentido de las fuerzas interpartículas; modificando la resistencia del suelo al esfuerzo cortante o pudiendo provocar deslizamientos

Si hablamos de los suelos de textura gruesa (gravas y arenas); la compresibilidad será mínima, pues sus partículas están en contacto. Nos centraremos en los suelos de

grano fino, las arcillas y limos; si se comprime una masa húmeda de estos suelos, se produce una reducción en su volumen, pues gran parte de la humedad y el aire presentes se eliminarán; la compresibilidad llega al máximo mientras mayor cantidad de materia orgánica esté presente.

La compresibilidad es aproximadamente proporcional al índice de plasticidad; mientras mayor es el índice plástico mayor es la compresibilidad del suelo.

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos; sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización mencionados anteriormente tienen influencia en dicho concepto.

3.2.5.-Durabilidad

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. En rigor, estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección del agente estabilizador o un serio error de uso; tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos.

3.3.-Tipos de estabilización

3.3.1.-Estabilización Mecánica

Como estabilización mecánica tenemos a la compactación y a la mezcla de suelos.

3.3.1.1.-Estabilización por Compactación: Se define como un método de mejoramiento de las propiedades de los suelos a partir de ejercer una acción mecánica

de corta duración de manera repetitiva sobre una masa de suelo parcialmente saturado, para ésta acción se utilizan equipos llamados compactadores, los cuales tienen como fin lograr aumentar la resistencia al corte.

Al compactar un suelo se obtiene:

- Mayor densidad, por lo que tendremos una mejor distribución de fuerzas que actúan sobre el suelo.
- Mayor estabilidad, pues al no compactar un suelo se tendrán asentamientos desiguales por lo tanto inestabilidad de la estructura.
- Disminución de la contracción del suelo, al existir espacios vacíos, provocando en suelos arcillosos la contracción y dilatación del suelo y por último ocasionará una disminución de los asentamientos.

Las especificaciones para la compactación en terreno exigen la obtención de una densidad mínima, que es un mínimo porcentaje de la densidad máxima que se obtiene en laboratorio. Es muy común exigir por lo menos el 95% del Proctor Modificado.

3.3.1.2.-Estabilización por mezcla de suelos: En la estabilización por mezcla de suelos, para lograr con ellas unas determinadas propiedades 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 producen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy segregables. La presencia de contenidos importantes de materiales finos, menores de la malla 40 hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además de que puede conducir a superficies demasiado lisas y fangosas cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas.

3.3.2.- Estabilización por medios eléctricos

La más conocida es la electroósmosis, que es la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico a una muestra de suelo fino con exceso de humedad, esto produce que el agua se traslade desde el ánodo (electrodo positivo) hasta el cátodo (electrodo negativo); el caudal que fluye a través de la muestra de suelo en las condiciones anteriormente expuestas es proporcional al potencial eléctrico exterior que haya sido aplicado. Con este método se ha observado un aumento de resistencia al corte y a la compresión simple de los suelos finos (arcillosos).

3.3.3.- Estabilización por calcinación o tratamiento térmico

Es de tipo térmico, se realiza a temperaturas elevadas, superiores a los 400 °C que calcinan el suelo. Esta técnica consiste en pasar gases a temperaturas cercanas a 1000°C por ductos o huecos dentro del suelo, la distribución de la temperatura depende de la porosidad del suelo y la temperatura de los gases inyectados.

A temperaturas tan altas ocurren cambios irreversibles en la estructura cristalina de los minerales de arcilla. Estas alteraciones se ven reflejadas en las propiedades físicas que obviamente sufrirán modificaciones sustanciales como el índice plástico, el cual tiende a disminuir de manera notoria; la capacidad de absorción del agua también varía al igual que la expansividad y la compresibilidad las cuales disminuirán.

Este tipo de estabilización no es económica para suelos saturados.

3.3.4.- Estabilización por drenaje

Consiste en un drenaje superficial y desagüe subterráneo. Se colocan sistemas de canalizaciones y tubos subterráneos que captan el agua y la sacan de la zona en que se sitúa la estructura; de tal manera que se pueda canalizar el agua proveniente de cualquier dirección a través de éstos canales y cunetas; alejándola de la zona de la obra. El fin es evitar impactos negativos de las aguas sobre la estabilidad, durabilidad y transitabilidad de la carretera.

3.3.5.- Estabilización química

Se usa por la adición de agentes estabilizantes químicos específicos; comúnmente se usa cemento, cal, asfalto, cemento portland, entre otros. Con esta tecnología de estabilización se busca generar una reacción química del suelo con el estabilizante para lograr la modificación de las características y propiedades del suelo; y así darle mayor capacidad de respuesta a los requerimientos de carga dinámica a los que estará sometido.

Los estabilizadores químicos pueden tener tres categorías:

- Para cubrir e impermeabilizar los granos del suelo o proveer de fuerza cohesiva.
- Para formar una adhesión cementante entre las partículas del suelo; proporcionándoles fuerza y durabilidad.
- Para suelos finos tipo arcillas; generarán una alteración en la naturaleza del sistema agua-arcilla, con la cual se tendrá como resultado una baja en la plasticidad; posibles cambio de volumen; hará que se formen uniones cementantes y por último se mejorará la resistencia aumentándola.

Las estabilizaciones químicas más comunes son:

3.3.5.1.-Estabilización de suelos con asfalto: El asfalto produce diferentes efectos dependiendo de los suelos con los que se trabaje: a) Para las arenas finas, sin cohesión alguna, el asfalto produce resistencia y actúa como un agente cementante, b) a los suelos gravosos les proporciona resistencia cohesiva e impermeabilidad, a esta mezcla se le deben agregar también partículas finas para llenar los vacíos.

3.3.5.2.-Estabilización de suelo-cemento: Aplicable para estabilizar suelos arcillosos de baja plasticidad, suelos arenosos y suelos granulares con el objetivo de aportarles mayor resistencia. El suelo/cemento es un material estructural; el cual es la unión de suelo convenientemente pulverizado más cemento portland normalmente se utiliza el cemento tipo I (ya que permite alcanzar mayor resistencia por su contenido

de aluminio tricálcico y sulfato de calcio), mezclado de manera íntima y homogénea y compactado a una densidad máxima con un contenido de humedad óptimo. Al hidratarse el cemento, la mezcla se convierte en un material de pavimento resistente y durable capaz de soportar las tensiones a las que se le someten por las cargas del tránsito y las acciones del clima. Contenidos de cemento mayores a los requeridos conllevarán a agrietamientos por contracción causados por los cambios de temperatura y variaciones de humedad.

Para que se pueda utilizar la mezcla suelo/cemento; los suelos estudiados deben tener un IP menor a 20 y un mínimo de 45% de material pasante de la malla N° 40.

3.3.5.3.-Estabilización de suelos con cal: Se le aplica a suelos arcillosos buscando reducir su plasticidad. Logra mejorar gradualmente la resistencia del suelo de un modo significativo pues baja el potencial cambio de volumen de estos suelos producidos por las variaciones de humedad, así reduce el índice de plasticidad.

Existen diferentes tratamientos que se le puede dar al suelo dependiendo de que tanto queramos mejorar las propiedades, así: una mínima cantidad de cal se utiliza para secar y modificar temporalmente los suelos; con éste tratamiento se obtiene como resultado una plataforma de trabajo para la construcción de caminos temporales.

Cuando queremos un tratamiento mucho más duradero, podemos recurrir a la estabilización permanente con cal, obteniendo como resultado una mejora estructural permanente del suelo. Podemos utilizar la cal en tres “tipos” distintos: cal viva (óxido de calcio - CaO ; se produce de la transformación química del carbonato de calcio - piedra caliza - CaCO_3 - en óxido de calcio), cal hidratada (hidróxido de calcio - Ca(OH)_2 ; se obtiene cuando la cal viva reacciona químicamente con el agua) o una lechada de cal (es la suspensión de cal hidratada en agua, que puede elaborarse a partir de cal hidratada o cal viva). La cal hidratada es la que reacciona con las partículas arcillosas y las transforma permanentemente en una fuerte matriz cementante.

Los suelos tratados con cal y sujetos a períodos de congelamiento y descongelamiento pueden presentar inconvenientes y problemas de durabilidad.

Los suelos que comúnmente se suelen estabilizar usando cal son los suelos clasificados como: CH, CL, MH, SM, SC, GC, con un índice de plasticidad mayor de 19 y con un porcentaje del 25% de finos que pasan la malla N° 200.

3.3.6.- Estabilización química de suelos empleando nuevas tecnologías

Como nuevas tecnologías tenemos tres tipos distintos de estabilización. Si leemos con detenimiento los tres se centran en la capacidad de intercambio de las partículas de los elementos.

3.3.6.2.-Estabilización con polímeros

Los polímeros son macromoléculas (resultado de la unión de un gran número de moléculas pequeñas de un mismo tipo o de diferentes tipos), generalmente orgánicas llamados monómeros; pueden estar formadas por más de un tipo de monómero, éstas se denominan homopolímeros o estar formados por más de un tipo de monómeros denominándose copolímeros. Las maneras de unión de las unidades estructurales de los polímeros tanto naturales como artificiales pueden ser en varias direcciones, así se pueden obtener polímeros lineales o en más de una dirección dando lugar a los polímeros reticulares tridimensionales.

Generalmente los polímeros a utilizar en las distintas industrias son los polímeros sintéticos, que son aquellos creados por el hombre. El uso de éstos en las carreteras tiene como fin de aumentar la estabilidad de los agregados y reducir la dispersión de las arcillas.

Muchos plásticos, cauchos y materiales fibrosos son polímeros sintéticos.

Los polímeros actúan como agentes catalíticos de intercambio iónico sobre la fracción activa de las arcillas reduciendo el potencial electrostático de las partículas,

quitándoles la capacidad para absorber agua. Con el objetivo que al final el suelo tenga una mayor capacidad de carga y una estabilización permanente.

Los polímeros se usan generalmente en carpetas asfálticas, para darles una mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

3.3.6.3.- Estabilización con enzimas orgánicas

Las enzimas son moléculas de naturaleza proteica que catalizan reacciones químicas hasta hacerlas instantáneas o casi instantáneas, son catalizadores altamente específicos. La especificidad de las enzimas es tan marcada que en general actúan exclusivamente sobre sustancias que tienen una configuración precisa

En la ingeniería de carreteras, las enzimas se utilizan para la estabilización de vías y carreteras muchas veces como aglutinante, así, la acción catalizadora de las enzimas incrementa el proceso humectante del agua y provoca la acción aglutinante sobre cierto tipo de materiales, disminuyendo la cantidad de vacíos.

Mejora las propiedades mecánicas y físicas de las diferentes capas de la estructura del pavimento (subrasante, subbase y base).

3.3.6.1.-Estabilización iónica

Aplicada a suelos finos. El principio básico es un fuerte intercambio iónico entre el agente estabilizador con las partículas de arcilla mineral, de esta forma se desplaza el agua de adsorción ocupando el espacio iónico vacante, así se bloquea la capacidad de adsorción de agua de las partículas activas del suelo responsables del hinchamiento y la pérdida de su capacidad soporte. Las partículas libres de las cargas electrostáticas que las mantenían separadas y del agua que las rodeaba se acercan y aglomeran pudiendo aumentar la capacidad de carga por fricción entre partículas y lograr una mayor densidad por compactación.

El resultado final óptimo debería consistir en una estabilización más permanente

3.4.- Tecnología de Estabilización Iónica CON-AID

CON-AID es un estabilizador químico (iónico) de suelos que mejora y amplía las prestaciones de los materiales locales en la construcción de caminos. Esta tecnología es aplicada desde 1978 en muchos países alrededor del mundo, para la estabilización permanente de suelos y controlar así los efectos perjudiciales del barro en épocas de lluvia, así como del polvo y de la erosión en épocas secas.

CON-AID es un compuesto líquido químico, reactivo al catión, que reduce la movilidad e intercambio iónico de las partículas y, simultáneamente, torna al material en hidrofóbico (repelente del agua).

La cabeza hidrofílica de la molécula *CON-AID* (encargada de desplazar el agua adsorbida), quedará permanentemente enlazada en la partícula de arcilla, mientras que la cola hidrofóbica estará orientada hacia fuera, dando como resultado un suelo menos sensible al agua y de óptima condición para el trabajo de compactación.

CON-AID permite que los ingenieros utilicen el material "in-situ" reduciendo los costos de construcción y eliminando la importación de materiales inadecuados que degradan el medio ambiente y reducen los bancos de arenas y otros materiales; Se reduce al mínimo la degradación ambiental.

CON-AID forma una capa aceitosa protectora, en la superficie del suelo y en las partículas de arcilla. Reduce la movilidad y el intercambio iónico haciendo que el material elimine el agua absorbida.

El resultado es un suelo estable, mucho menos sensible a la humedad, más manejable incrementando la compactación del suelo a través de la compactación que genera el flujo vehicular tiempo después de aplicado el producto.

Mejorar la compactación significa mejorar la capacidad de carga y reducir la penetración del agua a la estructura.

El efecto de *CON-AID* en los materiales de la arcilla es permanente.

Los caminos tratados con *CON-AID* cambiaron de superficies fangosas a caminos transitables.

CON-AID podrá ser utilizado en todos aquellos suelos comprendidos entre arcillas, arenas limosas y hasta algunas gravas con la adición de material cohesivo.

Ventajas de usar *CON-AID*:

- Mejora la maniobrabilidad de suelos.
- Incrementa la fuerza cohesiva del suelo.
- Aumenta la densidad.
- Reducción de polvo en los caminos sin pavimento.
- Reducción en los costos de mantenimiento.
- Reducción de los costos de construcción / reparación.
- Ahorro en la transportación de materiales ajenos al lugar.

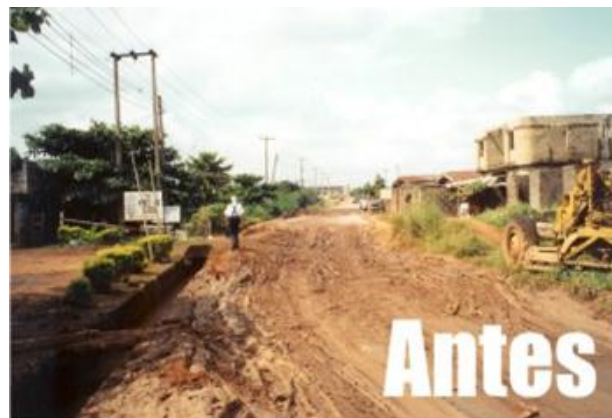


Figura III-1 Fuente: Internet

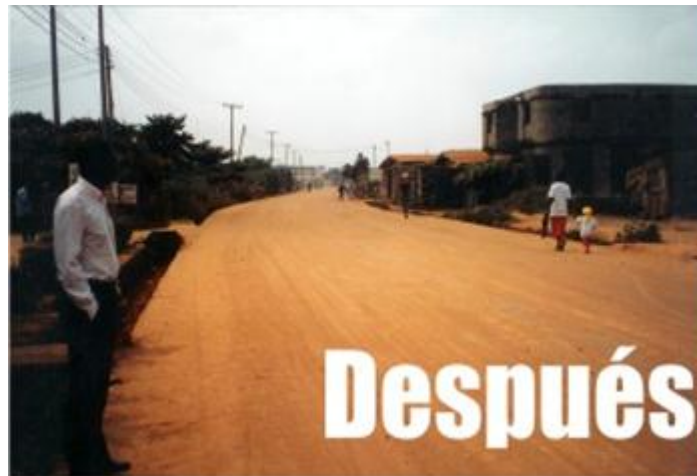


Figura III-1 (Continuación)

Naturaleza y características de *CON AID*; el estabilizador líquido del suelo.

Transforma las arcillas de naturaleza hidrofílica del suelo en arcillas de naturaleza hidrofóbica, haciendo un intercambio iónico con la partícula de arcilla, que repele las moléculas de agua absorbida permanentemente.

Genera cohesión entre partículas microscópicas que evitan que las partículas más pequeñas se desprendan (polvo).

CON-AID tiene las siguientes características físico-químicas.

- Totalmente soluble en agua sin residuos sólidos.
- No es inflamable.
- Anticorrosivo.
- No tóxico y seguro.
- Amistoso al medio ambiente y al usuario.
- Vida útil permanente.

3.4.1.- Reacción Química

CON AID fue desarrollado para asistir al ingeniero en:

- El retiro del agua absorbida para alcanzar una densidad máxima con menor esfuerzo mecánico.
- Para prevenir la re-absorción del agua, con lo que se obtiene un material de construcción permanentemente estabilizado.

La compactación se puede lograr fácilmente y de una forma económica con el uso de una variedad de componentes compactantes relativamente baratos, tales como el ácido sulfúrico diluido o sosa cáustica. El problema es que el material tratado así no será estabilizado permanentemente, y re-absorberá el agua (después de las primeras lluvias), de tal modo que causará fallas en el camino.

CON AID sin embargo, es una compleja formulación química de la cual uno de los ingredientes activos es el aditivo surfactado. La acción permanente de este aditivo surfactado dependerá de la presencia de otros compuestos activos que fortalecen el efecto de la dispersión del agua en materiales arcillosos, produciendo una asociación permanente entre *CON AID* y las partículas de arcilla.

Esta formulación de componentes activos hace que *CON AID* sea único en su constitución química, en su comportamiento y en los resultados finales, cuando es aplicada como un repelente al agua y una gran ayuda en la compactación de los caminos.

El aditivo surfactado (la Fig. IV-2) es un surfactante (agente activo superficial) y tiene esta característica debido a la dualidad de su constitución y comportamiento químico. La cabeza hidrofílica es totalmente soluble en agua e insoluble en la mayoría de los solventes orgánicos no polares. Esta parte de la molécula se disocia cuando el aditivo se dispersa en el agua y produce un SO_3 iónico - que se enlaza a través del átomo de sulfuro a la llamada " cola " de la molécula.

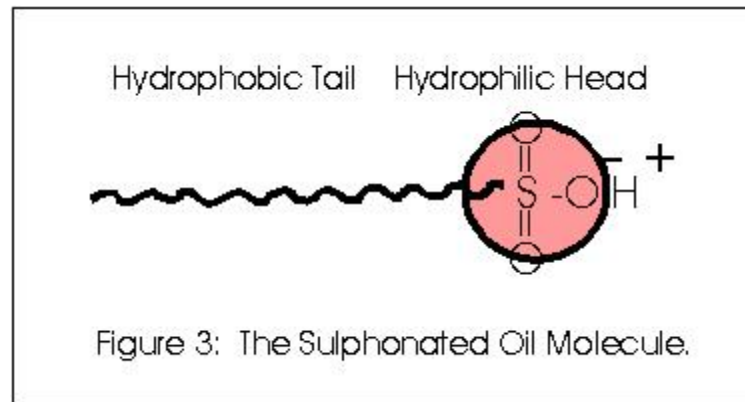


Figura III-2 Fuente: Internet

Esta cola consiste en un ensamblaje de los átomos del carbón y del hidrógeno y es totalmente insoluble en el agua, por ello se le refiere como la "cola hidrofóbica".

Es liofílico por naturaleza miscible con el aditivo y en los solventes no polares, debido a su carácter del hidrocarburo.

A pesar de la diferencia en la naturaleza de las dos partes de la molécula, es soluble en agua así como en solventes orgánicos. Este comportamiento dual del aditivo surfactado se utiliza como medio de dispersar el agua de los minerales arcillosos.

Los minerales de la arcilla consisten en capas con una variedad de iones libremente asociados en la superficie. En un ambiente acuoso, estos iones se mueven libremente en la hidrosfera de las partículas de la arcilla e intercambian posiciones al azar.

La mayoría de los iones están rodeados por un número de moléculas de agua y por lo tanto refuerzan la característica hidrofílica de la arcilla.

Las grandes cantidades de agua y la movilidad de cationes y aniones en un sistema de arcilla-agua, producen una plasticidad indeseada; es en primer lugar necesario reducir la movilidad de los iones en la solución y en segundo lugar liberar del sistema tanta agua como sea posible. *CON-AID* proporciona una solución química sencilla y económica a este problema.

El tratamiento del material con *CON-AID* proporciona al producto químico requerido, la reducción de la movilidad del ion y la repelencia de los minerales arcillosos al agua

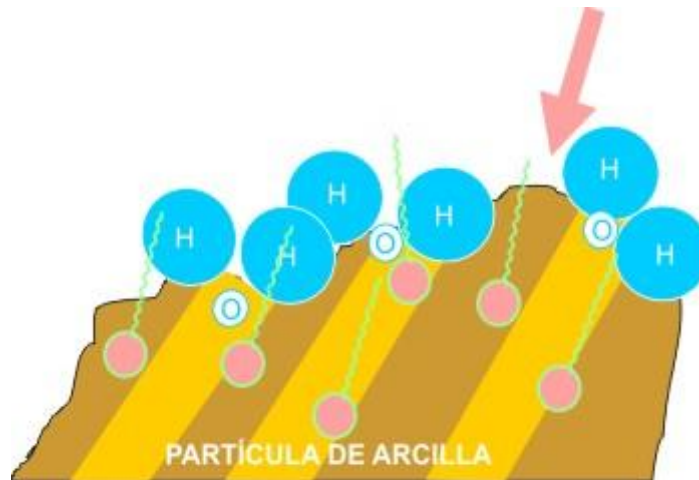


Figura III-3 Fuente: Internet

La cabeza hidrofílica de los aditivos surfactados crea enlaces químicos con las superficies de las partículas de arcilla, tanto en las superficies externas y planas (*Fig.IV-3*). Estos enlaces pueden ser de diversa naturaleza:

1. Formación de enlace químico directo entre la cabeza aniónica SO_3 del aditivo y un catión del metal en la superficie. Estos enlaces son relativamente fuertes. La formación inductiva del enlace entre un átomo de oxígeno del grupo SO_3 y un catión del metal.
2. La ocupación de un espacio iónico vacante en la superficie de la arcilla por el del aditivo surfactado.
3. La cabeza hidrofílica del aditivo se disuelve en una muy delgada capa de agua absorbida en la superficie del mineral arcilloso.

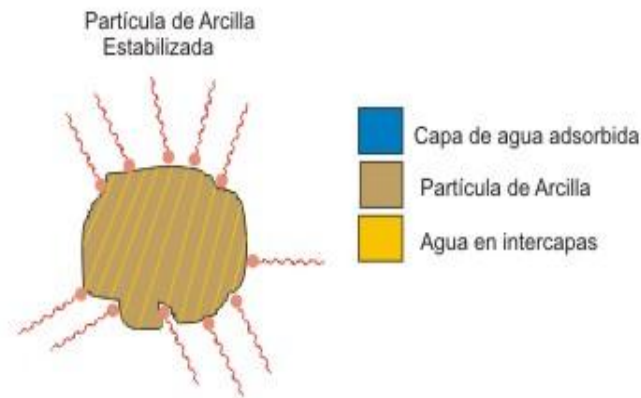


Figura III-4 Fuente: Internet

Estas interacciones entre el aditivo surfactado y los minerales arcillosos tienen los siguientes resultados:

1. Los cationes, que de otra manera habrían sido altamente móviles ahora están fijados en sus posiciones y prácticamente "sellados" por las moléculas del aditivo surfactado. Esto también evita que los iones formen complejos solventes con agua.
2. Una vez que las moléculas del aceite hayan formado sus asociaciones (de cualquier naturaleza) con la partícula de la arcilla, las colas hidrofóbicas se alejan de la superficie plana para formar una capa repelente alrededor de la arcilla y también en la superficie de la intercapa.
3. Naturalmente, el agua sería repelida por las colas hidrofóbicas hasta tal punto que no se requiere virtualmente ninguna presión mecánica para liberar el agua.

La compactación se puede ahora alcanzar con un mínimo de esfuerzo mecánico y las partículas de la arcilla se unen en una asociación muy cercana.

Esto da lugar a la cementación natural de las partículas de la arcilla que en presencia del agua serían imposibles. La densidad natural adquirida, así como las capas

hidrofóbicas que rodean partículas de la arcilla, previene la incorporación de pequeñas cantidades de agua en el sistema.

El resultado final del uso de *CON AID* se podría resumir así: La compactación y la estabilización permanente se obtiene con esfuerzo mecánico mínimo, produciendo una base en la cual las partículas sean cementadas simplemente por el contacto directo.

Los capilares existentes en el material compactado, tienen sus paredes internas cubiertas con una capa hidrofóbica y permiten la libre circulación del agua.

Esto significa que el agua podrá estar en el camino, sin ser absorbida por el material tratado *CON AID*. Con la evaporación natural, esta agua libre saldrá del sistema sin afectar la estabilidad del material.

3.4.2.-Proceso constructivo.-

3.4.2.1.-Sugerencia-Ensayos Previos.-

Los materiales deber ser clasificados de acuerdo a las normas *AASHTO*, realizando los análisis granulométricos, así como también los *Límites de Atterberg*. Con 400 gramos de suelo (pasante tamiz 40) con el fin de realizar los ensayos de aptitud y dosificación correspondiente. Si se tratara de una capa constitutiva de un paquete estructural de un pavimento se deberá realizar un ensayo de valor soporte.

El agua de dilución deberá poseer un PH menor o igual a 7.5.

Proceso de verificación:

- Verificar el estado de las obras de arte y desagües del camino o ruta
- Verificar el estado de la base de asiento de la capa estabilizada, en caso que ésta sea constituida con material de aporte.
- Proveer al camino de una pendiente transversal mínima del 3%

- Escarificar la capa a estabilizar (capas de 100 a 200 mm de espesor)
- Desmenuzar los terrenos de suelo grandes, y quitar las piedras mayores a 75 mm.

3.4.2.2.- Proceso de Estabilización

CON-AID Súper deberá ser adicionado al agua en el tanque regador. La dilución del producto en agua se determinará de acuerdo a la cantidad de agua necesaria para elevar el contenido de humedad del material a tratar hasta un 1 ó 2 % por encima del COH (cálculos en campo).

La solución agua / *CON-AID Súper* deberá ser aplicada uniformemente sobre todo el ancho del camino, mediante sucesivas pasadas del regador y equipo de mezclado, hasta completar la cantidad total de producto determinada para ese material.

Para suelos muy finos y de elevada plasticidad, es conveniente dejar en estado suelto y húmedo durante un plazo de 24 a 48 horas y recién luego proceder a compactar.

Carpeta de Rodamiento – Opcional

En suelos extremadamente finos para evitar una superficie resbaladiza en condiciones húmedas se aconseja el agregado de material granular fino o arena, sobre el material recientemente estabilizado, sin compactar y en un espesor aproximado de 20 mm, para ser mezclado con igual cantidad de suelo.

Compactación

El material tratado deberá ser compactado con el contenido óptimo de humedad o ligeramente sobre éste. Por lo general, el requerimiento mínimo exigido es del 95 % AASHTO modificado. La compactación final es aconsejable que sea realizada mediante rodillo neumático o liso.

Curado

Luego de la compactación la superficie deberá ser curado con riegos de agua limpia, para así evitar el secado violento de la misma. Si esto ocurriera se formaría una laminación superficial que impediría la evaporación de agua libre, generada por las reacciones químicas producidas por *CON-AID Súper*. Este procedimiento deberá continuarse por un período de 7 a 10 días.

Si la superficie estabilizada fuera a ser cubierta mediante un tratamiento superficial (tratamientos simples o dobles o carpetas asfálticas) podrán realizarse solamente cuando el contenido de humedad de la capa se hubiere reducido al 75 % del COH y las típicas grietas de curado del tipo “piel de cocodrilo” hayan aparecido en la superficie (entre los 7 días y las 8 semanas).

3.4.3.- *CON-AID* (especificaciones)

De acuerdo a la clasificación de suelos de la AASHTO, son apropiados los suelos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7, excluyendo los A-3 (arenas puras) y los suelos con alto contenido orgánico en sus estados naturales.

En suelos con alto contenido de partículas finas (limos y arcillas), se provee en general una carpeta de rodamiento constituida por algún tipo de árido, natural o triturado mecánicamente, el cual se distribuye uniformemente sobre la superficie del camino, para proveer rugosidad a la misma. Las cantidades que normalmente se utilizan van de los 20 a los 40 kg/m², dependiendo de consideraciones de tipo de suelo y volumen de tránsito.

Con respecto a las condiciones técnicas necesarias para la realización de una prueba de campo, las mismas son las siguientes:

Condiciones altimétricas y de drenaje

El camino a tratar deberá encontrarse en buena condición de niveles y perfiles y contar con adecuados canales laterales de drenaje, con continuidad de escurrimiento.

En caso de ser necesario se deberán rellenar bajos y sanear baches con suelo adecuado hasta lograr una rasante uniforme y adecuada. El perfil transversal deberá contar con pendientes de por lo menos 3 %.

Maquinarias necesarias

Una vez que la superficie a estabilizar se encuentre en las condiciones antedichas, las tareas a realizar son las siguientes:

1. Escarificado hasta la profundidad proyectada. Esta operación se realiza con motoniveladora de 140 HP ó más.
2. Desterronado. Se aconseja utilizar una rastra de discos vial excéntrica, con diámetro mínimo de discos de 0,50 m, propulsada por un tractor de 100 hp o más.
3. Aplicación del agente estabilizador CON-AID Súper, diluido en agua. Se requiere un camión o acoplado regador de agua de capacidad mínima de 6000 lt.
4. Mezclado con rastra de discos del material tratado.
5. Conformado con motoniveladora del material, previo a comenzar la compactación.
6. Compactación del material con equipo “Pata de Cabra”, para proporcionar una compactación profunda.
7. Perfilado con motoniveladora para dar pendientes transversales de proyecto.
8. Distribución del material pétreo de la carpeta de rodamiento. Puede realizarse con distintos tipos de equipamiento: Camiones volcadores, distribuidores de áridos, etc.
9. Sellado neumático de la carpeta de rodamiento. Se realiza regando primero agua sola en cantidad suficiente para humedecer profundamente la superficie y permitir la incrustación del árido y luego con rodillo neumático o camión.

Tiempo de construcción

De acuerdo a experiencias anteriores, se estima que con el equipamiento antedicho se pueden estabilizar alrededor de 500 metros lineales por 6 o 7 metros de ancho, es decir de 3.000 a 3.500 m² de caminos o calles por día.

Costos

Un litro de CON-AID tiene un precio estimado de 1540 Bs.

La presentación de este producto es de tambores de 50 litros.

Tiene un rendimiento de (Bs10 por m²)

Con 100 litros se estabilizan alrededor de 15500 metros cuadrados con un espesor de 15 cm.

Por su alta concentración los costos de transporte del producto son bajos.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1.-Caracterización de los Suelos en Estudio

4.1.1.- Selección de las Muestras

Antes del diseño y construcción de un proyecto de Ingeniería Vial se debe hacer un análisis de suelos completo del lugar seleccionado, esto mediante ensayos de laboratorios que nos permitan determinar sus características y propiedades, también se debe llegar a resultados razonables y coherentes para lo cual se debe realizar la extracción de muestras adecuadas.

Para este Proyecto de Grado las muestras fueron extraídas de diferentes sectores de nuestra ciudad.

- Parada el Norte (Asentamientos)
- Universidad U.A.J.M.S (Construcción de laboratorio de Hormigones)
- Zona el Portillo (Mercado el Sur)

Parada el Norte y Zona el Portillo: las muestras fueron extraídas de los costados del camino y no de la calzada pues el suelo ya estaba tratado y mezclado.

En el caso de la muestra extraída de la universidad se obtuvo de uno de los pozos explotados para la construcción del laboratorio de Hormigones.

Todas estas muestras fueron escogidas por sus características limo-arcillosas, la razón para la elección de este tipo de suelos fue la facilidad para cambiar su contenido de humedad lo que afecta en su cambio volumétrico y en su capacidad de soporte, mientras que los suelos granulares no son afectados por estas dificultades.

Otra razón importante para la elección de este tipo de suelo es que el aditivo en cuestión actúa solamente en los suelos cohesivos, no teniendo ningún efecto en los suelos sin plasticidad.

4.1.2.- Ubicación de las muestras

Para el presente proyecto “Comparación del uso del aditivo iónico CON-AID en distintos tipos de suelos” previamente se exploró y clasifico suelos de distintas zonas de nuestra ciudad, para así poder llegar a tener tres suelos con propiedades distintas unos de otros.

Los tres bancos de recolección se encuentran en la ciudad de Tarija capital de la provincia Cercado ubicado en el departamento de Tarija, las zonas en estudio son “Zona Parada el Norte”, “Zona el Tejar” y “Zona el Portillo”.

“Zona Parada el Norte”



Figura IV-1

Fuente: Fotografía

“Zona el Portillo”



Figura IV-2

Fuente: Fotografía

“Zona el Tejar”



Figura IV-3

Fuente: Fotografía

4.1.3.-Obtención de las Muestras

Se realizó una extracción representativa para poder determinar de una forma efectiva las propiedades de los suelos en estudio.

Para la extracción del material se utilizó una pala una picota y bolsas de yute.

Se quitó el material seco y suelto de la superficie para obtener una material fresco, se excavo de una manera uniforme desde la parte superior hasta el fondo, por último se depositó el material en las bolsas de yute para posteriormente etiquetarlas y llevarlas al laboratorio de suelos.

4.1.4.- Denominación de las muestras

Se denominara a las muestras de la siguiente manera

- Muestra Parada el Norte = Muestra A
- Muestra Universidad = Muestra B
- Muestra el Portillo = Muestra C

Extracción de las Muestras

Parada el Norte (Asentamiento)



Zona el Portillo (Mercado el Sur)



Figura IV- 4

Figura IV-5



Muestras en Laboratorio **Figura IV-6**

Fuente: Fotografía

4.1.5.- Resumen de Resultados Suelos Naturales

Se obtuvo los siguientes resultados para la clasificación de suelos

Muestra	Granulometria				Límites			Clasificación	
	N. 4	N. 10	N. 40	N. 200	LL	LP	IP	S.U.C.S	AASHTO
A	100	99,28	98,48	78,77	28,05	20,61	7,44	A-4(5)	CL
B	100	97,54	94,05	90,35	39,3	20,61	18,69	A-6(17)	CL
C	100	98,74	98,56	98,19	60,86	29,15	31,71	A-7-5(37)	CH

Tabla IV-1 Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la tabla de clasificación de suelos las muestras presentan características diferentes donde la muestra A tiene una plasticidad baja, la B una plasticidad media y la C una plasticidad alta.

Muestra	Clasificación y Descripción		
	S.U.C.S	AASHTO	Descripción
A	CL	A-4(5)	Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad
B	CL	A-6(17)	Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad
C	CH	A-7-5(37)	Arcillas inorgánicas muy plásticas

Tabla IV-2 Fuente: Elaboración Propia

Muestra	Peso Específico Relativo	Hidrometro		Compactación		CBR		Expansiones %
		Arcilla	Limo	D. max	CHO	100%	95%	
		%		g/cm ³	%			
A	2,73	12,86	87,14	1,95	10,99	5,83	4,75	1,61
B	2,56	18,22	81,78	1,75	13,42	4,28	3,75	3,07
C	2,59	37,63	62,27	1,72	11,91	3,58	2,98	3,03

Tabla IV-3 Fuente: Elaboración Propia

En la tabla podemos observar el contenido de arcilla de las muestras además de sus densidades máximas y sus humedades óptimas, también podemos ver que sus capacidades de soporte son muy bajas y sus expansiones son considerables.

4.2.-Estabilización de las muestras

4.2.1.-Proceso de estabilización

Una vez obtenidos los suelos deseados para poder combinarlos con el aditivo CON-AID se procedió a iniciar la estabilización.

El aditivo será utilizado en tres porcentajes distintos para cada uno de los suelos al 2,0 al 2,5 y al 3,5 ml.

Se explicara a continuación el proceso de estabilización.

- Se midió la cantidad del aditivo CON-AID (2; 2,5 o 3,5 ml), para luego mezclarlo con un litro de agua y así crear la solución estabilizante.



Figura IV-7

Fuente: Fotografía



Figura IV-8

Fuente: Fotografía

- Con el material previamente tamizado por el tamiz N. 4 y con su humedad optima respectiva se le agrega 10cm³ de la solución estabilizante por cada Kilogramo de suelo a estabilizar.



Figura IV-9 Fuente: Fotografía

- Luego se guarda el material en bolsas plásticas por 3 días para su homogenización, pasado este periodo se saca el material para la humectación hasta llegar nuevamente a la humedad óptima correspondiente a cada suelo.
- Ya teniendo el suelo aditivado se procede a hacer los moldes de cbr con el procedimiento normal teniendo que dejar los moldes 96 horas en saturación.
- Pasado este tiempo se rompen los cbr y con las muestras sobrantes se practica los límites de consistencia.



Figura IV-10 Fuente: Fotografía

- Para la compactación simplemente se aumentó un porcentaje de aditivo para cada punto de humedad.

4.2.2.-Denominacion de las muestras

Se denominará a las muestras de la siguiente manera:

- Muestra Parada el Norte (Suelo A-4) = Muestra A
- Muestra A al 2,0 de aditivo= Muestra A 2,0
- Muestra A al 2,5 de aditivo= Muestra A 2,5
- Muestra A al 3,5 de aditivo= Muestra A 3,5
- Muestra U.A.J.M.S (Suelo A-6) = Muestra B
- Muestra B al 2,0 de aditivo= Muestra B 2,0
- Muestra B al 2,5 de aditivo= Muestra B 2,5
- Muestra B al 3,5 de aditivo= Muestra B 3,5
- Muestra el Portillo (Suelo A-7) = Muestra C
- Muestra C al 2,0 de aditivo= Muestra C 2,0
- Muestra C al 2,5 de aditivo= Muestra C 2,5
- Muestra C al 3,5 de aditivo= Muestra C 3,5

4.2.3.-Resumen de Resultados (Estabilizados)

Se realizó dos C.B.R. para cada muestra en su estado natural y con cada porcentaje de estabilización, se detalla en la siguiente tabla los resultados obtenidos:

Muestra	Primer Punto C.B.R		Segundo Punto C.B.R		Promedio	
	100%	95%	100%	95%	100%	95%
A	5,68	4,77	5,89	4,65	5,79	4,71
A 2,0	7,67	6,31	7,77	6,17	7,72	6,24
A 2,5	10,4	8,53	10,7	8,43	10,55	8,48
A 3,5	9,74	7,62	9,87	7,7	9,81	7,66
B	4,16	3,66	4,38	3,81	4,27	3,74
B 2,0	6,17	4,71	6,66	5,22	6,42	4,97
B 2,5	10,7	6,32	11,08	7,44	10,89	6,88
B 3,5	9,38	6,02	10,26	6,46	9,82	6,24
C	3,46	2,93	3,7	3,05	3,58	2,99
C 2,0	5,69	4,46	5,85	4,55	5,77	4,51
C 2,5	7,71	5,26	7,9	5,75	7,81	5,51
C 3,5	12,09	8,35	12,16	8,72	12,13	8,54

Tabla IV-4 Fuente: Elaboración Propia

Se realizó dos puntos de C.B.R para cada suelo para tener mejor confiabilidad de los mismos, se sacó un promedio que se utilizara como un resultado final.

Se presenta un cuadro para la clasificación de cada muestra

MUESTRA	GRANULOMETRIA				LIMITES			CLASIFICACION	
	N. 4	N. 10	N. 40	N. 200	LL	LP	IP	S.U.C.S.	AASHTO
A	100	99,28	98,48	85,17	28,05	20,61	7,44	CL	A-4(5)
A 2,0	100	99,28	98,48	85,17	28,11	21,28	6,83	ML	A-4(5)
A 2,5	100	99,28	98,48	85,17	26,46	21,06	5,40	ML	A-4(3)
A 3,5	100	99,28	98,48	85,17	27,78	21,45	6,32	ML	A-4(4)
B	100	97,54	94,05	90,35	39,30	20,61	18,69	CL	A-6(17)
B 2,0	100	97,54	94,05	90,35	37,86	22,12	15,74	CL	A-6(15)
B 2,5	100	97,54	94,05	90,35	36,77	22,70	14,07	CL	A-6(13)
B 3,5	100	97,54	94,05	90,35	37,40	22,28	15,12	CL	A-6(14)
C	100	98,74	98,56	98,19	60,86	29,15	31,71	CH	A-7-5(37)
C 2,0	100	98,74	98,56	98,19	54,36	30,52	23,84	MH	A-7-5(29)
C 2,5	100	98,74	98,56	98,19	51,71	31,12	20,59	MH	A-7-5(25)
C 3,5	100	98,74	98,56	98,19	50,82	31,10	19,72	MH	A-7-5(24)

Tabla IV-5 Fuente: Elaboración Propia

Con los suelos clasificados describimos las características de cada uno de ellos

MUESTRA	CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN		
	S.U.C.S.	AASHTO	DESCRIPCIÓN
A	CL	A-4(5)	Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad
A 2,0	ML	A-4(5)	Limos inorgánicos, arenosos o arcillosos ligeramente plásticos
A 2,5	ML	A-4(3)	Limos inorgánicos, arenosos o arcillosos ligeramente plásticos
A 3,5	ML	A-4(4)	Limos inorgánicos, arenosos o arcillosos ligeramente plásticos
B	CL	A-6(17)	Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad
B 2,0	CL	A-6(15)	Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad
B 2,5	CL	A-6(13)	Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad
B 3,5	CL	A-6(14)	Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad
C	CH	A-7-5(37)	Arcillas inorgánicas muy plásticas
C 2,0	MH	A-7-5(29)	Limos inorgánicos, micáceos o diatomáceos; limos elásticos
C 2,5	MH	A-7-5(25)	Limos inorgánicos, micáceos o diatomáceos; limos elásticos
C 3,5	MH	A-7-5(24)	Limos inorgánicos, micáceos o diatomáceos; limos elásticos

Tabla IV-6 Fuente: Elaboración Propia

Presentamos las características mecánicas de las diferentes muestras

Muestra	Peso		Hidrómetro		Compactación		C.B.R.		Expansión
	Específico		Arcilla	Limo	D. max	CHO	100	95	%
	Relativo		%		gr/cm ³	%	%		
A	2,72		10,95	74,22	1,95	10,99	5,79	4,71	1,61
A 2,0	2,72		10,95	74,22	1,96	11,16	7,72	6,24	1,55
A 2,5	2,72		8,27	76,90	1,98	10,52	10,55	8,48	0,6
A 3,5	2,72		10,95	74,22	1,97	11,09	9,81	7,66	0,64
B	2,56		16,46	73,89	1,75	13,42	4,27	3,74	3,03
B 2,0	2,56		16,46	73,89	1,78	13,92	6,42	4,97	1,54
B 2,5	2,56		13,54	76,81	1,8	12,69	10,89	6,88	1,23
B 3,5	2,56		16,46	73,89	1,79	13,28	9,82	6,24	1,2
C	2,59		37,05	61,15	1,72	11,91	3,58	2,99	3,07
C 2,0	2,59		37,05	61,15	1,73	12,6	5,77	4,51	2,09
C 2,5	2,59		37,05	61,15	1,75	11,61	7,81	5,51	1,57
C 3,5	2,59		29,47	68,72	1,79	11,39	12,13	8,54	0,87

Tabla IV-7 Fuente: Elaboración Propia

En el cuadro observamos que en valores de hidrómetro para las muestras estabilizadas solo se realizó este ensayo para el contenido idóneo de aditivo pues con la estabilización no buscamos una reducción o aumento en las partículas del suelo.

Se muestra la influencia del aditivo CON-AID en los ensayos de compactación y CBR.

Se analizará los resultados obtenidos en el siguiente subtítulo.

4.3.-Análisis de Resultados

Analizaremos el comportamiento del suelo con la adición del aditivo a los distintos porcentajes que se utilizó. Se analizarán la prueba del Hidrómetro, los Límites de Consistencia, Compactación y C.B.R.

4.3.1. Hidrómetro

Las pruebas de Hidrómetro fueron realizadas solamente para el punto idóneo de aditivo en cada suelo. El resumen de resultados se detalla en los anteriores cuadros y representamos con una gráfica los resultados de los mismos.

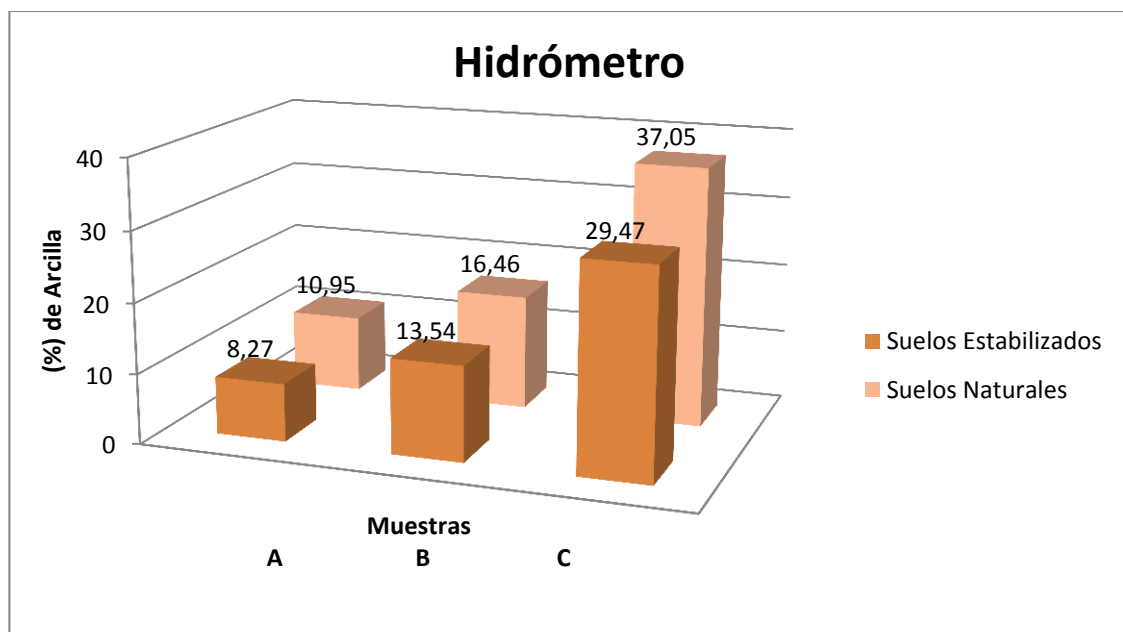


Figura IV-11 Influencia del contenido de CON-AID en el contenido de arcilla en el suelo (A-4)

Fuente: Elaboración Propia

Observamos en la gráfica una reducción en el porcentaje de arcilla al agregar el aditivo al suelo.

Esta reducción en el contenido de arcilla de cada suelo se ve reflejada en la disminución de la plasticidad del suelo.

4.3.2.-Límites de Consistencia

Las pruebas de límites de consistencia estabilizados fueron realizadas para cada punto de aditivo. El resumen de resultados se detalla en los anteriores cuadros y representamos en una gráfica para cada suelo, la humedad versus % de aditivo.

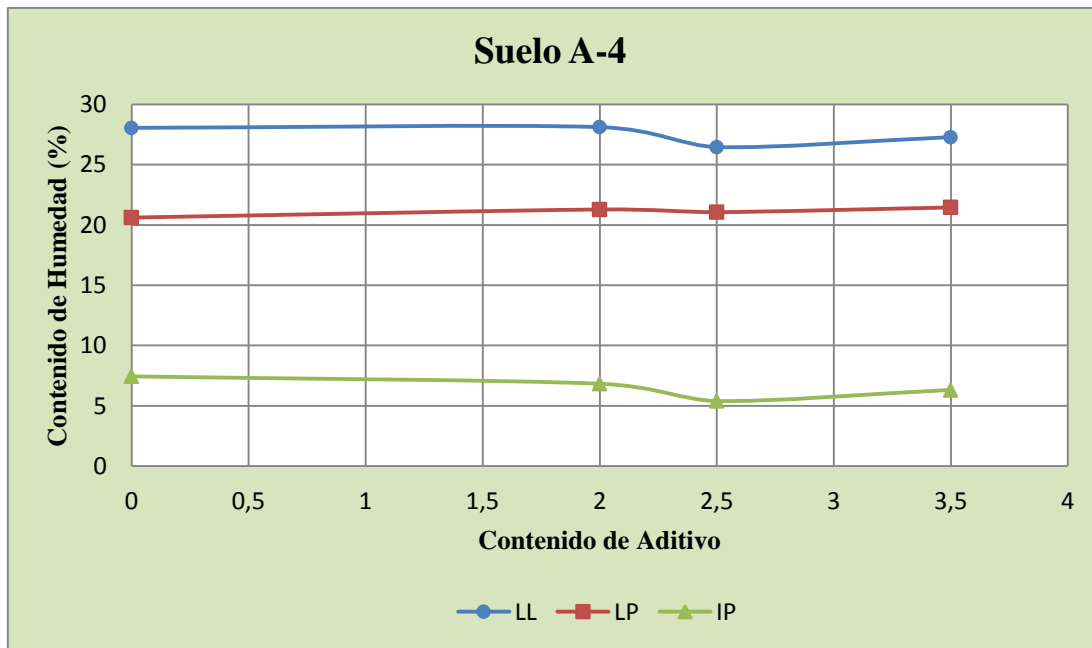


Figura IV-12 Influencia del contenido de CON-AID en los límites de consistencia del suelo (A-4)

Fuente: Elaboración Propia

El comportamiento de las curvas que aparecen en la Figura IV-12, establecen una reducción en el límite líquido e índice de plasticidad, en cuanto al límite plástico observamos que se mantiene en sus valores iniciales.

Los valores del límite líquido cambian más notablemente en el contenido de 2,5 de aditivo pues al valor de 3,5 los cambios son menores.

La reducción del límite líquido es pequeña debido al bajo contenido de arcilla en este tipo de suelo (Suelo A-4).

Como consecuencia de la alteración del límite líquido, el índice plástico del suelo decrece de manera proporcional a la reducción del límite líquido. Es decir que

también al valor de 2,5 de aditivo el índice de plasticidad alcanza su valor más bajo de 5,4.

En resumen observamos que en los ensayos de límites para el suelo A-4 la cantidad de aditivo idóneo es de 2,5.

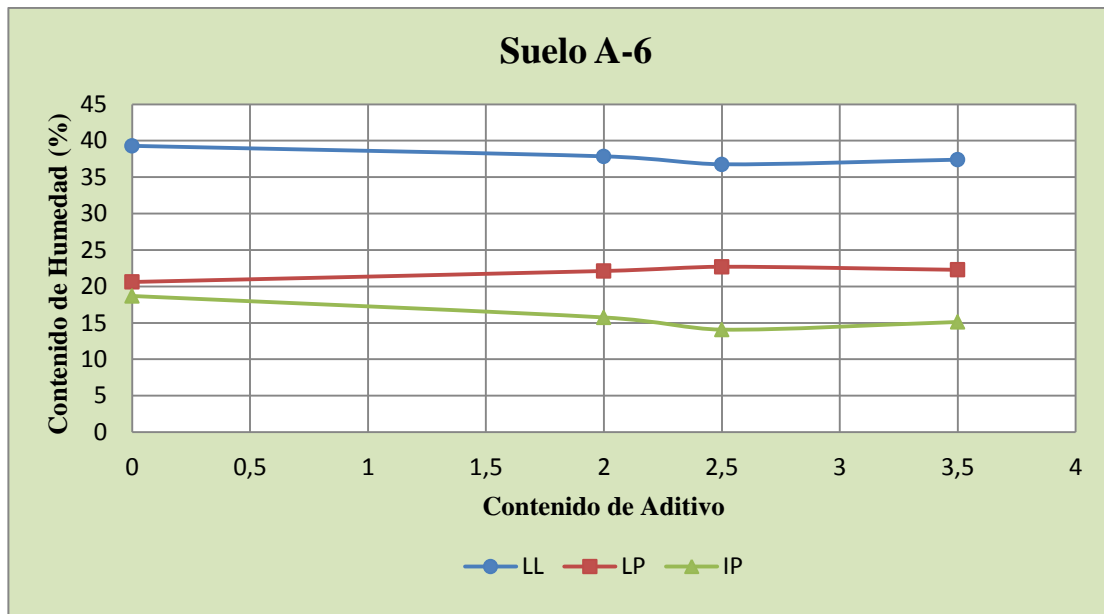


Figura IV-13 Influencia del contenido de CON-AID en los límites de consistencia del suelo (A-6)

Fuente: Elaboración Propia

El comportamiento de las curvas en los límites del suelo A-6 son similares a las del suelo A-4, con una reducción en el límite líquido e índice de plasticidad, y sin cambios significativos en el límite plástico.

Los valores del límite líquido cambian más notablemente en el contenido de 2,5 de aditivo pues al valor de 3,5 los valores se mantienen iguales.

Debido al mayor porcentaje de arcilla en el suelo A-6 la reducción del límite líquido es mayor que la del suelo A-4.

Al igual que en el suelo A-4 la alteración del índice plástico del suelo decrece de manera proporcional a la reducción del límite líquido. Es decir que también al valor de 2,5 de aditivo el índice de plasticidad alcanza su valor más bajo de 14,07.

En resumen observamos que en los ensayos de límites para el suelo A-6 la cantidad de aditivo idóneo es de 2,5.

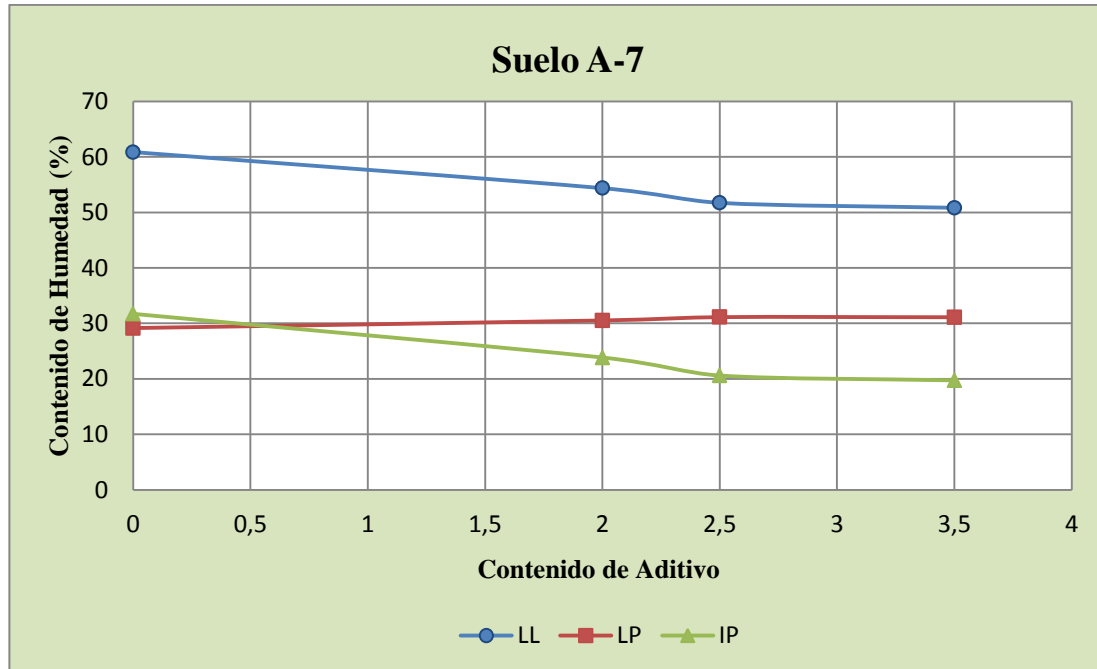


Figura IV-14 Influencia del contenido de CON-AID en los límites de consistencia del suelo (A-7)

Fuente: Elaboración Propia

El comportamiento de las curvas en los límites del suelo A-7, tienen una reducción en el límite líquido e índice de plasticidad, y no tienen cambios para el límite plástico.

Los valores del límite líquido van reduciéndose gradualmente hasta valor máximo de aditivo que es el de 3,5. Se nota una marcada diferencia con los suelos A-4 y A-6 pues la reducción máxima del límite líquido en estos suelos se presentó al 2,5 de aditivo.

Debido al mayor porcentaje de arcilla en el suelo A-7 se notó una gran reducción en el límite líquido mayor a la de los suelos A-4 y A-6.

La reducción del Índice Plástico se reduce en consecuencia de la reducción del límite líquido, también notamos una gran reducción en el índice de plasticidad donde el resultado más bajo alcanzó el valor de 19,72.

En resumen observamos que en los ensayos de límites para el suelo A-7 la cantidad de aditivo idóneo es de 3,5.

4.3.3.- Compactación

El resumen de los resultados de las pruebas de compactación en las mezclas suelo-aditivo se presentan en los anteriores cuadros y el detalle de cada una de las pruebas se muestra en el anexo 2.

En cuanto a la humedad óptima del suelo al ser estabilizado se observa una tendencia a la reducción, este efecto del aditivo se debe al rechazo del agua que el aditivo provoca en las arcillas.

Por otro lado se puede apreciar la alteración que sufre la densidad máxima de compactación del suelo con la mezcla de aditivo. Se observa el aumento de la densidad máxima seca del suelo.

Se grafica para cada suelo la densidad máxima seca versus el contenido de aditivo y las figuras se muestran a continuación:



Figura IV-15 Influencia del contenido de CON-AID en la densidad máxima del suelo (A-4)

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el suelo A-4 la densidad seca máxima aumenta de 1,95 g/cm³ en el material sin estabilizar, hasta 1,98 g/cm³ con la adición de 2,5 de aditivo.

Esto significa un aumento en el peso seco del suelo tratado con el aditivo lo que se reflejara en una mejor compactación.

Observamos en el comportamiento de la curva que hasta el valor de 2,5 de aditivo el suelo alcanza una mejor compactación ocurriendo que los valores de densidad bajan con el aumento de más aditivo.

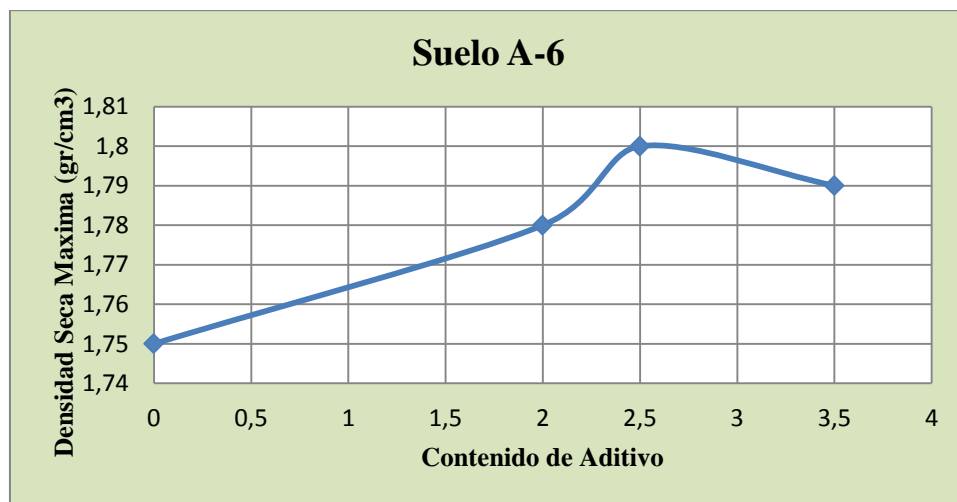


Figura IV-16 Influencia del contenido de CON-AID en la densidad máxima del suelo (A-4)

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que en el suelo A-6 la densidad seca máxima aumenta de 1,75 g/cm³ en el material sin estabilizar, hasta 1,80 g/cm³ con la adición de 2,5 de aditivo.

El aumento del peso seco en el suelo es muy favorable ya que esto significara una mejor compactación.

Se observa por el comportamiento de la curva que al igual que el suelo A-4 el suelo A-6 alcanza una mejor compactación con el 2,5 de aditivo pasando que con una mayor cantidad de aditivo el suelo ya no aumenta su densidad seca.

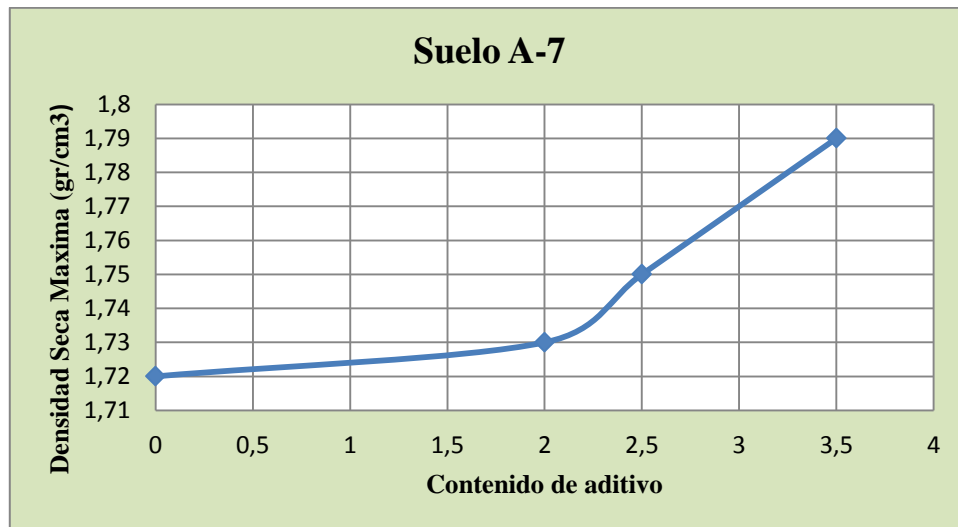


Figura IV-17 Influencia del contenido de CON-AID en la densidad máxima del suelo (A-7)

Fuente: Elaboración Propia

Observamos que en el suelo A-7 la densidad seca subió de 1,72 g/cm³ en su estado natural hasta 1,79 al ser estabilizada.

Con el aumento de la densidad máxima en el suelo tendremos una mejor compactación.

Analizamos que el suelo A-7 presento una mejora gradual en su peso seco a medida aumentábamos el aditivo, alcanzando su valor máximo en densidad con el mayor porcentaje de aditivo es decir 3,5. El contenido óptimo de aditivo para el suelo A-7 es mayor que en los suelos A-4 y A-6 los cuales presentaban un mejor comportamiento con el 2,5 de aditivo.

4.3.4.- Expansión o Hinchamiento

La expansión del suelo disminuye significativamente con la adición del aditivo, los resultados de estos ensayos se observan en los cuadros resumen del anterior subtítulo y el detalle de las pruebas se presenta en el anexo 2 del presente proyecto.

Se expresan los valores en graficas de expansión versus porcentaje de aditivo para cada suelo y se muestran a continuación.

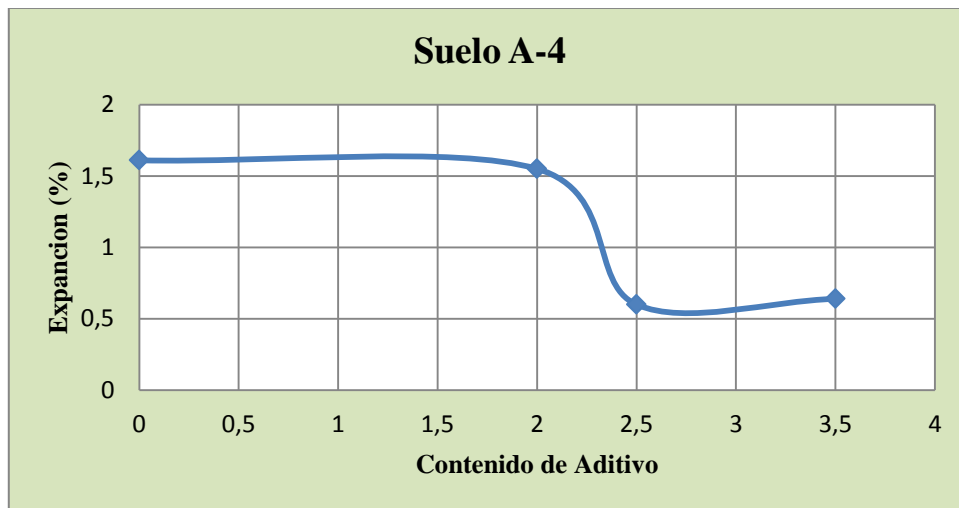


Figura IV-18 Influencia del contenido de CON-AID en la expansión del suelo (A-4)

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura IV-17 puede observarse que en el suelo A-4 la expansión se reduce notablemente para el valor de 2,5 de aditivo. Luego la expansión no continúa disminuyendo para el porcentaje de 3,5 de aditivo.

En el caso de este suelo su expansión inicial era pequeña pero aun así la expansión se redujo aún más con la mezcla del aditivo.

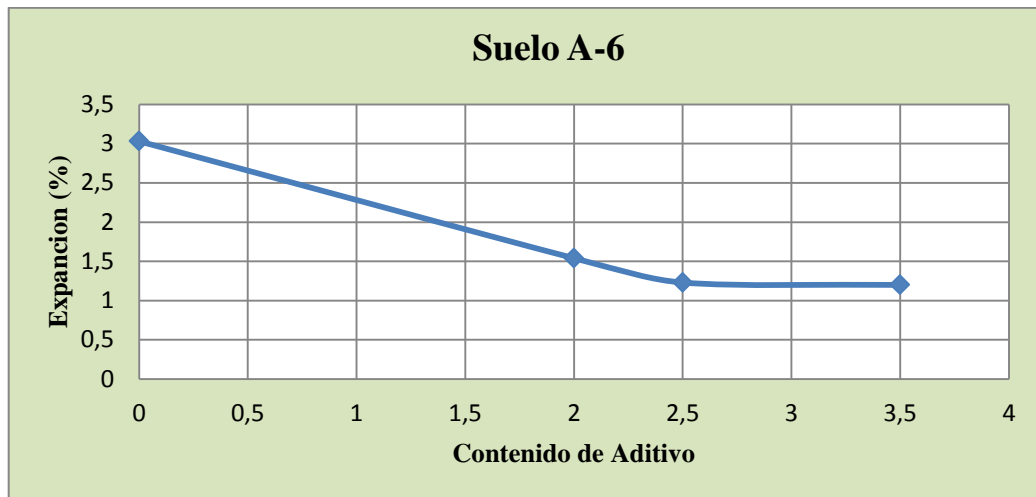


Figura IV-19 Influencia del contenido de CON-AID en la expansión del suelo (A-6)

Fuente: Elaboración Propia

En el suelo A-6 observamos por el comportamiento de la curva que la expansión se reduce notablemente bajando de 3,5 a 1,20. La expansión se reduce notablemente hasta el valor de 2,5 de aditivo no presentando modificaciones mayores con el valor 3,5 de aditivo.

El suelo A-6 tenía una expansión considerable pero como evidencia la figura se controló efectivamente con la mezcla del aditivo en el suelo.

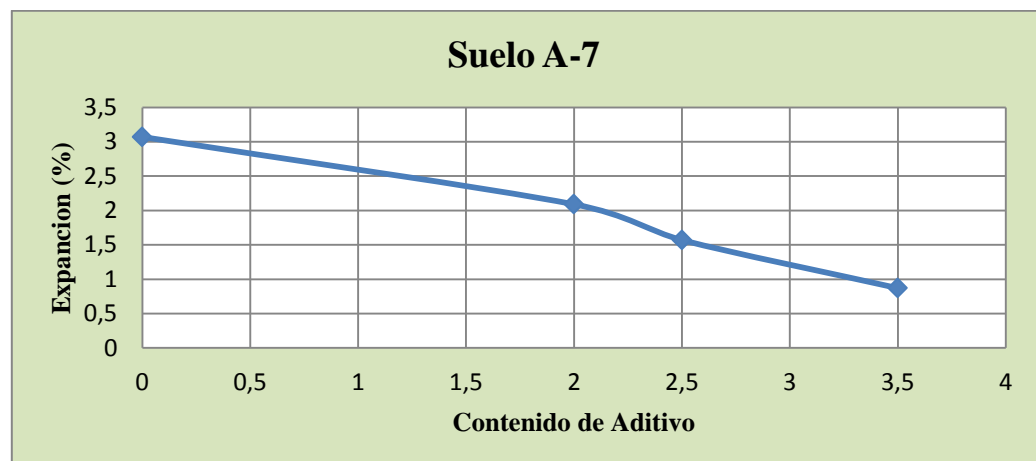


Figura IV-20 Influencia del contenido de CON-AID en la expansión del suelo (A-7)

Fuente: Elaboración Propia

Observamos para el suelo A-7 por el comportamiento de la curva que la expansión se reduce de 3 a 0,87. La expansión se reduce gradualmente con el aumento del aditivo es decir hasta el valor de 3,5 siendo a este valor de estabilización donde el suelo alcanza su mínima expansión.

El suelo A-7 es el suelo con mayor contenido de arcilla por lo que presentaba una expansión considerable que se controló por la inclusión del aditivo.

4.3.5.- California Bearing Ratio

Con relación al valor de soporte de los suelos, todas estas se ven influenciadas significativamente con la adición del aditivo en el suelo.

Se presentara una gráfica de C.B.R. versus contenido de aditivo para cada suelo.

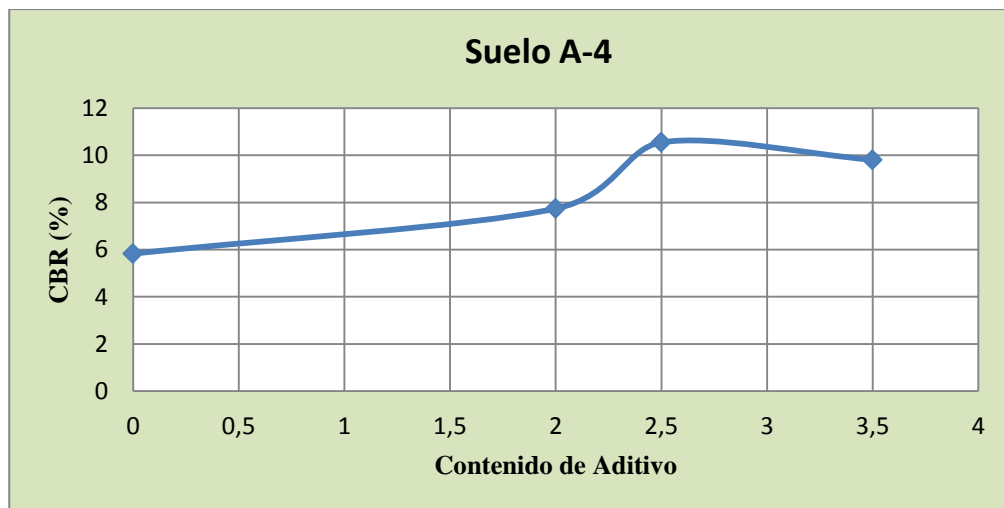


Figura IV-21 Influencia del contenido de CON-AID en el CBR del suelo (A-4)

Fuente: Elaboración Propia

La influencia del aditivo en los valores de CBR del suelo A-4 se aprecian en la Figura IV-21 En esta figura se observa un incremento sustancial que ocurre en los CBR entre los valores de 0 y 2,5 de aditivo, ocurriendo que con el 3,5 de aditivo el CBR ya no continua aumentando.

Los incrementos máximos de CBR para el suelo A-4 alcanzan el 81%, valor al que se llega con la inclusión de 2,5 de aditivo. Al seguir aumentando el aditivo se observa una tendencia negativa es decir hasta la cantidad de 3,5 la mejora en el CBR decrece llegando a un 70%.



Figura IV-22 Influencia del contenido de CON-AID en el CBR del suelo (A-6)

Fuente: Elaboración Propia

La influencia del CBR en los valores del suelo A-6 se aprecia en la Figura IV-22. Por la curva de CBR observamos que los incrementos en el soporte del suelo ocurren del 0 al 2,5 de aditivo ocurriendo que al aumentar el aditivo al 3,5 el CBR no continuo mejorando.

Los incrementos máximos en el CBR para el suelo A-6 alcanzan el 155%, valor al que se llega con la inclusión de 2,5 de aditivo. Al continuar aumentando la cantidad de aditivo es decir hasta el 3,5 se observa una tendencia negativa pues la mejora del CBR decrece hasta a un 130%.

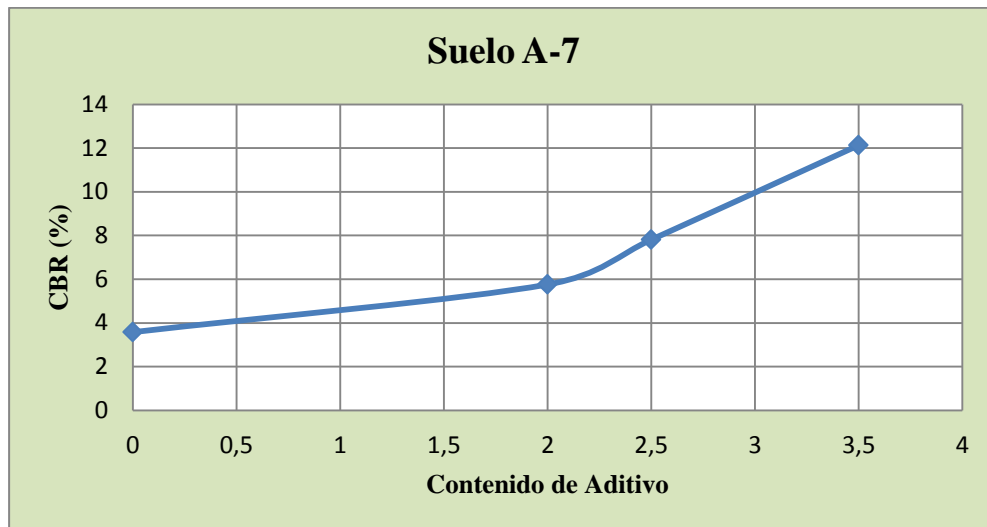


Figura IV-23 Influencia del contenido de CON-AID en el CBR del suelo (A-7)

Fuente: Elaboración Propia

La influencia del CBR en el soporte del suelo A-7 se aprecia notablemente en la Figura IV-23. Observamos por el comportamiento de la curva que el mejoramiento del CBR va en aumento conforme se adiciona mayor cantidad de aditivo es decir los incrementos en el soporte van del 0 al 3,5 de aditivo.

Los incrementos máximos en el CBR para el suelo A-7 alcanzan el 239% valor que se alcanza con la inclusión de 3,5 de aditivo. A diferencia de los otros dos tipos de suelos la mejora en esta muestra es gradual hasta el valor máximo de aditivo lo que puede deberse a la mayor cantidad de arcilla.

Lo observado en las tres figuras nos demuestra que la reacción del aditivo CON-AID en todas las mezclas tiene una acción importante en el CBR y la expansión del suelo.

En todos los casos se observa un incremento significativo hasta el 2,5 de aditivo, ocurriendo en los suelos A-4 y A-6 que con la inclusión de más aditivo estos suelos ya no mejoran, caso contrario al suelo A-7 que aumento su valor de soporte hasta el 3,5 de aditivo.

Por último, los valores del CBR también se reducen cuando se disminuye la energía de compactación, este hecho se observa en todas las muestras, los valores de CBR

que se tiene a los 56 golpes descienden con la energía de compactación de 25 y 12 golpes respectivamente.

4.3.6.- Cantidad Idónea de Aditivo para Cada Suelo

Analizando las propiedades de los suelos presentamos la cantidad óptima de producto para cada suelo.

Muestra Suelo A-4

Muestra	Límites			Compactación		CBR		Expansiones
	LL	LP	IP	D. max	CHO	100%	95%	%
				g/cm ³	%			
A	28,05	20,61	7,44	1,95	10,99	5,79	4,71	1,61
A 2,0	28,11	21,28	6,83	1,96	11,16	7,72	6,24	1,55
A 2,5	26,46	21,06	5,4	1,98	10,52	10,55	8,48	0,6
A 3,5	27,78	21,45	6,32	1,97	11,09	9,81	7,66	0,64

Tabla IV-8 Fuente: Elaboración Propia

Como podemos observar en los resultados del suelo A-4 en la mezcla del suelo – aditivo al 2,5*1000 se obtuvo el mejor resultado desde el punto de la vista de la ingeniería. El límite líquido bajo de un 28 % a un 26,46%, la densidad máxima aumento de 1,95 a 1,98 g/cm³, la humedad óptima también se redujo, el soporte del suelo subió de un 5,83% a un 10, 55%, este es un valor que cumple con las condiciones de la subrasante por ser mayor al rango mínimo de CBR (6-9%), la expansión se redujo a menos del 2% cumpliendo con esto la expansión máxima permitida.

Muestra Suelo A-6

Muestra	Límites			Compactación		CBR		Expansiones
	LL	LP	IP	D. max	CHO	100%	95%	%
				g/cm ³	%			
B	39,3	20,61	18,69	1,75	13,42	4,27	3,74	3,03
B 2,0	37,86	22,12	15,74	1,78	13,92	6,42	4,97	1,54
B 2,5	36,77	22,7	14,07	1,8	12,69	10,89	6,88	1,23
B 3,5	37,4	22,28	15,12	1,79	13,28	9,82	6,24	1,2

Tabla IV-9 Fuente: Elaboración Propia

Analizando el cuadro de la muestra del suelo A-6 se puede establecer que la mezcla suelo-aditivo al 2,5*1000 es la que mejor se adecua, pues mejora los límites de consistencia, la compactación y tiene un mayor CBR=10,4% siendo mayor al mínimo (6-9%) y se cumple con una expansión menor al 2%.

Muestra Suelo A-7

Muestra	Límites			Compactación		CBR		Expansiones
	LL	LP	IP	D. max	CHO	100%	95%	%
				g/cm ³	%			
C	60,86	29,15	31,71	1,72	11,91	3,58	2,99	3,07
C 2,0	54,36	30,52	23,84	1,73	12,6	5,77	4,51	2,09
C 2,5	51,71	31,12	20,59	1,75	11,61	7,81	5,51	1,57
C 3,5	50,82	31,1	19,72	1,79	11,39	12,13	8,54	0,87

Tabla IV-10 Fuente: Elaboración Propia

La muestra A-7 fue la que mejor reacciono frente al aditivo esto por ser el suelo más cohesivo, el límite líquido bajo bastante de un 60 a un 50%, en la compactación se vio un marcado aumento en la densidad máxima y una pequeña disminución en la humedad optima, en cuanto al soporte del suelo aumento de un 3,58% a un 11,34% y las expansión se estabilizo hasta alcázar un porcentaje menor al 2% permitido.

4.3.7.- Comparación del uso de CON-AID frente al uso de CAL

Teniendo ya un análisis de los resultados obtenidos con la estabilización CON-AID haremos una comparación de estos frente a los resultados de una estabilización con cal. Los datos de la estabilización con cal fueron extraídos de la tesis de Agustín Fernández Chura, titulada “Estabilización de suelos cohesivos con Cal”. Tesis realizada en 2004 en nuestra universidad.

○ Humedad Óptima

Con el aditivo CON-AID se notó en el suelo una disminución en la humedad óptima, a diferencia de la estabilización con CAL en la que se aumenta el contenido de humedad óptima.

Con la cal la humedad óptima sube un 35% de su estado natural, con CON-AID la humedad óptima disminuye un 6% de su estado natural.

La disminución de la humedad óptima con CON-AID se debe al rechazo de agua que provoca el aditivo en el suelo.

○ Densidad Seca Máxima

Con el aditivo CON-AID se notó un aumento en la densidad seca máxima del suelo, y con la cal se observa una disminución en esta densidad.

Con el aditivo CON-AID el suelo sube un 3% en su densidad máxima con la adición de CAL el suelo baja hasta un 10% en su densidad máxima.

El aumento de la densidad en el suelo significa una mejor compactación por lo que desde este punto de vista el aditivo CON-AID actuó mejor en el suelo.

- **Expansión o Hinchamiento**

La estabilización con CON-AID y con CAL muestra una notable reducción en la expansión del suelo.

Con la adición de cal al suelo llega a casi nulificar la expansión con altos contenidos de cal y mayores días de curado.

Con el aditivo CON-AID también se observa la reducción de la expansión en el suelo alcanzando una reducción del 60% en el suelo.

- **CBR**

Ambas estabilizaciones muestran un aumento en el soporte del suelo, la estabilización CON-AID muestra una incidencia mayor en el soporte del suelo teniendo un aumento del CBR en el suelo CL del 155% y en el CH del 238%.

La estabilización con CAL muestra una mejora máxima de un 130% en un suelo CL observamos que el aumento en el CBR es menor al obtenido con CON-AID.

Ambas estabilizaciones tienen un contenido de aditivo idóneo, aunque los resultados en las propiedades del suelo son distintos.

Por la reducción de la humedad óptima, aumento de la densidad máxima y un mayor porcentaje en el aumento del CBR, observamos una mejor reacción del aditivo CON-AID.

La estabilización con CON-AID es más costosa que una estabilización con CAL, así que se deberá hacer una análisis de factibilidad para cada caso en lo que se piense aplicar.

Presentaremos graficas del comportamiento de ambos estabilizadores en el soporte del suelo además de costos unitarios aproximados.

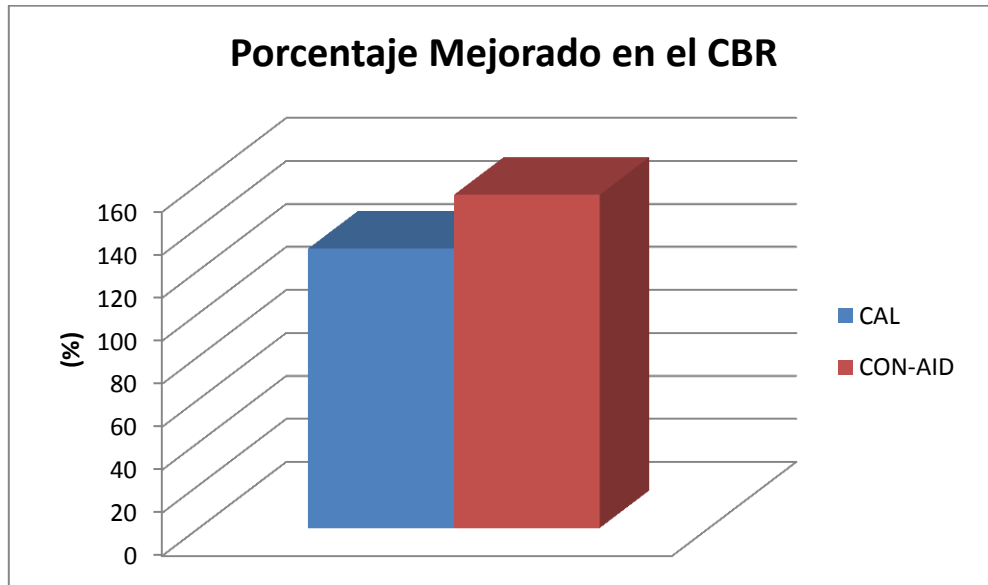


Figura IV-24 Influencia de CON-AID y la CAL en el CBR del suelo (CL, A-6)

Fuente: Elaboración Propia

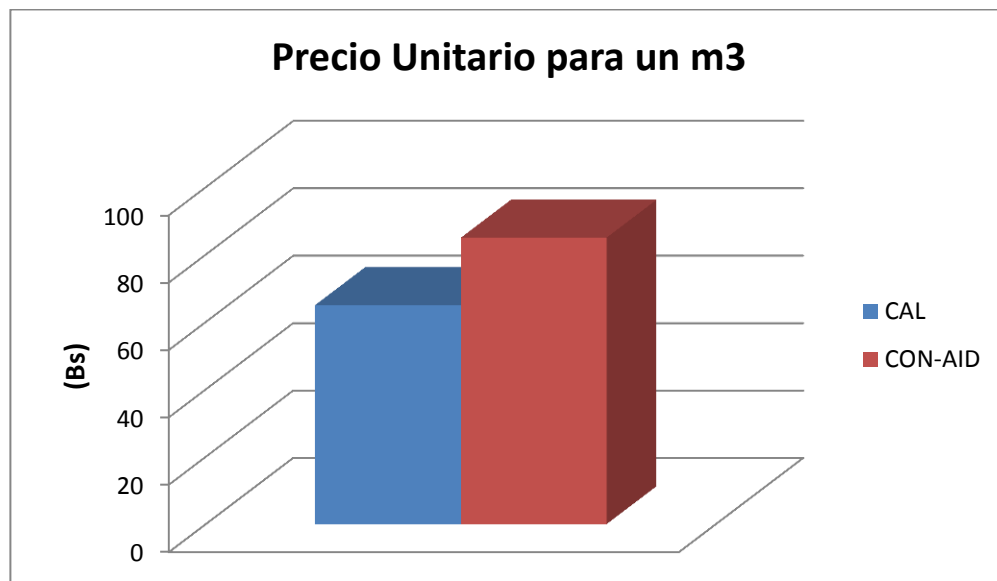


Figura IV-25 Precio unitario aproximado de CON-AID y la CAL

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.-Conclusiones.-

- Se observó que el producto trabaja mejor en los suelos más cohesivos (A-6 y A-7) siendo menor el mejoramiento en el suelo limoso (A-4).
- El suelo clasificado como A-4 presentó una mejora en su capacidad de soporte considerable tomando en cuenta que es un suelo poco plástico, la cantidad óptima de producto fue de $2,5 * 1000$.
- El suelo clasificado como A-6 presentó una mejora mayor a la del suelo A-4, esto debido a su mayor plasticidad, el soporte del suelo subió más, la cantidad óptima del producto fue de $2,5 * 1000$, pasando que a la cantidad de 3,5 ya no manifestaba mayor mejora.
- El suelo A-7 al tener un porcentaje mayor de arcilla y presentar características más plásticas que las otras dos muestras, presentó una mejora mucho mayor tomando en cuenta que el soporte natural de este suelo era el más pobre, este suelo a diferencia de los demás presentó una mejora gradual hasta la cantidad de $3,5 * 1000$ siendo esta la cantidad idónea.
- La expansión de los suelos se controló efectivamente bajando en las tres muestras a una expansión menor al 2%.

- También se notó el efecto del aditivo en la compactación de los suelos teniendo un incremento en densidad máxima y una disminución en la humedad óptima.
- En cuanto a los límites de consistencia, el límite líquido bajo en las tres muestras, siendo el suelo de mayor plasticidad (Suelo A-7) donde se produjo un mayor cambio teniendo un bajón en su límite líquido considerable.
- El límite plástico no cambió mucho, y debido a la disminución del límite líquido fue que el índice de plasticidad de los suelos también bajo.
- Se realizó la estabilización volumétrica de las muestras controlando la facilidad en el cambio de humedad de los suelos, el mejoramiento de esta propiedad se vio reflejada en la acentuada disminución de la expansión de los suelos.
- La propiedad de resistencia en los suelos mejoró notablemente al tener un aumento en sus soportes de más del 100%,
- Se mejoró sustancialmente la permeabilidad de los suelos, teniendo en cuenta que se redujo mucho la cantidad de agua que se transmitía en el suelo.
- La durabilidad de las vías estabilizadas se garantiza por el efecto permanente e irreversible del aditivo iónico en los suelos, es así que el intemperismo y el tráfico no afectarán en esta importante propiedad perseguida en la estabilización.
- Los suelos estabilizados cumplen con las condiciones para su utilización en la subrasante, siendo su soporte al 95% mayor al 6% mínimo.

- Las vías estabilizadas se verán beneficiadas en época seca por la reducción de polvo y en épocas de lluvias ya no se producirá barro.
- Se llega a la conclusión que el producto es más efectivo en los suelos de alta plasticidad (Suelos A-7-5, A-7-6), mejorando en menor proporción a los suelos menos plásticos (A-6 y A-4).
- Al comparar la estabilización con el aditivo CON-AID y la estabilización con CAL se observa una mejor reacción de CON-AID en el suelo al tener una mejor compactación y un mayor aumento en el soporte del suelo.
- También se comparó los precios unitarios de la estabilización CON-AID y CAL donde se evidencio que el costo de CON-AID es mayor pero esto se justifica con las mejores propiedades que adquiere el suelo con este aditivo.

5.2.- Recomendaciones

- Se debe tener en cuenta que este aditivo funciona solamente en suelos cohesivos perdiendo su efectividad en suelos enteramente limosos.
- La efectividad del producto se ve anulada por la presencia de materia orgánica por lo que hay que tomar mucho en cuenta las zonas a ser estabilizadas
- Para las pruebas de laboratorio se aconseja seguir los pasos mencionados ya para la estabilización de los suelos, esto con el objeto de obtener mejores resultados.

- Se debe realizar necesariamente un análisis en el laboratorio previo a la estabilización en campo pues como se vio las cantidades óptimas de producto varían dependiendo al tipo de suelo a tratar.
- Se debe hacer una análisis de costos para ver si el producto es viable en ciertas obras, siendo las más idóneas las que se encuentran a mayor distancia de un banco de materiales pues el transporte de estos materiales es muy costoso.
- También se recomienda ver la posibilidad de ampliar el uso del aditivo CON-AID en otras obras ya sea en la construcción, canales, atajados etc. Teniendo en cuenta que un buen suelo será la base para cualquier obra de ingeniería.