

“ESTABILIZACION DE SUELOS FINOS EXPANSIVOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE GRADIENTES TERMICOS”

CAPITULO I INTRODUCCION

1.1.GENERALIDADES.-

En el trabajo práctico el ingeniero civil suele enfrentarse con diversos e importantes problemas planteados por el terreno. Prácticamente todas las estructuras de ingeniería civil como ser: edificios, puentes, carreteras, túneles, muros, torres, canales o presas, deben cimentarse sobre la superficie de la tierra o dentro de ella. Para que una estructura se comporte satisfactoriamente debe poseer una cimentación adecuada.

En la construcción de carreteras y de cualquier otra obra que requiera grandes explanaciones, es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras y materiales debido a consideraciones de tipo económico, ambiental y técnico. Las técnicas de estabilización de suelos contribuyen de forma clara a la competitividad y sostenibilidad de la ingeniería de carreteras.

Las técnicas de estabilización se basan en el principio de modificar las propiedades del material existente con el fin de hacerle capaz de cumplir mejores requerimientos. Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de mejoramiento o estabilización son: Estabilidad volumétrica (Contracción – Expansión), Resistencia, Compresibilidad y Durabilidad.

La estabilización de los suelos consiste en la realización de todas las actividades necesarias, teniendo como objetivo principal procurar por varios medios la estabilidad de ellos para cualquier condición de tiempo y de servicio, entendiendo por estabilidad la permanencia en el tiempo de las características obtenidas al momento de la realización, lo cual significa entonces que no solo se debe llegar a un estado del suelo con suficiente resistencia a los deformantes de las cargas y acción destructora , si no

también asegurar la permanencia en el tiempo de ese estado. Este último aspecto del proceso tiene fundamental importancia ya que de su existencia depende de la existencia del primero.

La estabilización se puede lograr de varias maneras, comúnmente mezclando diferentes tipos de suelos, o agregando algún tipo de aditivo, en la investigación se realiza una manera diferente de estabilizar un suelo fino expansivo, mediante la aplicación de gradientes térmicos, su aplicación se puede llevar a cabo en capas sub rasantes de vías, caminos rurales, zonas peatonales, aeropuertos, áreas extensas (parqueaderos, campos deportivos, etc.).

Un suelo expansivo se define, como un tipo de suelo que se hincha y se contrae causando daños, frecuentemente presenta un contenido coloidal alto, con valores altos de límite líquido, altos índices de plasticidad y de actividad. Pueden ser de origen variado, duros en estado seco, pero se vuelven blandos cuando se les permite absorber agua y puede ejercer grandes presiones de expansión. La permeabilidad es muy baja salvo cuando el suelo está fisurado y seco y el agua puede circular por las grietas abiertas., hay que relacionar su origen a la presencia de partículas arcillosas que puedan provocar esta expansión.

Se conoce la estabilización térmica “in situ” que se fundamenta en la observación de como el calor convierte cualquier arcilla en un ladrillo resistente, a una temperatura suficiente el proceso se vuelve irreversible y la resistencia adquirida no se pierde ni por inmersión.

Por lo que en la práctica y para estos problemas resulta suficiente con llegar a temperaturas entre 100 y 400 grados, donde la rehabilitación de la arcilla se torna imposible.

1.2.JUSTIFICACION.-

Las razones que justifican la realización de la investigación son:

- En el departamento existen lugares donde se encuentran suelos expansivos, sobre los cuales es necesario construir, y estos por tener gran variación en su estabilidad volumétrica, no son adecuados para construir sobre ellos, y es necesario estabilizarlos para que cumplan con las características requeridas para la obra.
- Es un hecho que no siempre se cuenta en la zona donde se está construyendo con un material que cumpla con las características solicitadas de un proyecto, o el costo de cambiar el material por otro más estable es muy elevado.
- La estabilización para los suelos finos expansivos es necesaria, ya que presentan una gran variación en su estabilidad volumétrica (Contracción-Expansión), provocando así la falla en las bases y por lo tanto en la capa de rodadura.
- Con la estabilización de los suelos finos expansivos se busca
- mejorar el suelo que se encuentra en la zona donde se está construyendo para no tener que recurrir a bancos de materiales, tomando en cuenta que las canteras existentes son cada vez más escasas, y se debe empezar a buscar alternativas nuevas para la estabilización de los suelos.
- La experiencia en otros países con esta técnica de estabilización ha tenido buenos resultados, ya que con la aplicación de la gradiente térmica el suelo se estabilizara y no recuperara sus propiedades iniciales.
- La falta de información técnica y la experiencia con este tipo de estabilización, hacen suponer que la misma no sea utilizada en nuestro medio, por lo que se pretende cambiar esta situación marcando precedente para incentivar estudios más avanzados y de una aplicación más diversa con relación a este tema.

- Para fines académicos se definen zonas que cuenten con suelos finos expansivos, los cuales serán utilizados, con el fin de demostrar la metodología y los resultados, sobre la estabilización con este método.
- Es importante actualmente remarcar las ventajas ecológicas que nos puede brindar este tipo de estabilización, dado que si aprovechamos el material que tenemos en el sitio de la construcción a realizar, no será necesario la explotación ni las alteraciones a nuestros paisajes, reduciendo en lo posible el impacto ambiental, ya que actualmente es un tema principal y muy importante dentro de la realización de cualquier tipo de obra.
- El estudio que se obtenga a partir de los resultados obtenidos, puede ser utilizado en diferentes proyectos cuyas características no sean las que se requieran y la alternativa de estabilización sea una alternativa válida técnica y económicamente.
- Se desea también contribuir con herramienta útil a la comunidad técnica y académica de la universidad.

1.3.IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

1.3.1. PROBLEMA

La raíz del problema de estos suelos está en los cambios volumétricos (Expansión – Contracción), que presentan debido ante la variación de la humedad, haciendo al suelo un material menos resistente y por lo tanto no apto para su utilización en las obras, lo cual obliga en muchos casos generar acciones que mejoren las propiedades de estos materiales haciendo que sean aptos y cumplan especificaciones mínimas para una capa subrasante.

1.4.OBJETIVOS.-

1.4.1. OBJETIVO GENERAL.

Mejorar el comportamiento de los suelos finos expansivos, mediante la aplicación de gradientes térmicos, logrando así, estabilizarlos adquiriendo mejores características e incrementando el valor soporte de los mismos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la base teórica sobre los suelos finos expansivos, para conocer su comportamiento ante los cambios de humedad.
- Analizar aspectos generales sobre la estabilización de suelos expansivos, para saber que propiedades pueden ser modificadas.
- Ubicar la zona donde existan suelos expansivos que será considerado nuestra área de estudio.
- Realizar la caracterización del material en su estado natural.
- Realizar la aplicación de distintas gradientes térmicas al material, durante diferentes periodos de tiempo y a diferentes temperaturas.
- Someter el material en una cámara húmeda para observar su estabilidad ante la ganancia de humedad, variando también el tiempo en el que se encontraran dentro de las cámaras.
- Analizar si las muestras expuestas en el estudio presentan variación en su resistencia.
- Comprobar si las propiedades básicas de los suelos como ser, los límites de consistencia y granulometría mejoran con la aplicación de este método de estabilización.
- Realizar un análisis sobre los resultados obtenidos en la aplicación de gradientes térmicos en suelos expansivos de estudio.
- Realizar una evaluación de costos, para su aplicación en campo.
- Establecer conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados obtenidos.

1.5.ALCANCE.-

El proyecto pretende ampliar los conocimientos con nuevas técnicas para estabilizar suelos expansivos, de manera que se amplíe las alternativas de mejorar suelos susceptibles de emplearse en las obras de carretera. Se trata de determinar, por tanto el proceso bajo el cual se mejora las propiedades de los suelos una vez estabilizado con este método.

Inicialmente se presenta un resumen de la investigación, los resultados que se pretenden alcanzar y la metodología con la que se desarrollara el proceso de estabilización, se presentara también el por qué estamos realizando esta investigación, la justificación que se dará para que el trabajo tenga su aceptación, el problema que se pretende solucionar y los beneficios que se pueden obtener con la realización de esta investigación en el campo en el que se desarrollara.

Posteriormente la recopilación de toda la información necesaria sobre los suelos finos expansivos, es decir de toda la parte teórica sobre estos tipos de suelos, como ser sus propiedades, características, propiedades índices, etc. Para saber cuál es su comportamiento dentro de la investigación.

Es importante establecer el sustento teórico de la estabilización de los suelos expansivos, los tipos de estabilización que se usa frecuentemente en nuestro medio para estabilizar estos tipos de suelos, conoceremos también como se puede desarrollar la estabilización “in situ”, de suelos expansivos aplicando gradientes térmicos.

Como parte central de la investigación está la realización de la estabilización, la misma que se inicia con la caracterización del material en su estado natural, describiendo el procedimiento a utilizar para realizar la estabilización de un suelo expansivo mediante la aplicación de gradientes térmicos, para posteriormente aplicar el método.

En base a los resultados obtenidos se define en que magnitud y sentido cambian o mejoran las características del suelo una vez estabilizado.

Se analizará todo lo que se ha logrado mediante la investigación, los resultados y sus respectivos análisis, determinar además su aplicabilidad en el campo de la ingeniería y en nuestro medio.

CAPITULO II SUELOS

2.1.INTRODUCCIÓN

En el campo de trabajo, el ingeniero civil constantemente se enfrenta a diversos problemas surgidos por el tipo de suelo con el cual tratará, el suelo es lo que soportará el peso de una estructura, y si este no cumple con ese objetivo, la estructura sufrirá problemas de agrietamiento, hundimientos y otros que también dañaran la obra realizada.

El suelo es el material de construcción más abundante del mundo y en muchas zonas constituye, de hecho, el único material disponible localmente. Cuando el ingeniero emplea el suelo como material de construcción debe seleccionar el tipo adecuado de suelo, así como el método de colocación y, luego, controlar su colocación en obra.

2.2. SUELO.

El término “Suelo”, tiene varias interpretaciones, la cual varía de acuerdo con los intereses que se tenga sobre él. Nos enfocaremos en el área de la Ingeniería Civil.

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

2.2.1. Formación de los Suelos.

El suelo puede formarse y evolucionar a partir de la mayor parte de los materiales rocosos, siempre que permanezcan en una determinada posición el tiempo suficiente para permitir las anteriores etapas. Se pueden diferenciar:

Suelos autóctonos, formados a partir de la alteración de la roca que tienen debajo.

Suelos alóctonos, formados con materiales provenientes de lugares separados. Son principalmente suelos de fondos de valle cuya matriz mineral procede de la erosión de las laderas.

La formación del suelo es un proceso en el que las rocas se dividen en partículas menores mezclándose con materia orgánica en descomposición. El lecho rocoso empieza a deshacerse por los ciclos de hielo-deshielo, por la lluvia y por otras fuerzas del entorno:

- El lecho de roca madre se descompone cada vez en partículas menores.
- Los organismos de la zona contribuyen a la formación del suelo desintegrándolo cuando viven en él y añadiendo materia orgánica tras su muerte. Al desarrollarse el suelo, se forman capas llamadas horizontes.

El horizonte A, más próximo a la superficie, suele ser más rico en materia orgánica, mientras que el horizonte C contiene más minerales y sigue pareciéndose a la roca madre. Con el tiempo, el suelo puede llegar a sustentar una cobertura gruesa de vegetación reciclando sus recursos de forma efectiva

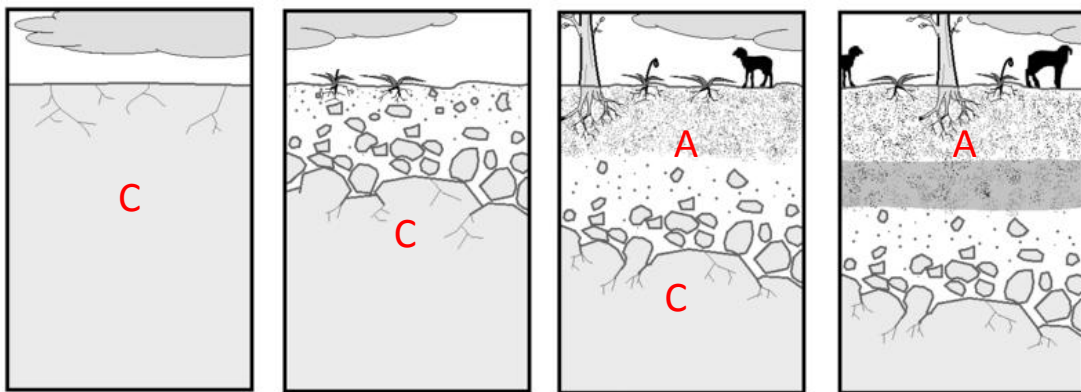


Figura N°1 Formación de los Suelos.

Cuando el suelo es maduro suele contener un horizonte B, donde se almacenan los minerales lixiviados.

Los agentes que intervienen en la generación de los suelos son dos:

La desintegración mecánica, se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos, tales como cambios periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las grietas de las rocas, agentes de organismos, plantas, etc. Por estos fenómenos las rocas llegan a formar arenas, o cuando mucho limos y solo en casos especiales arcillas.

Por descomposición química, se entiende, la acción de agentes que atacan las rocas modificando su constitución mineralógica o química. El principal agente es el agua y los mecanismos de ataque más importantes son la oxidación y la hidratación. Estos mecanismos generalmente producen arcilla como último producto de desintegración.

2.2.2. Composición de los Suelos.

Los componentes del suelo se pueden dividir en sólidos, líquidos y gaseosos.

Sólidos

Este conjunto de componentes representa lo que podría denominarse el esqueleto mineral del suelo. Y entre estos, componentes sólidos, del suelo destacan:

- *Silicatos*, tanto residuales o no completamente meteorizados, (micas, feldespatos, y fundamentalmente cuarzo).
- Como productos no plenamente formados, singularmente los minerales de arcilla, (*caolinita*, *illita*, etc.).
- *Óxidos e hidróxidos de Fe* (hematites, limonita, goethita) y de Al (gibbsita, boehmita), liberados por el mismo procedimiento que las arcillas.
- Clastos y granos poliminerales como materiales residuales de la alteración mecánica y química incompleta de la roca originaria.
- Otros diversos compuestos minerales cuya presencia o ausencia y abundancia condicionan el tipo de suelo y su evolución.
 - ✓ Carbonatos (calcita, dolomita).
 - ✓ Sulfatos (aljez).
 - ✓ Cloruros y nitratos.

- Sólidos de naturaleza orgánica o complejos órgano-minerales, la materia orgánica muerta existente sobre la superficie, el humus o mantillo:
- Humus joven o bruto formado por restos distinguibles de hojas, ramas y restos de animales.
- Humus elaborado formado por sustancias orgánicas resultantes de la total descomposición del humus bruto, de un color negro, con mezcla de derivados nitrogenados (amoníaco, nitratos), hidrocarburos, celulosa, etc. Según el tipo de reacción ácido-base que predomine en el suelo, éste puede ser ácido, neutro o alcalino, lo que viene determinado también por la roca madre y condiciona estrechamente las especies vegetales que pueden vivir sobre el mismo.

Líquidos

Esta fracción está formada por una disolución acuosa de las sales y los iones más comunes como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- ,... así como por una amplia serie de sustancias orgánicas. La importancia de esta fase líquida en el suelo estriba en que éste es el vehículo de las sustancias químicas en el seno del sistema.

El agua en el suelo puede estar relacionada en tres formas diferentes con el esqueleto sólido:

- La primera, está constituida por una película muy delgada, en la que la fuerza dominante que une el agua a la partícula sólida es de carácter molecular, y tan sólida que esta agua solamente puede eliminarse del suelo en hornos de alta temperatura. Esta parte del agua no es aprovechable por el sistema radicular de las plantas.

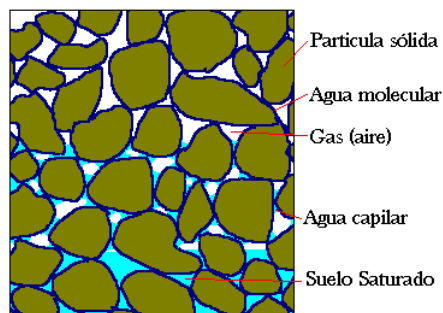


Figura N°2 Composición de los Suelos

- La segunda es retenida entre las partículas por las fuerzas capilares, las cuales, en función de la textura pueden ser mayores que la fuerza de la gravedad. Esta porción del agua no percola, pero puede ser utilizada por las plantas.
- Finalmente, el agua que excede al agua capilar, que en ocasiones puede llenar todos los espacios intersticiales en las capas superiores del suelo, con el tiempo percola y va a alimentar los acuíferos más profundos. Cuando todos los espacios intersticiales están llenos de agua, el suelo se dice saturado.

Gases

La fracción de gases está constituida fundamentalmente por los gases atmosféricos y tiene gran variabilidad en su composición, por el consumo de O_2 , y la producción de CO_2 dióxido de carbono. El primero siempre menos abundante que en el aire libre y el segundo más, como consecuencia del metabolismo respiratorio de los seres vivos del suelo, incluidas las raíces y los hongos. Otros gases comunes en suelos con mal drenaje son el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O).

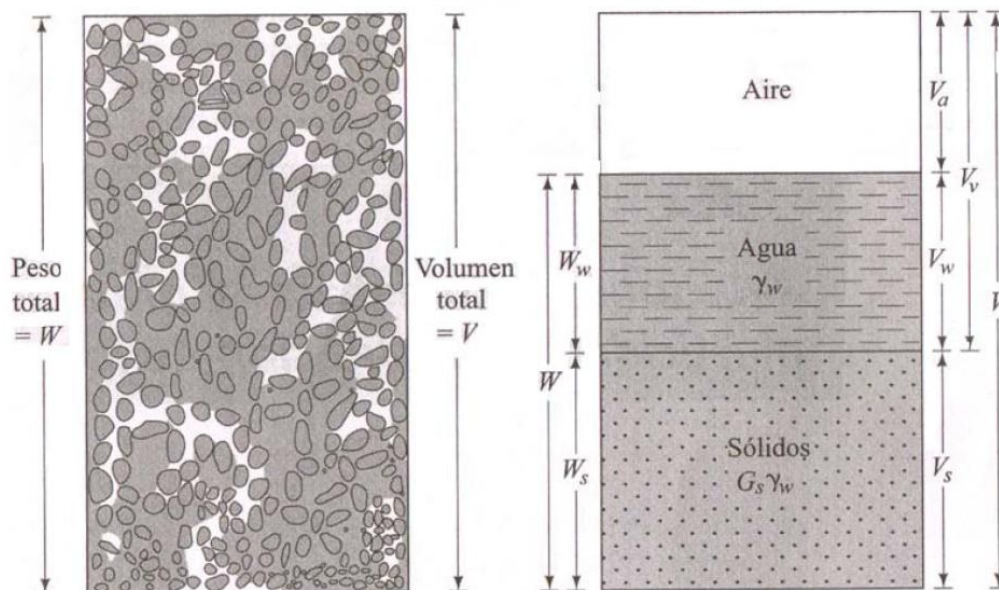


Figura N°3 Distribución de la estructura del suelo en estado natural (izq.) y la representación de las tres fases del suelo (Der.)

2.2.3. Tipos de Suelos

De acuerdo con el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos: Suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas, o sea los suelos inorgánicos, y suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

Suelos Orgánicos, Estos se forman casi siempre *in situ*. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta, o en un estado de descomposición, es tan alta con relación a l cantidad de suelo inorgánico que las propiedades que pudieran derivar de la porción mineral quedan eliminadas. Esto es muy común en las zonas pantanosas, en las cuales los restos de vegetación acuática llegan a formar verdaderos depósitos de gran espesor, conocidos con el nombre genérico de *turbas*. Se caracterizan por su color negro o café oscuro, por su poco peso cuando están secos y su gran compresibilidad y porosidad. La turba es el primer paso de la conversión de la materia vegetal en carbón.

Suelos inorgánicos, son el producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó originalmente reciben el nombre de *suelos residuales*; en contraste algunos de esos productos intemperizados puedes ser movidos del lugar de su formación dando origen a los *suelos transportados*.

Suelos residuales, estos suelos aparecen particularmente cuando los procesos químicos del intemperismo (que involucra diversos procesos naturales que resultan de la acción individual o combinada de factores tales como el viento, lluvia, heladas y cambios de temperatura), predominan sobre los físicos, lo que sucede en los terrenos llanos de las áreas tropicales. La composición de estos suelos es muy variable, con una gran diversidad tanto de tipos de minerales como de tamaños de partículas. En los climas calientes, el intemperismo puede eliminar algunos minerales, dejando otros más resistentes en depósitos concentrados.

En la siguiente tabla se muestra una lista del proceso de transformación que sufren algunos minerales componentes del granito:

Minerales existentes en las Rocas	Probables minerales Derivados	Posibles Suelos Resultantes
Cuarzo	Cuarzo	Arena
Muscovita	Muscovita	Arena Micácea
Mica Biotita	Clorita o Vermiculita+ Soluciones de Carbonato Mg	Arcilla oscura
Feldespatos Ortoclasa	Ilita o Caolinita + Soluciones de carbonato de K	Arcilla Clara
Feldespatos Plagioclasa	Montmorillonita + Solución de Carbonato de Na O Ca	Arcilla expansiva, Barro Calizo / Arcilla o Magra

Tabla N°1 Intemperización del Granito

Suelos Transportados, son aquellos suelos que por medio de agentes físicos son redepositados en otros lugares, generando así los suelos sobreyacentes a otros estratos sin relación directa con ellos. Según el agente de transporte se subdividen en las siguientes categorías:

- Aluviales o Fluviales: Son depositados por agua en movimiento, produciendo el arrastre de minerales de gran tamaño que se van depositando en forma graduada a lo largo de su curso, correspondiendo los materiales muy finamente granulados, a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producida por el movimiento de las masas de hielo.
- Glaciales; depositados por la acción glacial, estos están formados por suelos heterogéneos, que van desde grandes bloques, hasta materiales muy finamente granulados, a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producida por el movimiento de las masas de hielo.
- Eólicos; depositados por la acción del viento, el cual puede arrastrar partículas cuyo tamaño puede variar desde limos hasta arenas gruesas, dos tipos de suelos se pueden destacar dentro de esta categoría: ***El loess*** que es un depósito constituido por una mezcla uniforme de arenas finas y limos. Los

Médano, son aglomeraciones de arena suelta arrastrada por el viento y que se vio detenida por algún obstáculo natural de la superficie del terreno

Dentro del Área de la Ingeniería Civil, los nombres que son generalmente más usados son los siguientes:

Gravas

Estas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de 4.75 milímetros de diámetro. Dado que el origen, cuando son acarreadas por las aguas las gravas sufren desgaste en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en lechos, en los márgenes y en los conos de la deyección de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido, retransportadas.

Arenas

La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la desfragmentación de las rocas o de su trituración artificial y cuyas partículas varían entre 4.75 y 0.075 milímetros, el origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcilla.

Limos

Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de sus partículas está comprendido entre 0.075 mm y 0.002 milímetros, su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta.

Arcillas

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor a 0.002 mm, son suelos que poseen cohesión, es decir, la propiedad de atracción intermolecular lo

que hace que su masa tenga la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua.

2.3.SUELOS EXPANSIVOS

Un suelo expansivo puede definirse, como un tipo de suelo que se hincha y contrae causando daños, frecuentemente presenta un contenido coloidal alto, con valores de límite líquido, altos índices de plasticidad y de actividad.

Los suelos expansivos se caracterizan por estar constituidos de materiales finos sedimentarios heterogéneos. Existen zonas en donde los suelos son de alta plasticidad, muy expansivos, del orden de 35 % en volumen. Estos suelos se caracterizan por su comportamiento mecánico: contracción de la arcilla por secado, expansión de la arcilla al humedecerse, desarrollo de presiones cuando la arcilla se confina y no puede expandirse, disminución de la resistencia al corte y de la capacidad de soporte al expandirse. Entre las consecuencias de construir en estas áreas están, entre otras, la aparición de fisuras verticales que nacen en la parte superior de las paredes, y van de arriba hacia abajo. Son más abiertas arriba que abajo y, generalmente o llegan a la línea de cimientos.

Por ello es muy importante antes de comenzar una construcción, hacer un buen estudio de suelos para conocer si existen o no este tipo de suelos.

La permeabilidad es muy baja salvo cuando el suelo está fisurado y seco y el agua puede circular por las grietas abiertas.

2.3.1. La expansión de los suelos.

La expansión de los suelos estará, en consecuencia, directamente relacionada con las propiedades microestructurales de las partículas arcillosas. Tendrá especial influencia la existencia en ellas de cargas electrostáticas netas, así como la magnitud de su

superficie específica (forma aplanada, tamaño, etc.) o su capacidad de cambio catiónico, siendo estos tres factores directamente proporcionales al potencial de expansión que se pueda presentar.

2.3.2. Origen de los suelos expansivos.

La expansión de un suelo se podrá consecuentemente asociar con la presencia de partículas arcillosas que puedan provocar esta expansión. Habitualmente se consideran tres minerales arcillosos, montmorillonita, illita y caolinita, que por su abundancia respecto a otros se pueden considerar básicos a efectos de estudiar este fenómeno.

La montmorillonita, es mucho más expansiva que la illita o la caolinita y está presente en prácticamente todos los suelos expansivos. Así lo confirman, por ejemplo, Collins et al. (1973) o Frydman y Samocha (1984) cuando describen los terrenos expansivos en Israel.

Uno de los factores que ocasionan los movimientos diferenciales de algunas cimentaciones, es el alto potencial expansivo que presentan los suelos arcillosos con un alto contenido de partículas finas, cuyo material predominante es la **montmorillonita**. Este mineral generalmente se forma en las regiones donde se presentan malas condiciones de drenaje. Su efecto fundamental, es ocasionar en el suelo grandes cambios volumétricos, debido a que su volumen disminuye o aumenta con el cambio de humedad.

En ocasiones, sin embargo, es **la illita**, a su vez más expansiva que la caolinita, la que produce los hinchamientos. En la illita y la caolinita la expansión puede ser apreciable si las partículas son suficientemente pequeñas (del orden de décimas de micra), siendo poco significativos en otros casos (Mitchell, 1973).

Arnol (1984) o Schreiner (1987), citado por Josa (1988), exponen el origen de los minerales arcillosos expansivos en la naturaleza, centrándose fundamentalmente en los tres indicados anteriormente. En general la fuente de estos minerales es una amplia gama de rocas ígneas básicas incluyendo rocas volcánicas y lavas entre las que las más frecuentes son los basaltos, si bien en algún caso ha sido el granito el que se ha citado como origen. Aunque la montmorillonita y la caolinita pueden ser producidas a partir de las mismas rocas, la primera necesita un medio más alcalino como factor imprescindible y se genera habitualmente en zonas áridas con poco drenaje y en consecuencia con alta concentración de cationes y minerales.

La caolinita, por el contrario, se produce con pH más bajos y en zonas más drenadas y con menores concentraciones. Por esta razón la montmorillonita abundan más en valles y zonas deprimidas y la caolinita en lugares con mayores pendientes. La illita, por su parte, precisa para su formación de un pH ligeramente alcalino.

De acuerdo con este origen los suelos expansivos podrán ser residuales procedentes de rocas ígneas aunque procesos de transporte puedan modificarlos de su situación inicial ya sea antes o después de su degradación. En ambos casos ambientes fluviales o en aguas subterráneas, ricas en calcio, tenderán a producir arcillas con alta proporción de este elemento como ion de cambio, mientras que en ambientes marinos será el sodio el predominante.

2.3.3. Problema de los Suelos expansivos

El problema que presentan los suelos expansivos es muy crítico, ya que no solamente quiebra las carreteras, sino que también raja casas, construcciones de todo tipo y pavimentos urbanos, en fin son muchos los daños que ocasionan este tipo de suelo.



Figura N°4 Problemas de los suelos expansivos

Lo trágico de estos suelos, es que si no se toman las previsiones necesarias, una vez que el pavimento se deforma, el problema es irreversible, no hay forma de conservación ni mantenimiento, porque no se trata al problema de raíz. Desde su primer momento se debe proyectar que el suelo tenga un buen drenaje, y que el peso del paquete estructural del pavimento sea superior a la presión de expansión.

La incidencia del comportamiento de los materiales expansivos en los daños experimentados por las estructuras no fue identificada por los especialistas en el estudio de suelos y fundaciones como una de las causas fundamentales de esos daños, prácticamente hasta fines de 1930.

El tema ha interesado en forma creciente a los especialistas en suelos y construcciones.

Estos suelos con arcillas expansivas están presentes en todas partes del mundo, cabe mencionar que en Estados Unidos según estudios realizados prueban que el daño causado a la propiedad por los suelos expansivos, resultan en un costo de billones de dólares, más que el daño causado por temblores, huracanes y otros problemas de causa natural.

En Bolivia existen depósitos de suelos arcillosos expansivos sobre los cuales es necesario construir cualquier tipo de obra. A estos depósitos se los denomina activos por su gran capacidad de absorción de agua, lo cual genera grandes cambios volumétricos.

Esto produce en las estructuras un rápido deterioro, debido principalmente a la incapacidad de absorber tales deformaciones, generándose un sobre costo en reparación y mantenimiento.

Desde este punto de vista es necesario realizar unos análisis de los esfuerzos y deformación inducidos por los cambios de humedad en este tipo de suelo, ya que por los cambios de humedad se puede inducir expansión, contracción, generación de presiones de expansión si el movimiento es restringido y disminución de la resistencia al esfuerzo cortante y de la capacidad de carga.

2.3.4. Movimiento de los Suelos Expansivos.

El comportamiento de los suelos expansivos en respuesta al cambio en su contenido de humedad puede ser de contracción o de expansión, tanto horizontalmente como verticalmente, siendo este último el que causa mayor daño en el diseño del terraplén.

Por sus características, los movimientos se los puede clasificar como deformaciones a largo plazo y estacionales. Se denominan deformaciones a largo plazo a aquellas que van evolucionando lentamente a medida que pasa el tiempo y son generalmente originadas por los efectos que la nueva construcción que altera el régimen constante de humedad del suelo. Movimientos estacionales se denominan a aquellos producidos por el cambio de humedad del suelo al cambiar el clima de un periodo de sequedad a un periodo lluvioso y viceversa, produciendo deformaciones periódicas en el suelo por lo que hay una redistribución constante de los esfuerzos en el diseño del terraplén y son relativamente más dañinos que los movimiento irreversibles.

La combinación de estos movimientos produce una gran variedad de patrones en la forma que adoptara la superficie del terreno, a pesar de que se producen generalmente en forma errática, adquieren configuraciones características que se presentan

 **En forma de domo.-** Se caracterizan por un incremento del volumen del suelo hacia la parte central del terraplén.

 **En forma cíclica.-** Cuando se alternan movimientos debidos a expansión y contracción del suelo por cambios de estaciones secas a húmedas, causando que la humedad del perímetro del terraplén cambie periódicamente.

2.3.5. Mecanismos que generan cambio volumétrico

La expansión es el resultado de cambios en el sistema agua – suelo, que distorsionan el equilibrio interno de esfuerzos. Los factores que influyen en el potencial de expansión o contracción del suelo pueden ser considerados en tres grupos:

- Las características del suelo, que influyen la naturaleza básica del campo de fuerzas interno.
- Los factores ambientales que influyen los cambios que pueden ocurrir en el sistema de interno.
- El estado de esfuerzos, que restringe el movimiento.

En la siguiente tabla se observan los principales factores que influyen en el potencial contracto – expansivo de suelos, entendiéndose aquí expansión como el hinchamiento o aumento de volumen con la humedad y contracción como la reducción de volumen.

.

Tabla N°2 Factores que influye en el potencial de expansión y contracción del suelo.

FACTOR	DESCRIPCION
Mineralogía de la arcilla	Los minerales de arcilla que son la causa de los cambios de humedad son, las mormorillonitas y las versiculitas, frecuentemente no son expansivas, pero pueden causar cambios de volumen si sus partículas son extremadamente finas
Química del agua del suelo	Se presenta menor expansión para elevada concentración de cationes e incremento en la valencia de los cationes
Succión del suelo	La succión del suelo es una variable dependiente del estado de esfuerzos efectivos, representado por la presión de poros negativa en suelos no saturados. La succión del suelo se relaciona con la gravedad, la saturación, forma y tamaño de poros, tensión superficial y con las características químicas y eléctricas de las partículas de suelo y agua
Plasticidad	En general los suelos que exhiben un comportamiento plástico dentro de un amplio rango de humedades y tienen líquido alto, tienen gran potencial de expansión y contracción. La plasticidad es un indicador del potencial de expansión
Fabrica y estructura del suelo	Arcillas de estructura flocculenta tienden a ser más expansivas que las de estructura dispersa. Partículas cementadas reducen la expansión. La fábrica y la estructura son alteradas por compactación a altos contenidos de humedad o remoldeo. Se ha determinado que la compactación por amasado crea estructura dispersa con menor potencial de expansión que los suelos compactados estáticamente a bajas humedades
Peso Unitario Seco	Usualmente los altos pesos unitarios indican un espacio interparticular cerrado, con elevadas fuerzas de repulsión entre partículas y gran potencial de expansión.
Condición de humedad inicial	Un suelo expansivo tiene alta succión o afinidad por el agua, cuando está en estado seco y baja cuando está en estado húmedo. Contrariamente, un suelo húmedo pierde agua más rápidamente al exponerlo a secado y se contrae más que uno que este inicialmente seco.
Variaciones de humedad	Cambios de humedad en la zona activa, cerca de la superficie, generan la expansión del suelo
clima	La cantidad y variación de precipitación y evapotranspiración determinan la variación de humedad con la profundidad y la fluctuación de humedades en cada

	estación.
Agua subterránea	El nivel freático poco profundo mantiene húmedo el suelo en la zona activa.
Drenaje y cursos de aguas superficiales	Encharcamientos, escapes en redes de drenaje, pueden incrementar la humedad del suelo
Vegetación	Árboles, arbustos, reducen la humedad del suelo a través de la transpiración y causan en el suelo diferenciales de humedad con la variación de vegetación
permeabilidad	Suelos con altas permeabilidades, particularmente debido a fisuras y fracturas en el perfil de la masa de suelo producen una rápida migración de agua y promueven rápidos cambios de expansión
temperatura	Incrementos de temperatura causan diferenciales en la humedad entre el suelo bajo las construcción y pavimento, con aquel que no se encuentra cubierto.
Condiciones de esfuerzos (historia de esfuerzos)	Un suelo sobreconsolidado es más expansivo, que el mismo suelos con la misma relación de vacíos, pero normalmente consolidado. La presión de expansión puede incrementarse en una arcilla compactada al transcurrir grandes periodos de tiempo, pero la cantidad de expansión no se ve afectada con el tiempo.
Cargas	La magnitud de la sobrecarga determina la cantidad de cambio de volumen que puede ocurrir, para un contenido de humedad y densidad dadas. Las cargas externas aplicadas, ayudan a balancear las fuerzas de repulsión interparticular reduciendo la expansión.
Perfil del suelo	Los espesores y ubicación de las capas potencialmente expansivas dentro del perfil estratigráfico, influyen en el potencial expansivo. Los grandes movimientos se presentan solo en aquellos estratos con arcillas expansivas ubicadas dentro de la zona activa.

Fuente: BAREÑO & RODRIGUEZ (1999)

2.3.6. Como identificar un suelo potencialmente expansivo

Las formas principales de identificación de un suelo potencialmente expansivo son:

- a) Identificación Mineralógica
- b) Determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos
- c) Métodos indirectos de determinación del potencial expansivo del suelo
- d) Medidas directas de la expansión del suelo

a) Identificación Mineralógica

-  Difracción por rayos X
-  Análisis Térmico Diferencial
-  Análisis de absorción de colorantes
-  Análisis químicos
-  Análisis por microscopio electrónico

Los tres grupos más importantes en que se clasifican los minerales arcillosos son: illita, caolinita y montmorillonita, compuestos por hidroaluminosilicatos. Los ensayos mineralógicos tienden a detectar la presencia de montmorillonita, que es el mineral preponderantemente expansivo.

La presencia de cargas eléctricas negativas en la superficie de los minerales arcillosos, así como la capacidad de intercambio catiónico resultan fundamentales para la magnitud de la expansión.

Los ensayos de identificación mineralógica resultan muy usados en trabajos de investigación científica, pero resultan poco prácticos y antieconómicos para la práctica usual en ingeniería, dado que se requiere equipamiento y personal especializado. Es por este motivo que no se extiende en su desarrollo.

b) Determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos

A través de la medida de ciertas propiedades básicas y sencillas de los suelos se puede determinar el grado del potencial expansivo del suelo.

Las propiedades a determinar son:

- ✓ Límite líquido y Límite Plástico
- ✓ Límite de contracción
- ✓ Contenido de coloides
- ✓ Expansión libre del suelo

Estos métodos tienen la ventaja de su fácil realización y de equipamiento disponible en todos los laboratorios. La desventaja es que no se cuantifica la expansión, sino que cualitativamente se establecen categorías de grados del potencial expansivo.

- ***Límite Líquido y Límite Plástico***

Investigadores como Seed, Woodward y Lundgren demostraron que las características plásticas de los suelos pueden ser usados como un indicador primario de la características expansivas de las arcillas.

Es natural pensar en una relación como la antes mencionada ya que ambas dependen en la cantidad de agua que una arcilla absorbe.

La relación entre las características plásticas y el hinchamiento de los suelos puede establecerse como indica la siguiente tabla.

Tabla N° 3 Determinación de Suelo Expansivo

Grado de Potencial Expansivo	Índice Plástico
Bajo	0 - 15
Medio	10 - 35
Alto	20 - 55
Muy Alto	> 35

Si bien es cierto que todos los suelos altamente expansivos tienen plasticidades altas, no es cierto que los suelos con elevada plasticidad sean necesariamente expansivos.

- ***Contenido de Coloides***

Dentro de los materiales que tiene un tamaño inferior a 74 micras están los limos y las arcillas. Desde el punto de vista del tamaño se considera arcillas aquellos materiales que tienen un tamaño inferior a 2 micras (0.002 mm), siendo necesario para su determinación la realización de un ensayo hidrométrico.

La magnitud de la expansión que experimenta una arcilla está vinculada con la cantidad de partículas de tamaño arcilla presente en el suelo.

Se ha establecido una relación del tipo:

$$S = K * C^x$$

Dónde:

S = Hinchamiento potencial, expresado como % del hinchamiento de una muestra compactada a la humedad óptima y al P.U.S.M. según Proctor Estándar.

C = Porcentaje de fracción arcilla (partículas menores a 0.002 mm).

x = exponente que depende del tipo de arcilla

k = Coeficiente que depende del tipo de arcilla.

x y k, que indican el tipo de partículas coloidales presentes se determinan a través de ensayos difracción por rayos X.

- ***Determinación de la expansión Libre***

Este ensayo consiste en colocar en una probeta normalmente cilíndrica un volumen conocido de suelo “seco” y sumergirlo en agua sin aplicación de sobrecarga alguna, mientras se mide la expansión. La diferencia entre el volumen final e inicial, expresado como un porcentaje del volumen inicial es la expansión libre.

Esta medida de la expansión se realiza en condiciones muy desfavorables, ya que se hace en condiciones de ninguna sobrecarga y hoy en día se utilizan métodos más adecuados a tales efectos. Experimentos realizados por Holtz indican que una arcilla como la bentonita comercial puede tener en este ensayo expansión del orden de 1200 a 2000 %. Holtz sugiere que las expansiones medidas en este ensayo por encima del 100 % pueden causar daños significativos a la estructura, mientras que suelos que alcanzan una expansión por debajo del 50 %, rara vez experimentan cambios de

volúmenes apreciables bajo la aplicación de cargas estructurales, aun cuando estas sean provenientes de estructuras livianas.

c) **Métodos indirectos de determinación del potencial expansivo del suelo**

Estos métodos consisten en predecir el potencial expansivo del suelo de una forma cualitativa, en base a medidas directas de la expansión del suelo sobre muestras remoldeadas compactadas en condiciones prefijadas de humedad y densidad.

Los métodos más utilizados son el de “Ladd y Lambe” auspiciado por la Federal Housing Administration y el método de “PVC” o método de la medida del cambio volumétrico.

d) **Medidas directas de la expansión del suelo.**

Estos métodos consisten en medir la expansión del suelo al saturarlo bajo diferentes condiciones de carga, graficándose las variaciones de hinchamiento para diferentes presiones aplicadas.

Es universalmente aceptado que los dos parámetros que definen el Potencial de Hinchamiento son:

- ***Presión de hinchamiento (P_s)***: Definida como la presión aplicada en laboratorio sobre una muestra de suelo expansivo para que, una vez en contacto con agua, la probeta mantenga constante su volumen inicial, es decir que la variación de volumen sea nula.
- ***Hinchamiento libre (H_c)***: Definido como el % de la elevación máxima para presión nula en relación a la longitud inicial de la probeta.

Si bien estos métodos constituyen el procedimiento más adecuado para predecir la expansión del suelo, además de las dificultades señaladas, tienen el inconveniente de requerir un equipamiento bastante completo (celdas de cargas, pesas, etc.), no disponibles en los laboratorios de uso común en ingeniería.

2.3.7. Exploración de los suelos expansivos

Se recomienda realizar un reconocimiento previo de la zona donde se pretende realizar la construcción del terraplén en subrasante expansivas, para obtener información para el diseño y buen funcionamiento.

En esta inspección también es muy útil y necesario recabar información de los antecedentes del terreno tales como la presencia anterior de bosques o zonas de vegetación espesa, estanques, lagunas, depresiones, antiguos recorridos de agua, canales de riego, etc. Las zonas boscosas o con mucha vegetación tienden a disminuir la humedad del suelo, por lo tanto en las áreas donde efectuaron talas o desmontes se incrementa el contenido de humedad del suelo.

Las zonas donde había estanque o depresiones suelen ser rellenados con material sedimentario, probablemente arcillas expansivas.

2.2.7.1 Exploración Superficial

Para el reconocimiento visual se deberá prestar mucha atención a los siguientes factores.

- La presencia de árboles o vegetación espesa que hayan sido talados recientemente o serán talados para la construcción, generaran inestabilidad en la humedad del terreno.
- La presencia de zonas pantanosas o de estanques en las inmediaciones son sinónimo de presencia de suelos altamente plásticos con tendencia a hincharse. Además de estos factores, el tipo de inspección que se realizara depende en gran medida de si la zona esta urbanizada o no.

2.4. ARCILLAS.

2.4.1. Generalidades de los Suelos Arcillosos

Se denominan suelos arcillosos a los suelos de grano muy fino, producto de la meteorización química de las rocas, lo cual hace que posean comportamiento altamente activo y generan plasticidad al ser mezclados con agua.

Se puede definir a la **Arcilla** como, suelo o roca sedimentaria, plástica y tenaz cuando se humedece. Se endurece permanentemente cuando se cuece o calcina. De gran importancia en la industria, la arcilla se compone de un grupo de minerales aluminosilicatos formados por la meteorización de rocas feldespáticas, como el granito. El grano es de tamaño microscópico 2 mm. Y con forma de escamas. Esto hace que la superficie de agregación sea mucho mayor que su espesor, lo que permite un gran almacenamiento de agua por adherencia, dando plasticidad a la arcilla y provocando la hinchazón de algunas variedades

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 mm. Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan los 2 mm. Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

2.4.2. Origen de las arcillas

Los factores formadores del suelo determinan acciones físicas y químicas que transforman la roca original. Las primeras desmenuzan el material, originando arenas, quien mantiene sin mayores modificaciones las características del material parental. La arena gruesa está constituida por trozos de roca en los cuales persiste gran parte de los minerales originales. La arena fina contiene, sin embargo, separados o individualizados los constituyentes de la roca madre, con excepción de aquellos muy susceptibles al ataque químico. Es raro, por ejemplo, encontrar olivinos, piroxenos ni o anfíboles en la arena fina luego de acciones de meteorización relativamente intensas.

Mineralógicamente, el limo es una fracción menos definida ya que está constituido por productos provenientes de la desintegración física y de la alteración química. Aunque en su constitución domina el cuarzo y los feldespatos, éstos están en menor proporción que en la arena; además, contiene generalmente una pequeña cantidad de minerales secundarios, hidróxidos de hierro y productos intermediarios de la alteración de los minerales primarios originales.

La arcilla los suelos está constituida por productos derivados de la meteorización química, minerales amorfos o cristalinos, principalmente de neosíntesis o secundarios, con alguno o ninguna semejanza al material original. También puede ser heredada directamente del material parental como cierta transformación. La fracción gruesa de la arcilla ($\Phi=2.0\mu$ a 0.2μ) contiene, generalmente, algunos minerales primarios (cuarzo, feldespato, mica).

2.4.3. Propiedades de las arcillas

Desde el punto de vista de la ingeniería, la característica más importante de los minerales arcillosos es su forma laminar. Varias propiedades se asocian con este

factor, sin embargo existen otras propiedades que son importantes al momento de estudiar el comportamiento de los minerales arcillosos.

- **Superficie específica.-** Relación entre el área superficial y el peso de la partícula. ($800 \text{ m}^2/\text{g}$ en las Montmorillonitas, 40 % de contenido de agua)
- **Carga superficial de absorción.-** Los iones que forman la superficie laminar de los minerales de arcilla son O^{2-} u $(\text{OH})^-$, por lo que dichas superficies presentan carga eléctrica negativa. Puesto que las moléculas de agua son bipolares, se forma una capa que queda adherida a la superficie de la partícula por enlaces de hidrogeno. Esta capa corresponde al agua absorbida, con propiedades muy diferentes a las del agua libre.
- **Capacidad de intercambio básico.-** Remanente de carga eléctrica negativa no se neutralizan por cationes internos, por enlaces con agua o por cationes del agua adsorbida.
- **Estructura.-** Entre las partículas de arcilla se desarrollan fuerzas debido a la atracción electroquímica o fuerzas de Van der Waals y de repulsión debido a las cargas negativas en superficie. Esto da origen a que las partículas se atraigan o se dispersen, generando estructuras características: Floculadas (contacto positivo-negativo) o dispersas (contacto lamina-lamina).
- **Expansión y contracción.-** Cuando se incorpora agua a la estructura laminar de los minerales arcillosos, estos tienden a ganar volumen, generando presiones de expansión se el cambio es restringido, en caso contrario, al extraer agua se pueden generar contracciones, lo cual se traduce en algunos suelos en cuarteaduras a nivel de superficie.

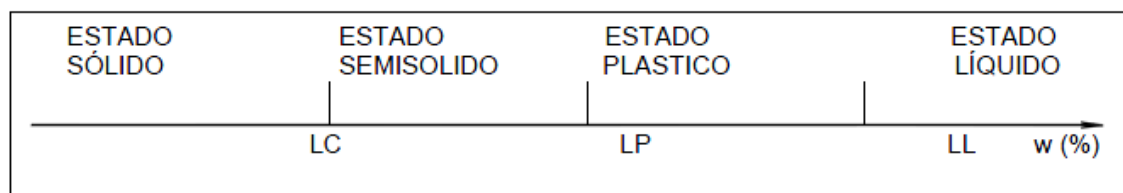
2.4.4. Propiedades índices de los suelos arcillosos

Algunas características de los suelos se pueden correlacionar con su comportamiento, estas permiten realizar una clasificación o describir su aptitud para un determinado fin. En suelos finos arcillosos, las principales propiedades índices están relacionadas con la presencia de agua y el comportamiento de los minerales que componen el suelo.

- a) **Forma y tamaño de las partículas.** Corresponden a materiales que pasan por el tamiz N° 200 y poseen formas laminares, lo cual genera una gran atracción de agua hacia las superficies cargadas eléctricamente.
- b) **Consistencia y plasticidad.** Se entiende por consistencia el estado físico que presenta un material dependiendo del contenido de agua. La consistencia del suelo, resulta básicamente de dos fuerzas que son: la cohesión (o atracción molecular) y la adhesión (o tensión superficial).

En suelos arcillosos se identifican algunos estados característicos, definidos por Attemberg (1948) y Casagrande. Este último definió las fronteras entre cada estado, denominadas Límites de Consistencia (Limite Liquido, LL, Limite plástico, LP y límite de contracción, LC, definiendo también procedimientos estandarizados para su determinación, figura N°1

Figura N°5 Estados y límites de consistencia para un suelo fino



Fuente: BAREÑO Y RODRIGUEZ (1999)

La plasticidad se refiere a la capacidad de cambio de forma, por cambio en la condición de esfuerzos, a volumen constante. Depende de la composición mineralógica y del grado de humedad.

El índice de plasticidad (IP), corresponde a una medida preliminar de la plasticidad del suelo, se define como:

$$IP = LL - LP$$

Dónde: LL, es el límite líquido, y LP, se refiere al límite plástico.

- c) **Actividad (A).** Relación de tipo y cantidad de minerales arcillosos, siendo constante para un material dado, fue definida por Skempton (1953).

$$A = \frac{IP}{\% \text{ en peso menor de } 2 \mu m}$$

- d) **Consistencia inalterada.** Descripción del estado de firmeza que presenta un material cuando no ha existido remoldeo o alteración de su estructura. Se determina a partir del valor de resistencia en el ensayo de compresión simple o confinada.
- e) **Sensitividad (S_T).** Medida en la cual el remoldeo modifica la resistencia a la compresión (q_u) del suelo.

$$S_T = \frac{q_u \text{ inalterada}}{q_u \text{ remoldeada}}$$

2.4.5. Esfuerzos en los suelos arcillosos.

Los esfuerzos en una masa de suelos arcillosos están influenciados por diferentes factores, tales como: compacidad del suelo, contenido de humedad, plasticidad, permeabilidad, etc., que hace el análisis más complejo de lo que, se utiliza en otros materiales homogéneos, como los metales, donde los esfuerzos dependen directamente de la carga aplicada, pudiendo ser estos esfuerzos, de compresión o flexión.

En los suelos se definen dos tipos de esfuerzos, primero los esfuerzos que son producto de la aplicación de cargas a una porción de suelo y segundo, los esfuerzos internos o esfuerzos de contacto que son esfuerzos en los puntos de contacto entre partículas, siendo estos de tipo microscópicos.

2.4.6. Deformaciones en los suelos arcillosos.

Las deformaciones en los suelos, están ligadas al concepto de esfuerzos que pueden ser inducidos por cargas aplicadas. Los movimientos de las partículas en una masa de

suelos son difíciles de explicar ya que, dependen de factores propios del tipo de suelo y sus propiedades a analizar, tales como la plasticidad, granulometría, cohesión, compacidad; además de las condiciones a que estén sometidos tales como el contenido de humedad del suelo; pero su análisis por modelos sencillos sirven para explicar los procesos complejos que se dan en una masa de suelo real.

Las deformaciones experimentadas por un elemento de suelos son el resultado de las deformaciones internas y los movimientos relativos entre las numerosas partículas que componen dichos suelo. Existen dos mecanismos, en suelos granulares, que son responsables de la deformación bajo carga: la distorsión y fracturas de las partículas y el movimiento relativo de las partículas como el resultado del deslizamiento y fractura.

Generalmente estos mecanismos se efectúan al mismo tiempo; las partículas tienden a fracturarse aumentando el número de vacíos, los cuales son ocupados por los fragmentos pequeños, acomodándose en la masa de suelo, ocasionando una disminución de volumen.

2.4.7. Influencias del agua sobre las arcillas.

La estructura de las moléculas de arcillas está formada por tetraedros y octaedros que posee en su centro iones de silicio y aluminio y en los vértices cargas negativas de iones "O" u "OH".

Esta actividad electroquímica es lo que hace inestable las propiedades de las arcillas cuando son expuestas a la humedad. Así, cuando una arcilla es sometida al contacto del agua, las cargas electroquímica negativas superficiales de los granos atraen el hidrógeno de las moléculas de agua orientando los definitivamente, a este fenómeno se le llama atracción de superficie. Esta atracción forma una película de agua alrededor de cada partícula. Debido a su diminuto tamaño y por consiguiente al valor elevado de la superficie específica de estos suelos, el grueso de esta película es tal, que el agua actúa como un lubricante separando las partículas del material, con el consecuente aumento de volumen y plasticidad (que es la características de un suelo

de deformarse sin agrietarse ni aumentar su volumen significativamente, y no recuperar su forma original al aplicarle y retirarle una carga externa).

Los cambios de humedad influye en la estabilidad de los suelos, expandiéndolos o contrayéndolos, esto es perjudicial para cuando soportan pesos de estructuras, principalmente; debido a la reducción de los esfuerzos generados al incrementarse la humedad o el agrietamiento por pérdidas de humedad, ya que en ambos casos puede ocasionar deterioro.

2.5. Clasificación de Suelos

La determinación y cuantificación de las diferentes propiedades de un suelo, tienen como objetivo último el establecimiento de una división sistemática de los diferentes tipos de suelos existentes atendiendo a la similitud de sus caracteres físicos y sus propiedades geomecánicas.

Una adecuada y rigurosa clasificación permite al Ingeniero tener una primera idea acerca del comportamiento que cabe esperar de un suelo como cimiento del firme, a partir de propiedades de sencilla determinación; normalmente, suelo ser suficiente conocer la granulometría y plasticidad de un suelo para predecir su comportamiento mecánico. Además, facilita la comunicación e intercambio de ideas entre profesionales del sector, dado su carácter universal.

De las múltiples clasificaciones existentes, estudiaremos la clasificación de Casagrande Modificada- y otras de aplicación más directa en Ingeniería de carreteras como son la empleada por la AASHTO.

2.5.1. Clasificación general de Casagrande modificada.

Fue A. Casagrande quien en 1942 ideó este sistema genérico de clasificación de suelo, que fue empleado por el cuerpo de Ingenieros del ejército de los E.E.U.U. para la construcción de pistas de aterrizaje durante la II Guerra Mundial.

Diez años más tarde y en vista la gran utilidad de este sistema en Ingeniería Civil, fue ligeramente modificado por el Bureau of Reclamation, naciendo en SISTEMA

UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS (SUCS), este sistema fue adoptado por la ASTM (American Society of Testing Materials) como parte de sus métodos normalizados.

Dicha clasificación se vale de símbolos de Grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades. En el siguiente esquema se muestran dichos símbolos y su significado:

Tabla N°4 Clasificación Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrementemente Graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Limite liquido >50	L
Turba	Pt	Limite liquido <50	H

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo:

Tabla N°5 Clasificación Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Descripción de los símbolos

SIMBOLO	CARACTERÍSTICAS GENERALES		
GW	Gravas (>50 % en Tamiz N° 4)	Limpias	Bien graduadas
GP		Finos<5%	Pobremente graduadas
GM		Con finos	Componente limoso
GC		Finos>12%	Componente arcilloso
SW	Arenas (<50 % en Tamiz N° 4)	Limpias	Bien graduadas
SP		Finos<5%	Pobremente graduadas
SM		Con finos	Componente limoso
SC		Finos>12%	Componente arcilloso
ML	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	SUELOS ORGANICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	Turba	Suelos Altamente Orgánicos	

Como puede deducirse de la anterior tabla, existe una clara distinción entre los tres grandes grupos de suelos:

- Suelos de grano grueso (G y S): Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido en finos, empleando el tamiz N°200.
- Suelos de grano fino (M y C): Formados por suelos con al menos un 50% de contenido en limos y arcillas.
- Suelos orgánicos (O, Pt): Constituidos fundamentalmente por materia orgánica. Son inservibles como terreno de cimentación.

Así mismo, dentro de la topología expuesta pueden existir casos intermedios, empleándose una doble nomenclatura; por ejemplo, una grava bien graduada que contenga entre un 5 y un 12% de finos se clasificara como GW-GM.

Tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el Limite Liquido (LL)

con el Índice de Plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la **Carta de Casagrande** de los suelos cohesivos, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites.

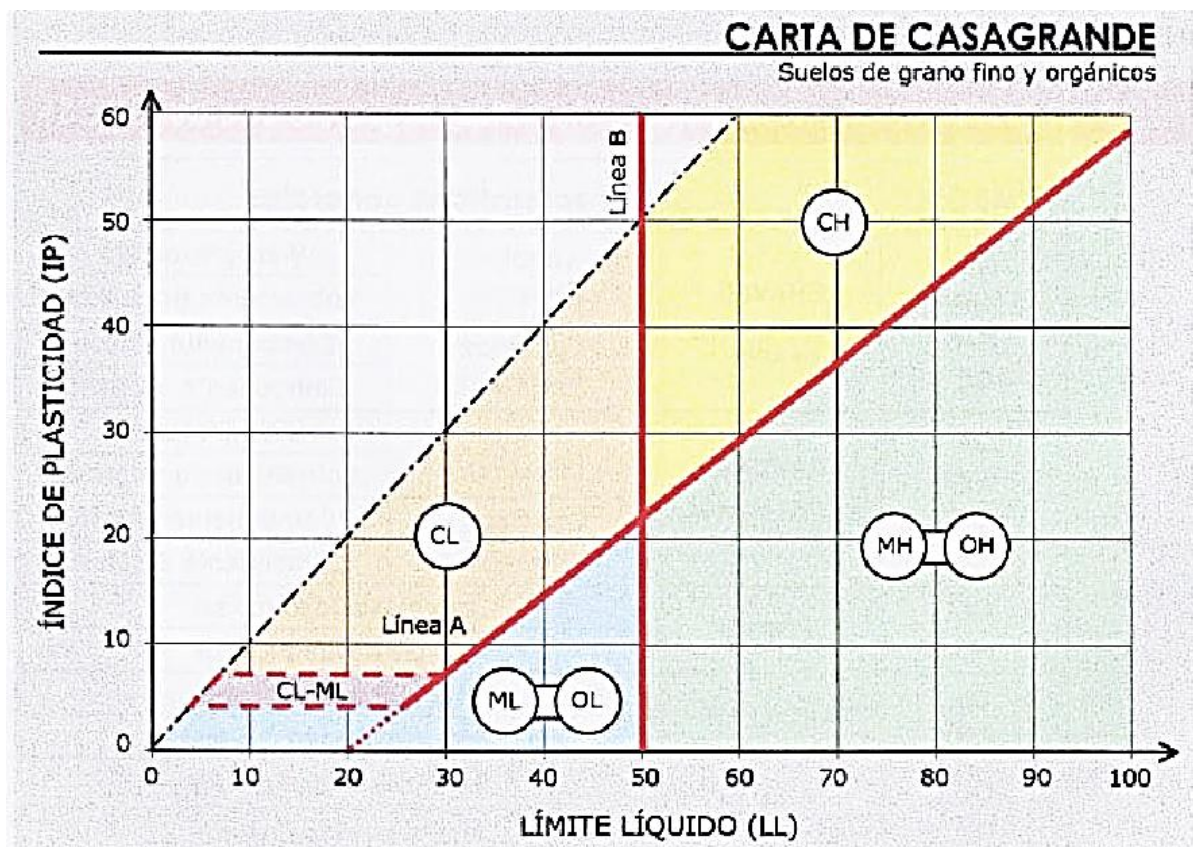


Figura N°6 Carta de Casagrande para los suelos cohesivos

Tabla N°6 Características de los suelos según SUCS.

CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS SEGUN SUCS						
DIVISIONES PRINCIPALES		SIMBOLO	COMPORTAMIENTO MECANICO	CAPACIDAD DE DRENAJE	Densidad Optima P.M.	C.B.R In situ
SUELOS DE GRANO GRUESO	Gravas	GW	Excelente	Excelente	2.00 - 2.24	60 - 80
		GP	Bueno a excelente	Excelente	1.76 - 2.08	25 - 60
		GM	Bueno a excelente	Aceptable a mala	2.08 - 2.32	40 - 80
			Bueno	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
		GC	Bueno	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
	Arenas	SW	Bueno	Excelente	1.76 - 2.08	20 - 40
		SP	Aceptable a Bueno	Excelente	1.60 - 1.92	10 - 20.
		SM	Aceptable a Bueno	Aceptable a mala	1.92 - 2.16	20 - 40
			Aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	10 - 20
		SC	Malo a aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	20 - 40
SUELOS DE GRANO FINO	Limos y	ML	Malo a aceptable	Aceptable a mala	1.60 - 2.00	5 - 15
	arcillas	CL	Malo a aceptable	Casi impermeable	1.60 - 2.00	5 - 15
	(LL < 50)	OL	Malo	Mala	1.44 - 1.70	4 - 8
	Limos y	MH	Malo	Aceptable a mala	1.28 - 1.60	4 - 8
	arcillas	CH	Malo a aceptable	Casi impermeable	1.44 - 1.76	3 - 5
	(LL > 50)	OH	Malo a muy malo	Casi impermeable	1.28 - 1.68	3 - 5
SUELOS ORGANICOS		Pt	Inaceptable	Aceptable a mala	-	-

2.5.2. Clasificación de la AASHTO

Ha sido en Estados Unidos donde se han desarrollado la mayor parte de clasificaciones empíricas de suelos. Una de las más populares en carreteras es la empleada por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), y que fue originalmente desarrollada por los ilustres geotécnicos Terzaghi y Hogentogler para el Bureau of Public Roads Norteamericano.

Un enfoque general, se basa en que esta clasificación toma de mano la granulometría y la plasticidad de un suelo como las características principales para poder definir asociaciones que obedecen a rangos empíricos de clasificación.

En esta clasificación los suelos se dividen en siete grupos, de acuerdo a la composición granulométrica, el límite líquido y el índice de plasticidad de un suelo. El índice de grupo es más una evaluación de cada grupo, que se calcula mediante una formula empírica.

- *Material granular con el 35% o menos del total que pasa el tamiz N°200.*

Grupo A-1: Son mezclas bien graduadas, compuestas por piedra, grava, arena y poco o casi nada de material fino, (denominado material ligante).

Subgrupo A-1-a: Es bien graduado, predomina la piedra y grava, casi no tiene ligante.

Subgrupo A-1-b: Es bien graduado, predomina las arenas gruesas, casi no tiene ligante.

Estos materiales generalmente se encuentran en ríos y quebradas.

Grupo A-2: Contiene menos del 35% del material fino.

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

Son gravas y arenas gruesas, que contienen limo y arcilla en cantidades reducidas cuya plasticidad es baja, pero que excede al grupo A-1, también incluye la arena fina con limos no plásticos que se describirán en el grupo A-3.

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

Grupo A-3: Son arenas finas conteniendo limos no plásticos, algunas veces pueden contener poca grava y arena gruesa.

- *Material limo arcilloso, más del 35% del total pasa el tamiz N°200.*

Grupo A-4: Son suelos limosos, poco o nada plásticos, puede contener más de un 75% del material que pasa el tamiz N°200.

Grupo A-5: Son similares al anterior, pero contiene un material micáceo, que hace que el límite líquido a veces sean elevados, además de aparecer una propiedad elástica rara en los suelos.

Grupo A-6: predomina la arcilla, más del 75% del material pasa el tamiz N°200, este suelo suele contener pequeños porcentajes de arena fina y limo cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla.

Grupo A-7: Se parecen mucho al grupo A-6. Pero estos tienen propiedades elásticas, además del límite líquido casi siempre es elevado.

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

Subgrupo A-7-6: Sus índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos, además presentan grandes cambios de volumen entre sus estados secos y húmedos.

Para una mejor comprensión se presenta la siguiente tabla para la clasificación AASHTO.

Tabla N°7 Clasificación según AASHTO.

CLASIFICACIÓN AASHTO												
CLASIFICACIÓN GENERAL	MATERIALES GRANULARES (igual o menor al 35 % pasa el tamíz nro. 200)							MATERIALES LIMO- ARCILLOSOS (más del 35% pasa el tamíz nro. 200)				
GRUPOS	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
SUB GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	
											A-7-6	
% pasa el tamiz												
N° 10	50 máx											
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.									
N° 200	15 máx.	25 máx	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	
Características del material que pasa el tamiz N° 40												
Límite Líquido			NO	40 máx	41 mín.	40 máx	41 mín.	40 máx	41 mín.	40 máx	41 mín.	
Índice de Plasticidad	6 máx	6 máx	PLÁSTICO	10 máx	10 máx	11 mín.	11 mín.	10 máx	10 máx	11 mín.	11 mín.	
Índice de grupo	0	0	0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx.	12 máx.	16 max.	20 máx.	
Tipos de material	Fragmentos de grava y area		Arena Fina	Grava, arena limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos		
Terreno de fundación	Excelente a Bueno					Regular a Deficiente						

- *Índice de Grupo.*

Es un factor de evaluación, que se determina la calidad del suelo a través de características similares en grupos de suelos, el índice de grupo es muy importante en el diseño de espesores, inclusive un método lleva el mismo nombre.

La siguiente formula determina el índice de grupo:

$$IG = (0.2 * a) + (0.005 * a * c) + (0.01 * b * d)$$

Dónde:

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

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

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

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

Considerando que cualquier factor pudiese salir negativo, este se asume con el valor de cero. Los máximos valores de índice de grupo se encuentran en la tabla de clasificación.

2.5.3. Determinación del Potencial de expansión

El potencial de expansión de un suelo puede determinarse mediante los límites de Atterberg y la succión natural del suelo, Usando estas propiedades índices y con la ayuda de la Tabla No. 1, se puede determinar cualitativamente el potencial expansivo del suelo.

Tabla N°8 Grado de expansión

Grado de Expansión	LL %	IP %	τ nat (Ton/pie2)
Elevado	>60	>35	>4
Marginal	50 - 60	25 - 35	1.5 - 4
Bajo	<50	<25	<1.5

Fuente: Determinación de suelos expansivos I.N.V. E – 132

Tabla N°9 Grado de Potencial expansivo.

Grado de potencial expansivo	Índice Plástico
Bajo	0 - 15
Medio	10 - 35
Alto	20 - 55
Muy Alto	>35

Fuente: Ings. Julio Patrone y José Enrique Prefumo Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo

Puede también definirse el Potencial de Cambio Volumétrico (PCV), a partir del Índice de Plasticidad y del Límite de Contracción, de acuerdo con los valores de la Tabla No. 10 según Holts y Gibbs (1956).

Tabla N°10 Potencial de Cambio Volumétrico

PCV	IP		Límite de Contracción
	Zona Seca	Zona Húmeda	
Bajo	0 - 15	0 - 30	>12
Moderado	15 - 30	30 - 50	10 - 12
Alto	>30	>50	<10

Fuente: Ings. Julio Patrone y José Enrique Prefumo Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo

2.6. Análisis Mecánico de los Suelos.

El análisis mecánico del suelo es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje de peso seco total. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas del suelo.

Tenemos el análisis por cribado, para tamaños de partículas mayores de 0.075 mm de diámetro, y el análisis por hidrómetro, que se utiliza para partículas menores a 0.075 mm de diámetro.

A continuación describiremos brevemente de que se trata cada análisis

2.6.1. Análisis por cribado

Este análisis por cribado consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de tamices que tienen diferentes aberturas progresivamente más pequeñas, los números de las mallas estándar con sus tamaños de aberturas son las siguientes.

Tamiz	Abertura (mm)
2"	50.8
1 ½"	38.10
1"	25.4
¾"	19
½"	12.5
3/8"	9.5
Nº4	4.75
Nº10	2
Nº40	0.0425
Nº200	0.075

Tabla N°11 Tamaños de las mallas según la norma A.S.T.M

Primero debemos secar el suelo al horno y luego todos los grumos se disgregan en partículas pequeñas, antes de ser pesados por las mallas, pasamos luego a colocar los tamices con la muestra en el vibrador, después de que este periodo termine se determina la masa del suelo retenido en cada malla.

Cuando tenemos suelos cohesivos, resulta difícil disgregar los grumos en partículas individuales. En tal caso se mezcla con agua para formar un 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 N° 7 Juego de Tamices y vibrador para el análisis por cribado



2.6.2. Análisis Hidrométrico.

Este método está basado en el principio de la sedimentación de granos de suelo y agua, cuyo tamaño de las partículas es menor a 0.075 mm de diámetro, 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:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\mu} D^2$$

Dónde:

v = Velocidad

ρ_s = Densidad de las partículas de suelo.

ρ_w = Densidad del agua.

D = Diámetro de las partículas del suelo.

Dado que la densidad del agua es igual a 1 gr/cm³ podemos decir que:

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

Dónde:

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

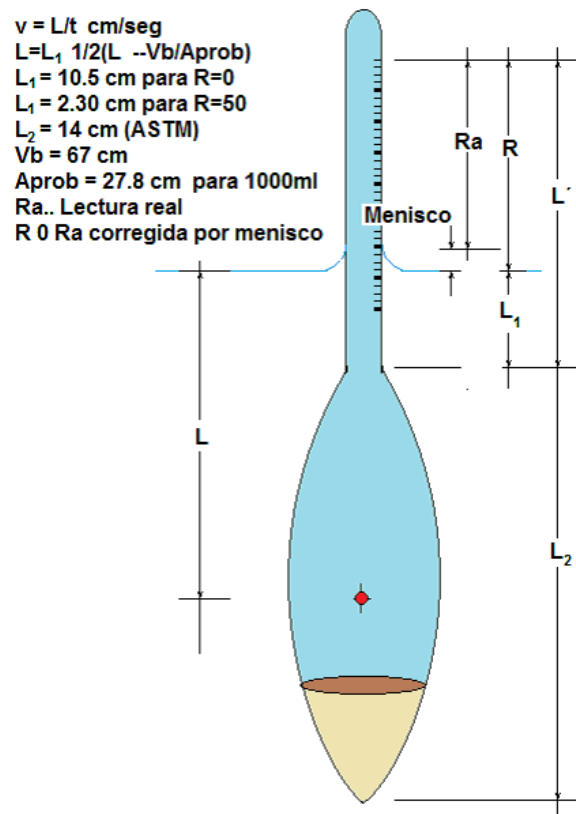
Donde el valor de K está en función de μ y G_s , que son dependientes de la temperatura de prueba.

En el laboratorio, esta prueba se conduce en una probeta de sedimentación con muestra secada al horno de aproximadamente 80 gramos. La probeta está marcada para un volumen de 1000 ml, como agente dispersador se usa generalmente sulfato de sodio. El volumen de la suspensión de suelo dispersado se lleva hasta los 1000 ml añadiendo agua destilada.

Cuando se coloca el hidrómetro en la suspensión de suelo (figura N°9) en el tiempo t , medido desde el principio de la sedimentación, mide la densidad de los sólidos a una profundidad L . la densidad de solidos 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 un diámetro menor que D , calculado, las partículas grandes se abran asentado más allá de la zona de medición.

Los hidrómetros están diseñados para dar la cantidad de suelo, en gramos, aun en suspensión. Ya conocidos la cantidad de peso en suspensión, L y t , podemos calcular el porcentaje de suelo mas fino que un cierto diámetro. Note que L es una profundidad medida desde la superficie del agua hasta el centro de gravedad del bulbo del hidrómetro donde se mide la densidad en suspensión.

Figura N°8 Hidrómetro



2.7.Compactación de 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.

2.7.1. 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:

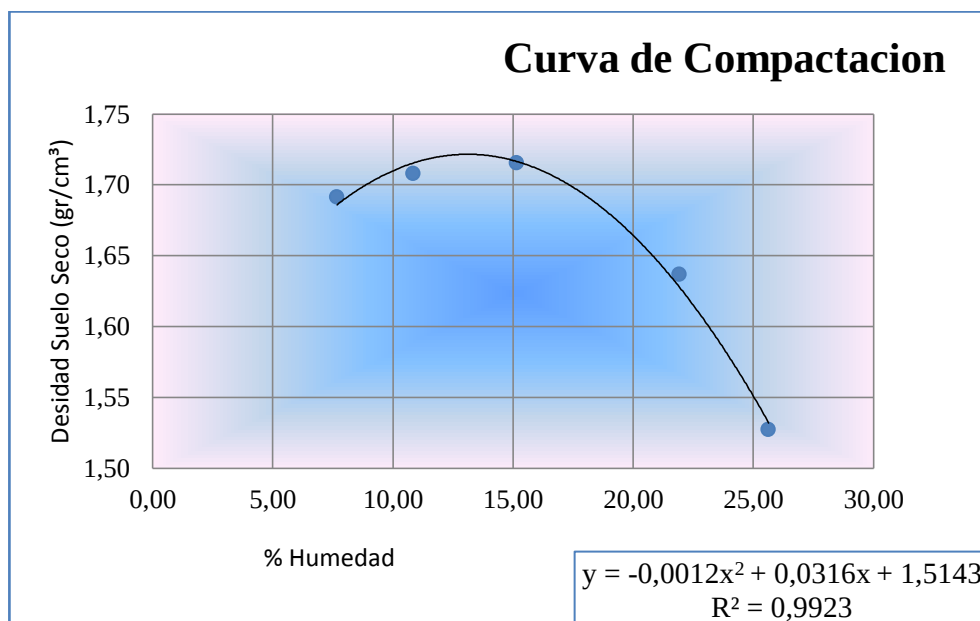
- Las cargas de trafico
- Peso propio del firme
- El agua infiltrada provocada por la variación de la humedad a lo largo del tiempo.

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 N°9

. Figura N°9 Curva de Compactación



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 al aumentar el 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.

2.7.2. 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 usan 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.

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

Dónde:

E = Energía de compactación por volumen unitario

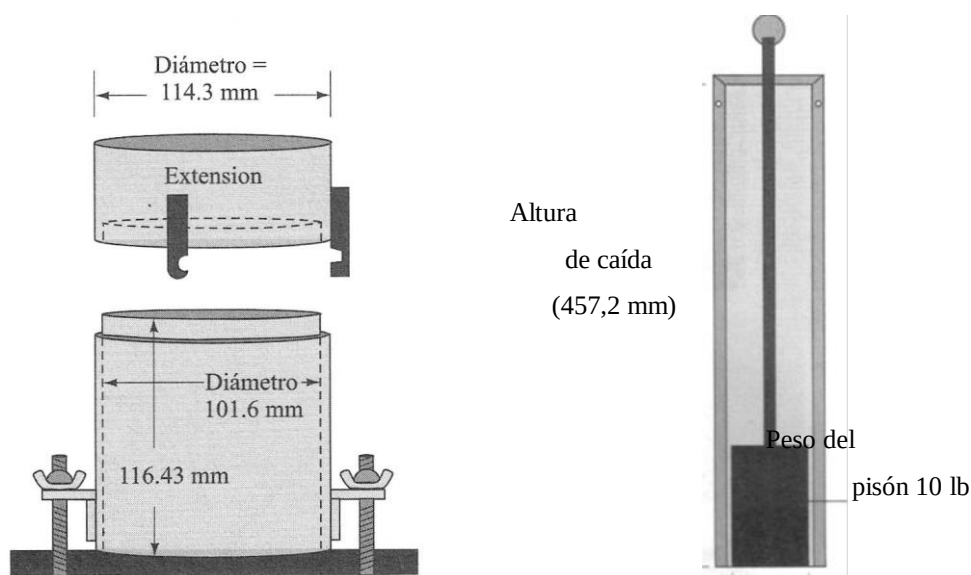
Entonces se obtiene el contenido de humedad del material compactado y se determina la densidad en seco a partir del peso medido del suelo compactado y del volumen conocido del molde. Luego el suelo es extraído o se obtiene otra muestra del mismo suelo. Posteriormente se aumenta el contenido de humedad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

2.7.3. 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 10. Se muestra el equipo de compactación utilizado en la prueba Proctor Modificada para el método “A” T-180 de la AASHTO.

Figura N°10 Equipo para la prueba de Proctor Modificado



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 2. Se da un resumen de los resultados utilizados para la prueba del Proctor modificado.

Tabla N° 12 Especificaciones para la prueba de Proctor T-180 de la AASHTO y D-1557 de la ASTM

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 (4.75 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.

2.8.Capacidad 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 resistidas por dicho cimiento. En consecuencia, el firme debe diseñarse de forma que las cargas de tráfico 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.

2.8.1. 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.

CAPITULO III ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

3.1. INTRODUCCIÓN.

Ya se comentó anteriormente que la estabilización o mejoramiento de suelos es un conjunto de técnicas que buscan incrementar el desempeño mecánico y la durabilidad de los materiales, y que son usadas en múltiples actividades de la ingeniería. Entre las aplicaciones que se destacan encontramos: la construcción de plataformas de cimentación, el mejoramiento del terreno natural, de sub-rasantes, de sub-base, bases y de pavimentos.

Actualmente existe una gran variedad de productos y sus respectivos procesos ofrecen un tratamiento químico y/o físico a los materiales. El uso de ellos en el caso de estructuras de pavimentos, depende de factores propios a los materiales a estabilizar, del aditivo ofrecido, del proceso constructivo a implementar, de la función de la capa estabilizada en la estructura de pavimento y del uso que se pretende de acuerdo al tránsito vehicular.

Cuando las capas estabilizadas en una vía terrestre tienen un buen desempeño se pueden obtener beneficios tanto técnicos como económicos, por reducción de tiempos en los procesos constructivos, disminución del impacto ambiental, disminución de costos de mantenimiento y formulación de nuevas alternativas de construcción y rehabilitación estructural de pavimentos.

3.2.DEFINICIÓN.

La estabilización consiste en agregar un producto químico o aplicar un tratamiento físico logrando así que se modifiquen las características de los suelos. Se dice que es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su plasticidad.

Las técnicas de estabilización de suelos se basan en el principio de modificar las propiedades del material existente con el fin de hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos. Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de mejoramiento o estabilización son:

- ❖ Estabilidad volumétrica, (Contracción – Expansión).
- ❖ Resistencia.
- ❖ Compresibilidad.
- ❖ Durabilidad.

Entonces podemos definir a un suelo estabilizado como una mezcla homogénea y uniforme de ese mismo suelo con uno o varios agentes estabilizantes o estabilizadores, los cuales harán posible la conformación de una capa de suelo estable la cual, convenientemente compactada, tiene por objeto disminuir la susceptibilidad al agua del suelo y aumentar ciertas características mecánicas.

3.3.TIPOS DE ESTABILIZACIÓN

Los métodos de estabilización de suelos pueden clasificarse según las diversas formas, de acuerdo con la naturaleza del proceso aplicado, según el material añadido, dependiendo del resultado deseado, etc. Por ejemplo según el proceso, existe la estabilización mecánica, química, térmica y eléctrica (Lambe y otros, 2006).

Uno de los principales tratamiento empleados en el mejoramiento o estabilización de suelo en las vías terrestres, es el conseguido mediante la unión de los granos del suelo con un material cementante (por ejemplo, cemento, cal, asfalto), a este tratamiento se puede clasificar como químico aunque en otras clasificaciones solo la incorporación de un agente estabilizador (por ejemplo, sales) se le conoce como estabilización química. A la estabilización que consiste en la incorporación de elementos prefabricados (geomallas y tierra armada), a la estabilización por compactación y a la estabilización lograda con la mezcla de dos o más suelos se le conoce como estabilización física o mecánica. Además existe otro tipo de estabilización conocida como estabilización Electrosmotica, pero esta no es muy usada, existe también la estabilización térmica, aplicando temperaturas a los suelos.

3.3.1. Estabilización Física.

Este método se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios en el mismo, sin que se produzcan reacciones químicas de importancia. Hay varios métodos como ser:

- a) ***Estabilización por compactación.***- consiste en comprimir los granos entre si aumentando así su fricción interna (compacidad), lo que incrementa su poder soportante.

Aunque mejora la calidad de los suelos, ella por si sola no proporciona resistencia y durabilidad que necesitan las capas de suelo, ya que estas se ven afectadas por cambios de humedad y por el desgaste del tránsito. Esta técnica se divide en 3 modalidades:

- a. Compactación.
 - b. Precarga.
 - c. Drenaje.
- b) ***Estabilización empleando la mezcla de suelos.*** Es de amplio uso pero por si sola no logra reducir los efectos deseados, necesitándose siempre de por lo menos la compactación como complemento. Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las gravas o arenas tienen una fricción interna lo que hace que sean estables como para ser la superficie de rodamiento de una carretera ya que al no tener cohesión si partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino. Las arcillas, por el contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.
- c) ***Elementos prefabricados.*** Consiste en la incorporación de elementos prefabricados como geomallas y/o tierra armada, las cuales actúan incrementando la cohesión y el ángulo de fricción del material, aumentando su capacidad portante. Este método es muy rápido pero costoso.

- d) **Vibroflotacion.** Aplicable en arenas o suelos son alta permeabilidad y consiste en la inserción de un dispositivo vibratorio, capaz de aplicar un chorro de agua simultáneamente con el vibrado, de tal manera que al encontrarse dicho dispositivo dentro del suelo inyectado agua y vibrando se produce la licuación de la arena logrando con ello su compactación.

3.3.2. *Estabilización química.*

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas potenciadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicas y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. Hay varios métodos como lo son:

- a. **Cal.** Utilizada generalmente para disminuir la plasticidad y consecuentemente también los cambios volumétricos de un material arcilloso, la forma de más uso es cal hidratada, óxidos o hidróxidos. Es técnicamente muy sencilla y bastante económica.
- b. **Cemento Portland.** Utilizado generalmente para suelos arenosos o gravas finas, la mayor ventaja es el incremento de la resistencia, también se puede usar para suelos arcillosos pero implica mayor porcentaje de este.
- c. **Ácido fosfórico y fosfatos.** Para suelos ácidos y no son efectivos en los alcalinos, en limos y arenas, funciona en cloritas y tiene considerable y benéfica acción en el peso volumétrico seco de la mezcla a la que se llega.
- d. **Cloruro de Sodio o de calcio (sales).** Para arcillas y limos ayudan en la compactación, impermeabilizan, disminuyen los polvos, benefician la resistencia del suelo y el comportamiento de estos ante la congelación, mas sin embargo como la sal muy soluble es considerada como muy poco durable.
- e. **Hidróxido de Sodio (sosa caustica).** Algunos éxitos se obtuvieron en la india sobre suelos lateríticos, ayuda en la compactación pero tiene el riesgo de ser toxico.
- f. **Polímeros y resinas.** Son cadenas muy largas de moléculas formadas por unión de componentes orgánicos, a los que se denomina por unión de componentes orgánicos, a los que se denomina monómeros. Los polímeros

naturales tiene la forma de resinas. La incorporación de polímeros a los suelos se hace de dos maneras; o se añaden los monómeros junto con un sistema catalizador que produce la polimerización posterior o el polímero se añade ya formado, solido, en solución o en emulsión. Únicamente pueden usarse en suelos ácidos (los suelos ácidos se encuentran fundamentalmente en regiones de pluviosidad elevada; en las regiones áridas, los suelos son normalmente alcalinos), otra desventaja importante del producto es la degradación bacteriana, que limita su vida. Los catiónicos poseen cargas positivas que crea nexos eléctricos muy fuertes con las negatividades de las partículas de arcilla; por este mecanismo pueden aumentar la resistencia del suelo. Los polímeros iónicos tienen la misma carga eléctrica que los minerales de arcilla, por lo que incorporación más bien tiende a disminuir la resistencia de los suelos tratados; correspondientemente favorecen la compactación. Los polímeros no iónicos generan nexos de hidrogeno importantes entre las partículas de arcilla, asociando sus grupos OH con el oxígeno de aquellas.

Los estabilizantes químicos pueden ser todavía de naturaleza orgánica o inorgánica. Los primeros suelen estar afectados por menos problemas de patentes y otras restricciones comerciales, y todavía pueden subdividirse en estabilizantes de tipo ácido, de tipo neutral y de tipo alcalino. El primero y el tercero de estos grupos actúan atacando químicamente los componentes del suelo, especialmente los minerales de arcilla, produciéndose en la reacción nuevos compuestos de naturaleza cementante. Los estabilizantes neutros principalmente alteran la propiedades físicas del suelo, como peso volumétrico (Rico Rodríguez, 2005).

La experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamiento 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 profundas (Rico Rodríguez. 2005).

3.3.3. *Estabilización Eléctrica.*

Se refiere principalmente a la utilización de ciertos procesos fisicoquímicos.

- a. **Electrosmotica.** Denominada también como electroósmosis, consiste en aplicar al suelo, combinadamente, una corriente eléctrica que origina una serie de fenómenos de naturaleza fisicoquímicos y la acción e dispositivos de bombeo. Técnica utilizada en la estabilización de suelos blandos.

3.3.4. Estabilización térmica.

Se refiere principalmente a la utilización de procesos involucrado el calor, el cual transforma cualquier arcilla en un ladrillo resistente.

- a. **Por calentamiento.** En la práctica y para estos problemas resulta suficiente llegar a la temperatura en la que la rehidratación de la arcilla se torne imposible (200°C a 400°C). La influencia de un punto de calentamiento no se extiende mucha más allá para poder reducir el potencial de expansión del material arcilloso.
- b. **Por enfriamiento.** Esta técnica es mucho más complicada que la anterior ya que el enfriamiento produce la disminución de la resistencia de los suelos finos al aumentar la repulsión entre las partículas y causa el movimiento del agua intersticial por efecto del gradiente térmico. Por estas razones, todos los métodos de estabilización por enfriamiento llegan a la congelación. En suelos arenosos el agua se congela con temperaturas del orden de los 0°C, pero los arcillosos pueden requerirse temperaturas bastante menores.

3.4. PARÁMETROS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.

Las principales propiedades a mejorar en un suelo son las siguientes (Fernández Loaiza, 1982) y (Rico Rodríguez, 2005):

- a) Estabilidad volumétrica. En este caso consistiría en modificar a la arcilla expansiva transformándola en una masa rígida o granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna

de la arcilla lo cual puede lograrse por medios químicos o físicos (geomembranas). Los problemas que presenta este parámetro son los siguientes:

1. Si se estabiliza una capa el suelo inferior muy probablemente se seguirá deformando pero importara mucho si la capa estabilizada se deforma en conjunto con la subyacente.
2. Los productos químicos penetran poco en el material arcilloso (por ejemplo: el asfalto).
3. Al tratar de aumentar la impermeabilidad y poder reducir la velocidad de los cambios volumétricos de una arcilla compactándola a peso volumétricos altos existe la contingencia de que cuando dicha arcilla se sature alcanzara presiones de expansión más altas a medida que se haya compactado con menos humedad, por eso se debe tener en cuenta la estación en que se realiza el proceso de construcción para comprobar si la impermeabilización será suficientemente buena para evitar el exceso de agua provocado en la época de lluvias.

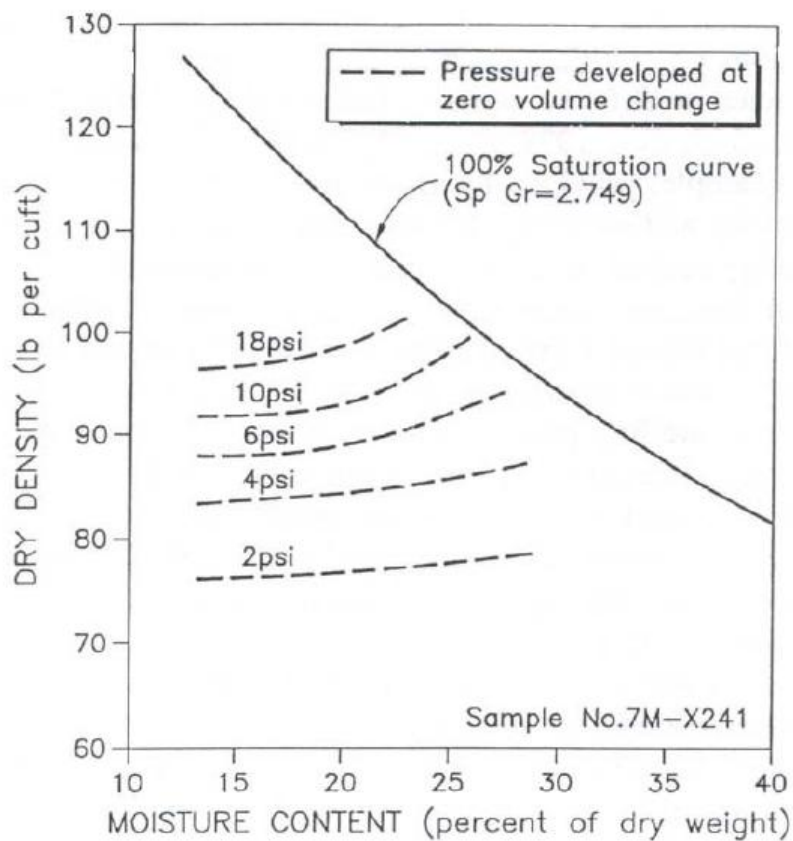


Figura N°11 Relación de la presión de expansión y la compactación. (Holtz W. G. and Gibbs H.)

b) Resistencia Mecánica. La Resistencia de los suelos arcillosos generalmente es mayor en estado seco que en estado húmedo. Aunque en algunos casos dicha resistencia también se ha disminuido en función de la disminución de humedad ya que el material se comporta como un suelo friccionante provocando deslizamientos de laderas o taludes. Es muy importante el considerar también si el suelo se estabilizara tal como está en campo, por lo que en este caso, las pruebas, sobre el material podrán ser remoldeadas del mismo. Los problemas que presenta este parámetro son los siguientes:

1. El incremento del peso volumétrico, de un suelo orgánico mediante la compactación, se ha considerado, en general, como un incremento en la resistencia, pero esta disminuye por ejemplo, cuando se crean presiones de poro en exceso de la hidrostática.

2. Algunas veces la resistencia de un suelo es menos importante que su deformabilidad bajo carga como es en el caso de suelos resilientes.
 3. El contenido de material orgánico deberá ser menor que el 10 % en peso ya que un mayor contenido de humedad inhibirá la reacción del suelo.
 4. En los suelos finos tiene una importancia decisiva la forma de aplicación de la energía de compactación, por ejemplo, la energía aplicada por impactos puede ocasionar que un suelo compactado del lado húmedo presente resistencias del orden de cuatro veces menor que la resistencia que en igualdad de circunstancias, presente el mismo suelo compactado estáticamente.
- c) **Permeabilidad.** Dos problemas básicos; la disipación de las presiones y el relacionado con el flujo del agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en terracerías y el flujo de agua puede originar tubificaciones y arrastres. Los problemas que presenta este parámetro son los siguientes:
1. Si se compacta un suelo arcilloso con humedades bajas la permeabilidad será alta, debido a la falta de desintegración de los grumos que al no disgregarlos se producen grandes vacíos intersticiales; por lo tanto mientras más altas sean las humedades más se reducirá la permeabilidad.
 2. En la figura N°11 se muestra la variación de la permeabilidad para diferentes humedades de compactación, en la parte superior de la figura se muestra dicha variación. En la parte inferior, se ilustra la variación del peso volumétrico contra la humedad correspondiendo a los puntos blancos a los datos obtenidos, después de la compactación de los especímenes a los puntos negros a los datos obtenidos después de la saturación conservando a los especímenes, en tal forma que se restringió su expansión volumétrica. Una vez saturado los especímenes y estableciendo un flujo constante de agua, se midió la permeabilidad

En general, aplicando las técnicas físicas o químicas, puede decirse que todos los suelos pueden ser estabilizados, pero deberá tomarse en cuenta el objetivo de la

obra, el procedimiento constructivo y el costo, ya que puede resultar demasiado alto si el suelo que se trata de corregir, no posee determinadas condiciones iniciales.

Hoy en día las limitantes más importantes en el diseño de estructuras para caminos y carreteras, han sido el aspecto económico y cuidado del medio ambiente. Las soluciones tienden, con cada vez más frecuencia, al uso de tecnologías y métodos de probada eficiencia. Sin menospreciar los demás tipos de estabilización consideramos que el uso del material del lugar modificando sus propiedades conforme al proyecto, puede lograrse por diversos métodos, pero solo uno proporciona una solución a largo plazo, el cambio en las propiedades químicas de sus elementos. Las características alcanzadas por medios químicos permanecerán (en algunos casos) inalterables e incluso mejoraran con el tiempo.

3.5. ESTABILIZACIÓN TÉRMICA “IN SITU”.

La estabilización térmica “in situ” se fundamenta en la observación de como el calor convierte cualquier arcilla en un ladrillo resistente. A temperatura suficiente el proceso se vuelve irreversible y la resistencia adquirida no se pierda, ni por inmersión; este efecto se logra con temperaturas del orden de 900°C, lo que representa una magnitud demasiado elevada para estabilizaciones en gran escala.

En la práctica y para estos problemas resulta suficiente llegar a la temperatura a la que la rehabilitación de la arcilla se torne imposible y esto ocurre con valores comprendidos entre los 100 y 400°C. A más de 100°C, el efecto en la resistencia puede ser muy importante, y empieza a ser irreversible. (Rico y Del Castillo, 2001).

A continuación se resumen algunas técnicas referenciadas por diferentes autores para realizar una aplicación de temperatura a suelos, “in situ”.

a) Método I de la llama directa.

El calor se aplica al suelo por llama directa provocada en su superficie o por circulación de gas calentado. “El primer método se utilizó por primera vez en Rumania y suele aplicarse haciendo en el suelo dos agujeros inclinados e intercomunicados en un punto en el que se provoca la combustión, en el primer agujero se inyecta el combustible y en el segundo permite salir a los gases de la combustión”. (Rico y Del Castillos, 2001).

b) Método II de llama directa.

El segundo método ha sido desarrollado en Rusia y consiste en realizar un solo agujero en el suelo, al fondo del cual se establece la cámara de combustión, cuya temperatura se controla con sobrepresión (respecto a la atmosfera); el calentamiento del suelo se efectúa por el paso del aire caliente comprimido a través de sus poros”. (Rico y Del Castillos, 2001).

c) Método III para descontaminación de suelos.

Esta técnica se ha utilizado para incrementar las temperaturas en el subsuelo y en las aguas contaminadas subterráneas. Se usa para lograr la movilización de los compuestos químicos del suelo a través del agua a las instalaciones de captación, desde donde se harán tratamientos de eliminación que pueden ser plantas de tratamiento para aguas contaminadas.

Las técnicas de tratamiento térmico del suelo para la eliminación de contaminantes, cuyo objetivo es el mismo de la movilización de compuestos químicos, se pueden desarrollar mediante la inyección de aire, vapor, o agua caliente. Otras técnicas son la utilización de corriente eléctrica, y ondas de radio frecuencia.

Si la contaminación es superficial se pueden utilizar mantas especiales para calentar las capas superficiales del suelo, técnicas que son más utilizadas por empresas petroleras en la limpieza del crudo cuando hay derrames de este.

d) Método IV para eliminación de residuos peligrosos.

La eliminación de residuos peligrosos se ha experimentado “in situ”. Algunos trabajos han realizado modelos a escala en el cual se aplica corriente continua produciendo calor.

En este proceso se utiliza una capa superficial de grafito y vidrio que sirve de ruta de encendido, en el cual al aumentar la temperatura los residuos orgánicos se evaporan y luego se descomponen por ausencia de oxígeno, donde una porción se convierte en gases que se disuelven en la masa fundida.

Aquellos gases que tienen componentes combustibles se queman en presencia de oxígeno cuando se produce la eliminación de gases y la otra porción se evapora mezclándose en el medio ambiente y parte del material se vitrifica reduciendo el volumen de la masa.

CAPITULO IV APLICACIÓN PRÁCTICA.

Antes del diseño y construcción de cualquier tipo de obra se debe realizar un análisis de suelos completo del lugar seleccionado, el estudio se lo realiza mediante ensayos de laboratorio, los cuales permiten conocer las características y propiedades de un determinado material.

El criterio utilizado para la extracción de las muestra se basa en las propiedades visuales, se observa materiales limo-arcillosos, aparentemente para luego obtener después de una serie de ensayos la clasificación de estos.

4.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Las zonas ubicadas para el área de estudio, se encuentran dentro de la ciudad de Tarija, en los barrios periféricos de la ciudad, los cuales se mencionan a continuación:

Zona 1 El “Mercado del Sur”,



Imagen N°1 Extracción de la muestra Mercado del Sur

Zona 2 “El Tejar”



Imagen N°2 Extracción de la muestra “Universidad Autónoma Juan Misael

Zona 3 “Parada del Norte”



Imagen N°3 Extracción de la muestra de la Parada del Norte

4.2. MUESTREO DEL MATERIAL.

Objetivo

El objetivo del muestreo es realizar una extracción del material adecuado y representativo para poder utilizar el mismo suelo para realizar todos los ensayos necesarios.

Equipo

Es necesario para la extracción de las muestras los siguientes materiales.

- Pala.
- Picota
- Bolsas.



Imagen N°4 Pala y picota

Procedimiento.

- Previo a la extracción de material se debe sacar las impurezas que se encuentran en la superficie para así evitar que se mezcle con el suelo que se va a extraer.
- Excavar de 50 cm a 1 m de profundidad para poder tener un suelo con una humedad natural.
- Colocar el material en bolsas para ser transportadas inmediatamente al lugar de trabajo, cuidando de que no se pierda la humedad
- Identificar previamente cada bolsa.

4.3.DATOS DE LOCALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS.

Ubicación e Identificación	Profundidad (m)	Espesor (m)	% humedad	Color en estado Húmedo	Color en estado Seco
Muestra N°1 “Mercado del Sur”	0.80	0.50	10.86	Mostaza oscuro	Mostaza claro

Tabla N°13 Datos de localización e identificación de la Muestra N°1

Ubicación e Identificación	Profundidad (m)	Espesor (m)	% humedad	Color en Estado Húmedo	Color en estado Seco
Muestra N°2 “El Tejar”	0.80	0.50	16.55	Negro	Gris Claro

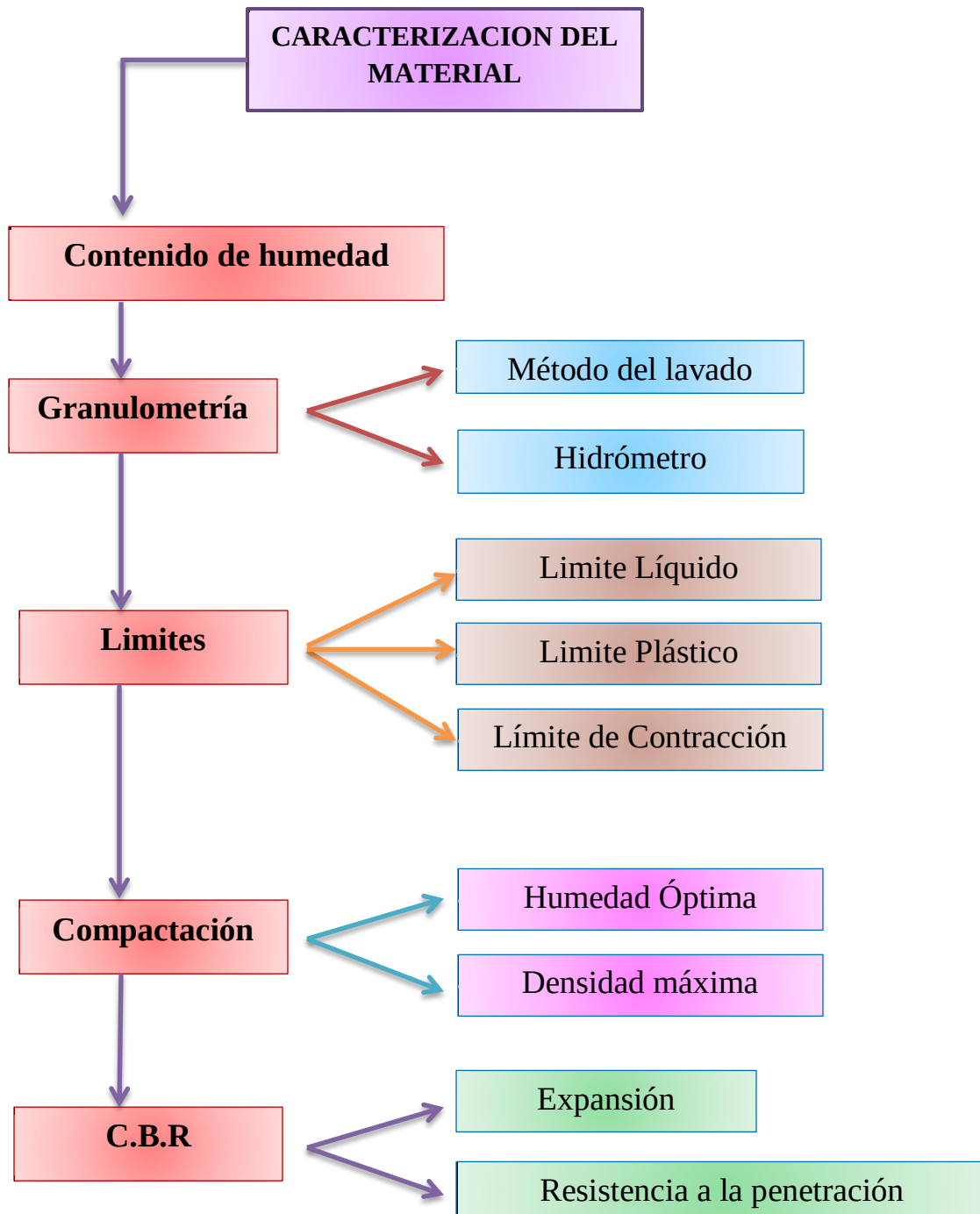
Tabla N°14 Datos de localización e identificación de la Muestra N°2

Ubicación e Identificación	Profundidad (m)	Espesor (m)	% humedad	Color Estado Húmedo	Color estado Seco
Parada del Norte	0.80	0.50	7.70	Mostaza oscuro	Mostaza claro

Tabla N°15 Datos de localización e identificación de la Muestra N°3

4.4.CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS.

La caracterización de los materiales se realiza de acuerdo con los ensayos mostrados en el siguiente esquema, las normas y parámetros establecidos en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho



A continuación se presenta un cuadro de resultados de todos los ensayos realizados, de acuerdo con los procedimientos establecidos en el laboratorio de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

CARACTERIZACION DE LOS SUELOS							
Muestra	Granulometría				γ suelo	Hidrómetro	
	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200	gr/cm ³	% Limo	% Arcilla
1	100	99.87	99.63	99.51	2.62	65.718	34.282
2	100	98.11	96.81	95.65	2.60	72.78	27.22
3	100	98.63	97.06	94.94	2.65	91.93	8.07

Tabla N°16 Cuadro de Resultados de la Caracterización de los suelos

CARACATERIZACION DE LOS SUELOS					
Muestra	Límites de Consistencia			Compactación	
	LL	LP	IP	% Humedad	Densidad
				Optima	Máxima
1	65.12	28.41	36.71	13.17	1.72
2	38.71	24.73	13.98	15.53	1.77
3	26.12	12.38	13.74	11.46	1.93

Tabla N°17 Cuadro de Resultados de la Caracterización de los suelos

CARACATERIZACION DE LOS SUELOS					
Muestra	CBR		Expansiones (%)		
	100%	95%	12 Golpes	25 Golpes	56 golpes
1	3	2	3.19	3.18	3.15
2	3	2	2.82	2.62	2.14
3	5	4	2.76	2.56	2.21

Tabla N°18 Cuadro de Resultados de la Caracterización de los suelos

4.5.CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Con la caracterización realizada de los materiales se clasifican los suelos de acuerdo a las siguientes normas.

4.5.1. Norma AASHTO

Cálculo del Índice de Grupo

El índice de grupo es un factor de evaluación, que determina la calidad del suelo a través de sus características similares en grupos de suelos, el índice de grupo es muy importante en el diseño de espesores, inclusive un método lleva el mismo nombre.

Se determina mediante la siguiente ecuación:

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

Dónde:

a = % pasa tamiz N°200 – 35%.

b = % pasa tamiz N°200 – 15%.

c = % Limite liquido – 40 %.

d = Índice de plasticidad – 10 %.

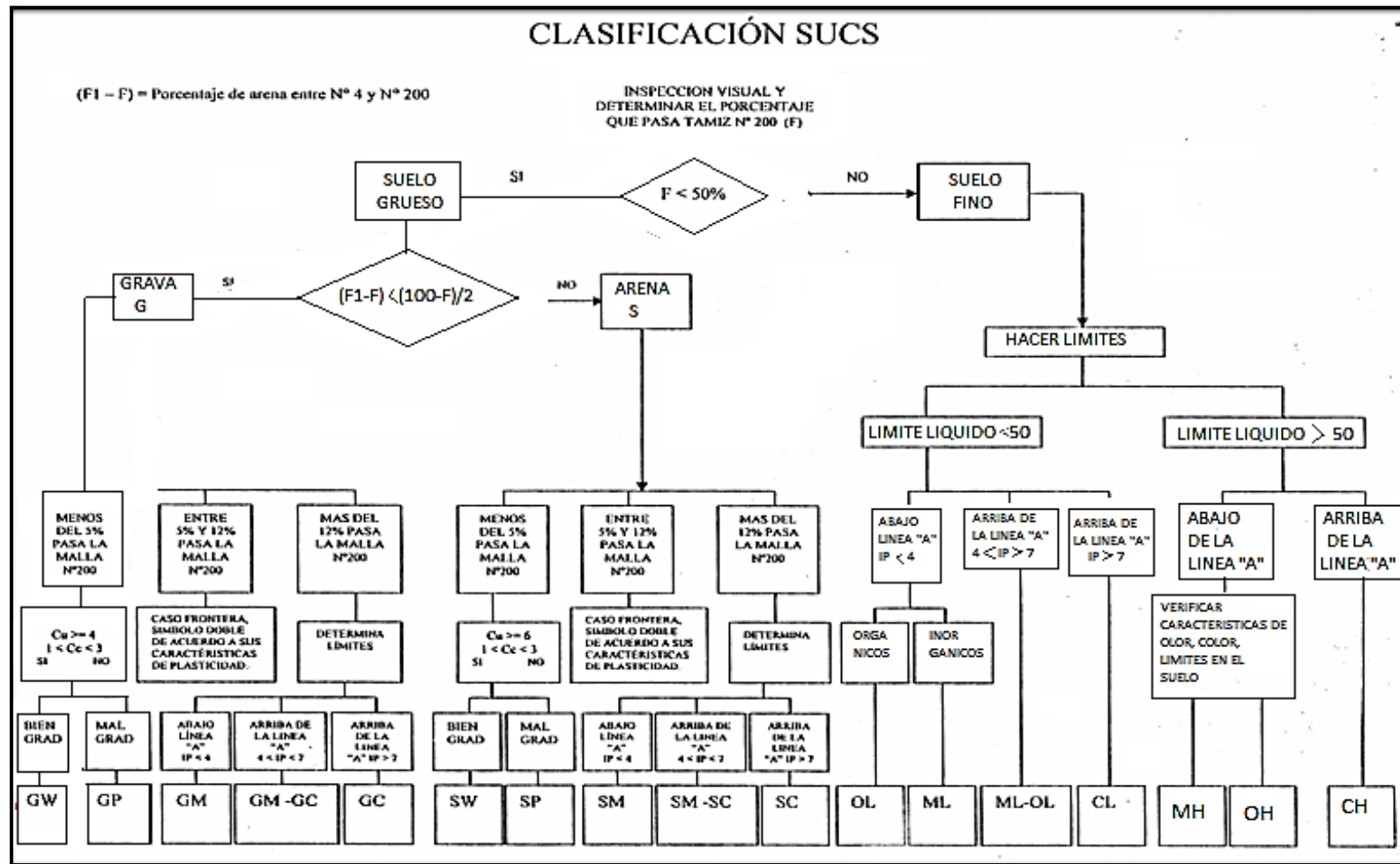
A continuación se presenta una tabla resumen de la clasificación mediante el método de la AASHTO.

CLASIFICACION AASHTO									
Muestra	% Pasa Tamiz N°200	LL	IP	Coeficientes				índice de Grupo	Clasificación
				a	b	c	d		
1	99,51	65,12	36,71	64,51	84,51	25,12	26,71	44	A - 7 - 6 (44)
2	95.65	38,71	13,98	54,55	74,55	-1,29	3,98	14	A - 6 (14)
3	94.84	26,12	13.74	32,99	52,99	-13,88	-0,01	4	A - 6 (4)

Tabla N°19 Resumen de la Clasificación de los suelos mediante AASHTO

4.5.2. Norma Sistema Unificado de clasificación de Suelos S.U.C.S

Para la clasificación de acuerdo al sistema S.U.C.S, se utiliza el siguiente cuadro que permite, clasificar el material de una manera mas rápida y efectiva.



Mediante la carta de plasticidad determinamos en que limites se encuentra el suelo.

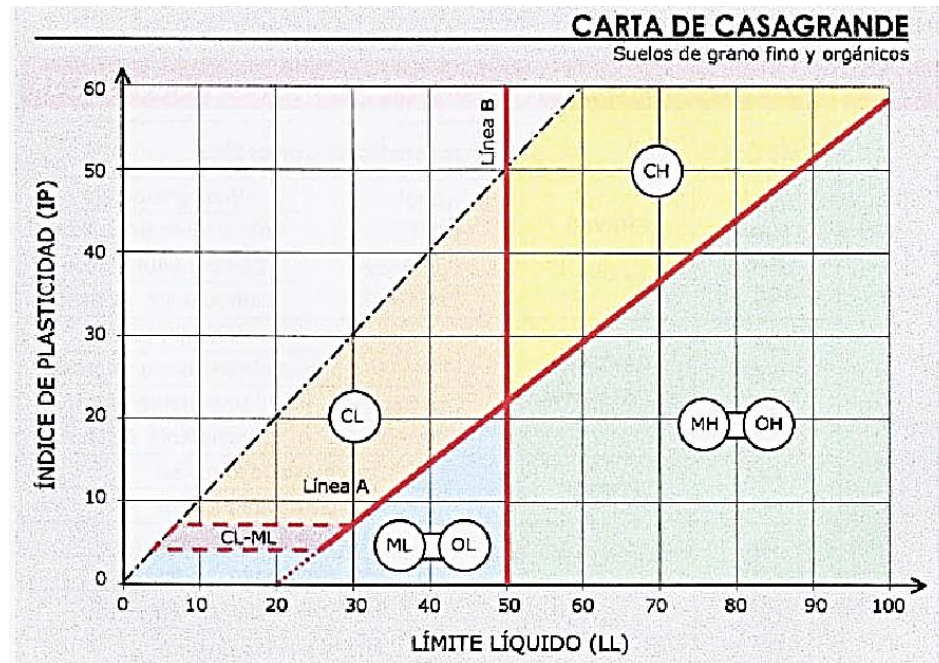


Imagen N°5 Clasificación mediante S.U.C.S

A continuación se presenta una tabla resumen de la clasificación obtenida por el método de S.U.C.S

CLASIFICACION S.U.C.S							
Muestra	% Pasa Tamiz		% fino		Limites		Clasificación
	N°4	N°200	%Limo	% Arcilla	LL	IP	
Mercado del Sur	100	99,51	65,718	34,282	65,1	36,71	CH
El Tejar	100	89,55	72,79	27,22	38,7	13,98	CL
Parada del Norte	93,55	67,99	91,93	8,07	26,1	13.74	CL

Tabla N°20 Clasificación mediante el método S.U.C.S

En el siguiente cuadro se describe las características principales de los tres tipos de suelos estudiados.

CLASIFICACION Y DESCRIPCION DE LOS SUELOS			
Muestra	METODO		DESCRIPCION DEL SUELO
	AASHTO	S.U.C.S	
Mercado del Sur	A – 7 – 6 (44)	CH	En este grupo predominan las arcillas, más del 75% del material pasa el tamiz N°200, sus índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos además presentan grandes cambios volumétricos entre sus estados seco y húmedo, además de presentar elasticidad o alto potencial de expansión, este suelo suele contener pequeños porcentajes de arena fina y limo cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla.
El Tejar	A – 6 (14)	CL	El material típico de este grupo es una arcilla plástica que usualmente tiene el 75% o más del material pasa el tamiz 200, los materiales de este grupo normalmente presentan grandes cambios de volúmenes entre sus estados seco y húmedo.
Parada del Norte	A – 6 (4)	CL	El material típico de este grupo es una arcilla plástica que usualmente tiene el 75% o más del material pasa el tamiz 200, los materiales de este grupo normalmente presentan grandes cambios de volúmenes entre sus estados seco y húmedo.

Tabla N°21 Clasificación y descripción de los suelos

4.5.3. Determinación del Potencial expansivo

El grado de expansión que presentan las diferentes muestras se determinan mediante las siguientes tablas.

Grado de potencial expansivo	Índice Plástico
Bajo	0 - 15
Medio	10 - 35
Alto	20 - 55
Muy Alto	>35

PCV	IP		Límite de Contracción
	Zona Seca	Zona Húmeda	
Bajo	0 - 15	0 - 30	>12
Moderado	15 - 30	30 - 50	10 - 12
Alto	>30	>50	<10

Tabla N° 22 Tablas para clasificar el grado de expansión de los suelos

Con los datos obtenidos sobre los límites de consistencia de los suelos se clasifica el mismo según el grado potencial, de acuerdo a las tablas mostradas anteriormente y a continuación presentamos un resumen:

GRADO DE EXPANSION DE LOS SUELOS					
Muestra	LL	IP	LC	PCV	Grado de Potencial Expansivo
1	65,1	36,71	6.26	Alto	Alto
2	38,7	13,98	10.22	Moderado	Medio
3	26,1	9,99	14.30	Bajo	Bajo

Tabla N°23 Clasificación según el grado de Potencial expansivo.

4.6. DESCRIPCION DE LA ESTABILIZACION.

4.6.1. Introducción

Dado que no existe la suficiente bibliografía sobre este tipo de estabilización, esta se refiere principalmente a la utilización de procesos donde se ve involucrado el calor, el cual transforma cualquier arcilla en un ladrillo resistente.

En la práctica y para estos problemas resulta suficiente llegar a la temperatura en la que la rehidratación de la arcilla se torne imposible, este efecto se logra en temperaturas entre 100°C a 400°C.

4.6.2. Programación de ensayos

De la elaboración de un marco teórico previo y contrastando con las recomendaciones establecidas por diversos autores para la aplicación de temperatura bajo la cual el proceso de cambio estructural del suelo se mantenga o sea irreversible, se presenta a continuación el procedimiento para someter tres tipos de suelos:

- ◆ Muestra 1, Zona “Mercado del Sur”, suelos fino de alta expansión.
- ◆ Muestra 2, Zona “El Tejar”, suelo fino de expansión media.
- ◆ Muestra 3 Zona “Parada del Norte”, suelo fino de baja expansión.

Estos suelos se someterán a temperaturas de 100°C y 300°C, durante 1 y 3 días y, el análisis de las propiedades luego de mantener a los suelos así tratados en cámaras húmedas, en tiempos que varían de 1 a 60 días, de acuerdo al siguiente cronograma.

Muestra	Procedencia	Días al Horno	Temperatura °C	Tiempo en Cámara húmeda programado en días			
				1	15	30	60
1	Mercado del Sur	1	100	1A	1B	1C	1D
2	Parada del Norte	1	100	2A	2B	2C	2D
3	El tejar	1	100	3A	3B	3C	3D
4	Mercado del Sur	1	300	4A	4B	4C	4D
5	Parada del Norte	1	300	5A	5B	5C	5D
6	El tejar	1	300	6A	6B	6C	6D
7	Mercado del Sur	3	100	7A	7B	7C	7D
8	Parada del Norte	3	100	8A	8B	8C	8D
9	El tejar	3	100	9A	9B	9C	9D
10	Mercado del Sur	3	300	10A	10B	10C	10D
11	Parada del Norte	3	300	11A	11B	11C	11D
12	El tejar	3	300	12A	12B	12C	12D

Tabla N°24 Programación de Ensayos e Identificación de Cada muestra

4.6.3. Descripción de la estabilización.

Equipo de compactación

- ◆ Molde cilíndrico de diámetro inferior 6" y una altura de 7 a 8".
- ◆ Base perforada.



Imagen N°6 Molde más base

- ◆ Collarín de 2" de altura.
- ◆ Disco espaciador de acero de 2.5" de altura.
- ◆ Pistón o martillo de 10 lb. Y altura de caída de 18"

Equipo para la expansión

- ◆ Plato o vástago con altura regulable



Imagen N°7 Vástago

- ◆ Trípode y extensómetro.

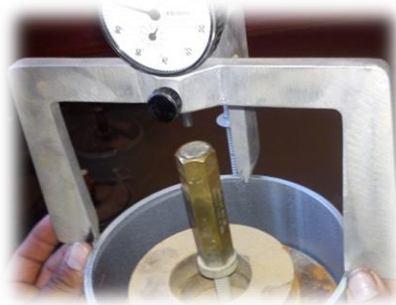


Imagen N°8 Trípode y Extensómetro

- ◆ Pesas anulares o en forma de herradura dura de 5 lb.



Imagen N°9 Pesas en forma de herradura

Equipo para la estabilización

- ◆ Un horno regulable, de 300 °C como mínimo.
- ◆ Un refrigerador, utilizado como cámara húmeda.



Imagen N°10 Horno regulable a 300°C y refrigerador

4.6.3.1.EQUIPO PARA LA PRUEBA DE PENETRACION

- ◆ Pistón cilíndrico de 3” de sección.
- ◆ Aparato para aplicar la carga.
- ◆ Anillo dinamométrico con extensómetro calibrado.
- ◆ Equipos misceláneo, balanza, tamices, papel filtro.



Imagen N°11 Equipo completo para realizar la prueba de penetración

4.6.4. PROCEDIMIENTO

El procedimiento que se realiza para la estabilización es similar al procedimiento que se sigue para realizar el ensayo de C.B.R con la diferencia de que una vez compactado el suelo se procederá a extraer la muestra para ser depositada en el horno a la temperatura indicada en la programación, y posteriormente sacar la muestra una vez pasado el tiempo establecido, para así poder llevar la muestra a la cámara húmeda, en la cual el espécimen de suelo adquirirá humedad, para luego pasado el tiempo indicado se retirara la muestra de la cámara húmeda, para analizar realizar el ensayo de C.B.R, en la prensa correspondiente.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

PREPARACION DEL MATERIAL

- ◆ Secar el material a temperatura ambiente, para moler y tamizar por el tamiz N°4, posteriormente mezclar para tener un material homogéneo.



Imagen N°12 Molido y tamizado del material

- ◆ Tomar como dato el peso del molde vacío, con la base y sin el collarín.



Imagen N°13, Peso del Molde Vacío

- ◆ Engrasar las paredes del molde.
- ◆ Con la humedad óptima realizar la compactación del suelo en un molde de T-180, compactando 5 capas de 12, 25 y 56 golpes cada una.



Imagen N°14, Compactación del suelo

- ◆ Enrazar y pesar el molde más la muestra compactada



Imagen N°14, Molde más muestra compactada

- ◆ Con el expansometro realizar la lectura inicial de la expansión del espécimen.

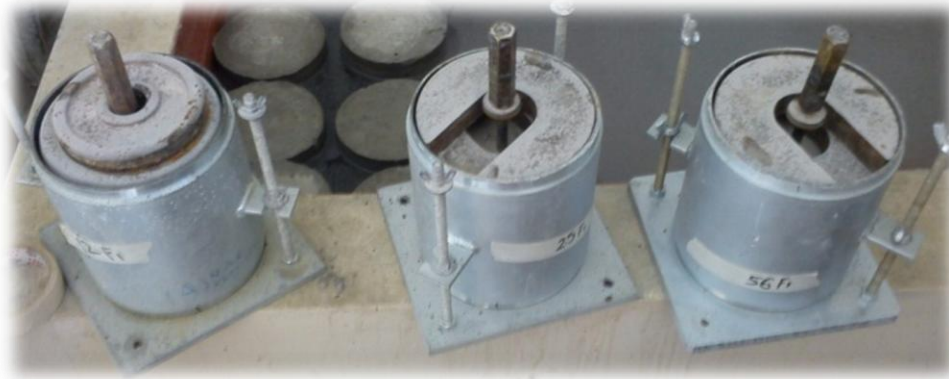


Imagen N°15, Lectura de la expansión inicial

- ◆ Extraer el espécimen del molde, con la ayuda de un extractor de muestras como se ve en la siguiente imagen.



Imagen N°16, Extracción del espécimen.

- ◆ Identificar el espécimen de acuerdo a la numeración indicada en la programación de ensayos.



Imagen N°17, Identificación de los especímenes

- ◆ Una vez identificadas correctamente las muestras, colocar los especímenes de suelo dentro del horno, con las temperaturas mencionadas en la programación de ensayos.



Imagen N°18, Especímenes dentro del horno.

- ◆ Sacar los especímenes del horno dejarlas enfriar a temperatura ambiente.

- ◆ Introducir los especímenes dentro de las cámaras húmedas variando los tiempos para que adquieran humedad y hacer un posterior análisis de su comportamiento.



Imagen N°19, Especímenes dentro de la cámara húmeda

- ◆ Una vez pasado el tiempo programado en las cámaras húmedas, retirar cuidadosamente las muestras e introducir a los moldes, tomar como dato el peso del molde más el suelo húmedo.



Imagen N°20, Lectura final de la expansion

- ◆ Llevar las muestras a la prensa de C.B.R, para poder realizar la prueba de penetración, anotar los datos en las planillas elaboradas.



Imagen N°21, Capacidad Soporte del Suelo.

- ◆ Extraer la muestra mediante el extractor, para obtener la humedad en la superficie, fondo, y en el medio del espécimen.



Imagen N°22, Contenido de humedad

- ◆ Pesar las taras con las muestras extraídas, de la superficie, medio y fondo del espécimen, registrar como dato de suelo húmedo más tara.
- ◆ Colocar en el horno durante 24 horas.
- ◆ Pasadas las 24 horas sacar las taras del horno y pesar, registrando este dato como peso del suelo seco más tara.
- ◆ Con todos los datos registrados realizar el trabajo de gabinete, para obtener los resultados.

4.7.RESULTADOS

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio, como ser: la capacidad de soporte mediante el C.B.R, límite líquido, límite plástico, límite de contracción y granulometría.

Muestra	RESULTADOS DE C.B.R DE SUELO ESTABILIZADO									
	Días al horno	Temperatura °C	Tiempo en cámara húmeda (días)							
			1		15		30		60	
			100%	95%	100%	95%	100%	95%	100%	95%
Mercado del Sur	1	100	6	3	6	4	6	5	7	5
El Tejar	1	100	5	4	5	5	6	5	7	5
Parada del Norte	1	100	7	6	7	6	7	6	8	6

*Cuadro N°1 Resultados de los C.B.R estabilizados
1 Día en Horno a 100 °C*

Muestra	RESULTADOS DE C.B.R DE SUELO ESTABILIZADO									
	Días al horno	Temperatura °C	Tiempo en cámara húmeda (días)							
			1		15		30		60	
			100%	95%	100%	95%	100%	95%	100%	95%
Mercado del Sur	3	100	6	4	7	6	8	6	9	6
El Tejar	3	100	5	4	6	5	7	6	8	6
Parada del Norte	3	100	7	6	7	6	7	6	8	6

*Cuadro N°2 Resultados de los C.B.R Estabilizados
3 Días en Horno a 100 °C*

Muestra	RESULTADOS DE C.B.R DE SUELO ESTABILIZADO									
	Días al horno	Temperatura °C	Tiempo en cámara húmeda (días)							
			1		15		30		60	
			100%	95%	100%	95%	100%	95%	100%	95%
Mercado del Sur	1	300	7	6	8	6	9	6	10	7
El Tejar	1	300	8	6	8	7	9	7	10	9
Parada del Norte	1	300	8	5	9	6	9	7	10	8

***Cuadro N°3 Resultados de los C.B.R Estabilizados
1 Día en Horno a 300 °C***

Muestra	RESULTADOS DE C.B.R DE SUELO ESTABILIZADO									
	Días al horno	Temperatura °C	Tiempo en cámara húmeda (días)							
			1		15		30		60	
			100%	95%	100%	95%	100%	95%	100%	95%
Mercado del Sur	1	100	10	9	11	8	12	9	14	10
El Tejar	1	100	9	7	10	8	11	9	13	9
Parada del Norte	1	100	9	7	10	8	11	9	16	15

***Cuadro N°4 Resultados de los C.B.R Estabilizados
3 Días en Horno a 300 °C***

A continuación se presenta cuadros de resultados sobre la expansión de los suelos, una vez realizada la estabilización.

N°	Muestra	Días Horno	Temp. °C	Expansiones del Suelo Estabilizado			Expansión Promedio
				12 G	25 G	56 G	%
1	Mercado del Sur	1	100	3,02	2,63	1,88	2.09
2	El Tejar	1	100	2,83	2,48	2,03	2.04
3	Parada del Norte	1	100	2,5	2,05	1,59	1.60
4	Mercado del Sur	3	100	2,68	2,58	1,97	2.05
5	El Tejar	3	100	2,81	1,92	1,45	1.48
6	Parada del Norte	3	100	2,48	2,08	1,54	1.51
7	Mercado del Sur	1	300	2,64	2,45	1,75	1.80
8	El Tejar	1	300	2,69	2,32	1,78	1.76
9	Parada del Norte	1	300	2,47	2,13	1,39	1.46
10	Mercado del Sur	3	300	2,25	1,93	1,62	1.62
11	El Tejar	3	300	1,6	1,28	0,91	0.93
12	Parada del Norte	3	300	1,78	1,54	0,76	1.02

***Cuadro N°5 Resultados de la expansión de los suelos estabilizados
Tratados 1 día en Cámara Húmeda***

N°	Muestra	Días Horno	Temp. °C	Expansiones del Suelo Estabilizado			Expansión Promedio
				12 G	25 G	56 G	%
1	Mercado del Sur	1	100	2,52	2,2	2,17	2.14
2	El Tejar	1	100	2,81	2,46	2,01	2.04
3	Parada del Norte	1	100	2,13	1,58	1,43	1.31
4	Mercado del Sur	3	100	2,68	2,28	1,16	1.34
5	El Tejar	3	100	2,26	2,05	1,45	1.49
6	Parada del Norte	3	100	2,1	1,7	1,51	1.45
7	Mercado del Sur	1	300	2,4	1,76	1,64	1.55
8	El Tejar	1	300	2,63	1,93	1,46	1.52
9	Parada del Norte	1	300	1,89	1,63	1,32	1.36
10	Mercado del Sur	3	300	1,7	1,4	0,59	0.61
11	El Tejar	3	300	1,36	1,07	0,69	0.74
12	Parada del Norte	3	300	1,7	1,4	0,8	0.88

***Cuadro N°6 Resultados de la expansión de los suelos estabilizados
Tratados 15 días en Cámara Húmeda***

N°	Muestra	Días Horno	Temp. °C	Expansiones del Suelo Estabilizado			Expansión Máxima
				12 G	%	56 G	%
1	Mercado del Sur	1	100	2,28	1,87	1,66	1.65
2	El Tejar	1	100	2,13	1,64	1,5	1.43
3	Parada del Norte	1	100	1,72	1,53	1,05	1.11
4	Mercado del Sur	3	100	2,52	2,00	1,12	1.27
5	El Tejar	3	100	2,09	2,13	1,09	1.07
6	Parada del Norte	3	100	1,49	1,2	0,98	0.99
7	Mercado del Sur	1	300	1,88	1,13	0,52	0.54
8	El Tejar	1	300	1,95	1,35	0,95	0.99
9	Parada del Norte	1	300	1,75	1,5	1,1	1.14
10	Mercado del Sur	3	300	1,34	1	0,59	0.63
11	El Tejar	3	300	1,14	0,99	0,62	0.64
12	Parada del Norte	3	300	1,33	0,89	0,56	0.54

**Cuadro N°7 Resultados de la expansión de los suelos estabilizados
Tratados 30 días en Cámara Húmeda**

60 días en Cámara Húmeda							
N°	Muestra	Días	Temp.	Expansiones del Suelo Estabilizado			Expansión Máxima
		Horno	°C	12 G	25 G	56 G	%
1	Mercado del Sur	1	100	2,24	1,9	1,61	1.65
2	El Tejar	1	100	1,92	1,47	1,03	1.06
3	Parada del Norte	1	100	1,69	1,51	1,04	1.09
4	Mercado del Sur	3	100	1,57	1,49	0,67	0.74
5	El Tejar	3	100	1,21	1,07	0,94	0.94
6	Parada del Norte	3	100	1,39	1,07	0,95	0.90
7	Mercado del Sur	1	300	1,02	0,98	0,57	0.55
8	El Tejar	1	300	1,14	1,04	1,85	0.86
9	Parada del Norte	1	300	1,1	1	0,83	0.74
10	Mercado del Sur	3	300	0,82	0,58	0,21	0.79
11	El Tejar	3	300	0,94	0,96	0,71	0.70
12	Parada del Norte	3	300	0,98	0,76	0,55	0.53

**Cuadro N°8 Resultados de la expansión de los suelos estabilizados
Tratados 60 días en Cámara Húmeda**

En el siguiente cuadro se muestra los resultados de los límites de consistencia para el tiempo de tratado en cámara húmeda de 60 días.

***Cuadro N°8 Resultados de la expansión de los suelos estabilizados
Tratados 60 días en Cámara Húmeda***

N°	Muestra	Días Horno	Temp. °C	LÍMITES DE CONSISTENCIA		
				LL	LP	IP
1	Mercado del Sur	1	100	59,16	27.13	32.02
2	El Tejar	1	100	36,55	23.94	12.60
3	Parada del Norte	1	100	25,95	12.64	13.31
4	Mercado del Sur	3	100	52,43	26.76	25.67
5	El Tejar	3	100	32,91	20.34	12.58
6	Parada del Norte	3	100	24,69	12.38	12.31
7	Mercado del Sur	1	300	46,88	24.96	21.92
8	El Tejar	1	300	31,85	19.86	11.99
9	Parada del Norte	1	300	23,51	11.88	11.63
10	Mercado del Sur	3	300	42,78	21.85	20.93
11	El Tejar	3	300	28.37	18.17	10.20
12	Parada del Norte	3	300	20.20	11.19	9.01

4.8. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS ESPECÍMENES.

Es necesario conocer el porcentaje de humedad de los especímenes para obtener un índice de riego, para su posterior aplicación en campo.

A continuación se presenta un cuadro resumen de los porcentajes de humedad para los suelos que dieron mejor resultado con la estabilización, es decir los suelos sometidos a 300°C, durante 3 días en el horno, y tratados por 60 días en las cámaras humedad.

3 días en horno a 300°C tratados 60 días en cámara húmeda	
Muestra	Porcentaje de Humedad
Mercado del Sur	20,14
El tejear	19,87
Parada del Norte	13,82

Tabla N°15 Porcentaje de humedad de los especímenes

4.9.DETERMINACIÓN DE TASA DE RIEGO.

El índice de riego se determina a partir del porcentaje de humedad de los especímenes, para las siguientes dimensiones de una capa sub rasante:

Espesor = 30 cm

Longitud = 1000 m

Ancho = 7 m

Para los valores dados de las dimensiones de una capa sub rasante se tiene las siguientes tasas de riego:

3 días en horno a 300°C tratados 60 días en cámara húmeda	
Muestra	Tasa de riego (Lt/m ²)
Mercado del Sur	0.82
El tejtar	0.86
Parada del Norte	0.71

Tabla N°15 Tasa de riego

4.10. APLICACIÓN EN CAMPO.

La estabilización “in situ” aplicando la gradiente térmica, se fundamenta en la observación de como el calor convierte cualquier arcilla en un ladrillo resistente. A temperatura suficiente el proceso se vuelve irreversible y la resistencia adquirida no se pierda, ni por inmersión; este efecto se logra con temperaturas del orden de 900°C, lo que representa una magnitud demasiado elevada para estabilizaciones en gran escala.

En la práctica y para estos problemas resulta suficiente llegar a la temperatura a la que la rehabilitación de la arcilla se torne imposible y esto ocurre con valores comprendidos entre los 100 y 400°C. A más de 100°C, el efecto en la resistencia puede ser muy importante, y empieza a ser irreversible. (Rico y Del Castillo, 2001).

A continuación se resume una técnica la cual puede ser utilizada en el campo:

Método de la llama directa.

El calor se aplica al suelo por llama directa provocada en su superficie o por circulación de gas calentado. “El primer método se utilizó por primera vez en Rumania y suele aplicarse haciendo en el suelo dos agujeros inclinados e intercomunicados en un punto en el que se provoca la combustión, en el primer agujero se inyecta el combustible y en el segundo permite salir a los gases de la combustión”. (Rico y Del Castillos, 2001).

A continuación se muestra una gráfica, del método de la llama directa:

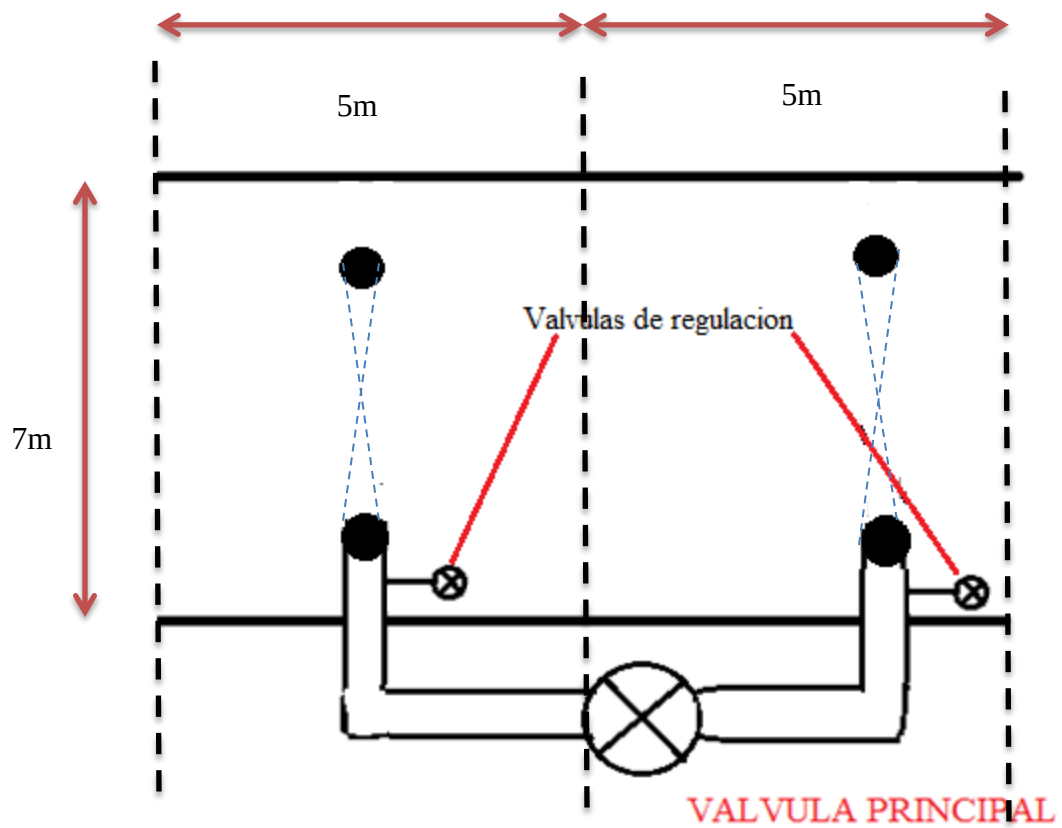


Imagen N°15 Instalación para llama directa.(Vista en Planta)

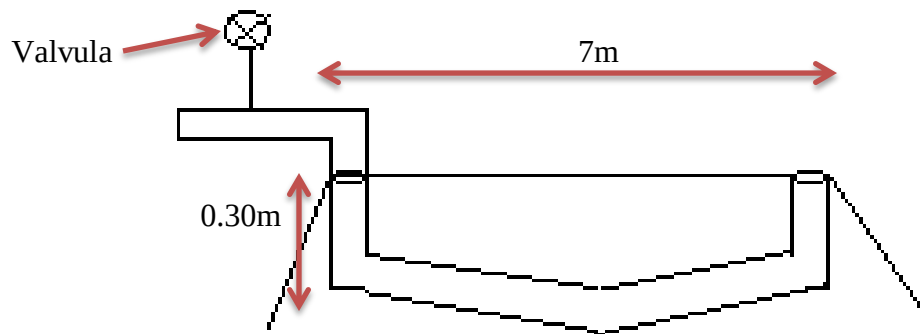


Imagen N°15 Instalación para llama directa. (Vista de perfil)

Los materiales para realizar la estabilización son comunes en el medio, ya que se necesitaría una instalación, similar a una conexión de gas, (tuberías, codos, válvulas, llaves, etc.)

4.11. ESTIMACIÓN DE COSTOS.

El estudio de costos contempla básicamente la elaboración de los precios referenciales, de una alternativa aplicada en el campo, para suelos finos expansivos, en la alternativa, se emplean equipos sencillos como ser una compactadora de rodillo liso, un camión aguatero, además de dos obreros para el control de las válvulas.

A continuación se calcula el precio unitario de la estabilización, con las siguientes dimensiones:

Espesor = 0.30 m

Largo = 100 m

Ancho = 7 m

Volumen = $100 \times 7 \times 0.3 = 210 \text{ m}^3$.

Instalación de Gas más accesorios = 20\$/ml

Para el largo del tramo se necesitan 20 tuberías de 7 m = 140 ml de tubería.

Precio de la tubería = $140 \times 10 = 1400 \text{ $/m}$

1400 \$  210 m³.

X=  1 m³.

X= 6.67 \$/m³

Precio Unitario = 46.40 Bs/ m³

4.12. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de un riguroso y extenso análisis de los diferentes tipos de suelo y sus propiedades, a partir de los resultados obtenidos y mediante cuadros comparativos se analiza las propiedades que mejoran con la estabilización aplicada a los suelos finos expansivos.

Muestra	C.B.R Natural	Días al horno	Temperatura	C.B.R estabilizados			
				Tiempo en cámara húmeda (días)			
			°C	1	15	30	60
Mercado del Sur	3 - 2	1	100	6 - 3	6 - 4	6 - 5	7 - 5
El Tejar	3 - 2	1	100	5 - 4	5 - 5	6 - 5	7 - 5
Parada del Norte	4 - 3	1	100	7 - 6	7 - 6	7 - 6	8 - 6
Mercado del Sur	3 - 2	3	100	6 - 4	7 - 6	8 - 6	9 - 6
El Tejar	3 - 2	3	100	5 - 4	6 - 5	7 - 6	8 - 6
Parada del Norte	4 - 3	3	100	7 - 6	7 - 6	7 - 6	8 - 6
Mercado del Sur	3 - 2	1	300	7 - 6	8 - 6	9 - 6	10 - 7
El Tejar	3 - 2	1	300	8 - 6	8 - 7	9 - 7	10 - 9
Parada del Norte	4 - 3	1	300	8 - 5	9 - 6	9 - 7	10 - 8
Mercado del Sur	3 - 2	3	300	10 - 9	11 - 8	12 - 9	14 - 10
El Tejar	3 - 2	3	300	9 - 7	10 - 8	11 - 9	13 - 9
Parada del Norte	4 - 3	3	300	9 - 7	10 - 8	11 - 9	16 - 15

Cuadro N°9 Comparación de los C.B.R de suelo Natural Vs C.B.R suelo estabilizado.

Una de las características más importantes de un suelo, que es considerada para cualquier tipo de diseño, es su capacidad de soporte del suelo a su , esto se mide mediante el ensayo de C.B.R, que indica el valor índice de C.B.R.

- ◆ El suelo a medida que aumenta la temperatura del horno y los días en él, se vuelve más resistente, es decir que alcanza una mayor resistencia a la penetración, con este incremento del C.B.R, el material se convierte en un suelo cuyas propiedades mejoran haciendo que el suelo sea apto para las

capas sub rasantes, de acuerdo a la siguiente tabla, donde se indica para qué capas se suele utilizar cierto tipo de suelo.

C.B.R	CLASIFICACION GENERAL	USOS	UNIFICADO	AASHTO
0 - 3	Muy pobre	Sub rasante	OH-CH-MH-OL	A-5, A-6 A-7
3 - 7	Muy pobre a regular	Sub rasante	OH-CH-MH-OL	A-4, A-5 A-6, A-7
7 - 20	Regular	Sub base	OL-CL-ML-SC- SM-SP	A-2, A-4 A-6, A-7
20 - 50	Bueno	Sub base y Base	GM-GC-SW- SM-SP-GP	A-1-a, A-2-5 A-3, A-2-6
>50	Excelente	Base	GW-GM	A-1-a, A-2-4 A-3

Cuadro N°10 Rangos de C.B.R según Clasificación y Uso

El incremento de la resistencia se debe a que el suelo al ser sometido a elevadas temperaturas, durante diferentes tiempos, lo que se produce es una cocción de la arcilla, similar a la cocción que se realiza a las arcillas, para obtener ladrillos resistentes, pero en menor proporción haciendo que adquiera mejores propiedades, como el incremento de los C.B.R.

La *expansión*, se da en los suelos finos, una vez que se incrementa la humedad, lo cual es perjudicial para las capas su rasantes y a su vez causará fallas en las demás capas, es por ello que la expansión debe reducir en cuanto sea posible para que no existan grandes cambios de volumen.

A continuación se presenta cuadros comparativos sobre la expansión de los especímenes:

1 día en Cámara Húmeda					
N°	Muestra	Días Horno	Temp. °C	Expansiones del Suelo Natural	Expansiones del Suelo Estabilizado
				%	%
1	Mercado del Sur	1	100	3.15	2.09
2	El Tejar	1	100	2.17	2.04
3	Parada del Norte	1	100	2.10	1.60
4	Mercado del Sur	3	100	3.15	2.05
5	El Tejar	3	100	2.17	1.48
6	Parada del Norte	3	100	2.10	1.51
7	Mercado del Sur	1	300	3.15	1.80
8	El Tejar	1	300	2.17	1.76
9	Parada del Norte	1	300	2.10	1.46
10	Mercado del Sur	3	300	3.15	1.62
11	El Tejar	3	300	2.17	0.93
12	Parada del Norte	3	300	2.10	1.02

Cuadro N°11 Comparación, expansión del suelo Natural con expansión del suelo estabilizado (1 día en cámara húmeda)

15 día en Cámara Húmeda					
N°	Muestra	Días Horno	Temp. °C	Expansiones del Suelo Natural	Expansiones del Suelo Estabilizado
				%	%
1	Mercado del Sur	1	100	3.15	2.14
2	El Tejar	1	100	2.17	2.04
3	Parada del Norte	1	100	2.10	1.31
4	Mercado del Sur	3	100	3.15	1.34
5	El Tejar	3	100	2.17	1.49
6	Parada del Norte	3	100	2.10	1.45
7	Mercado del Sur	1	300	3.15	1.55
8	El Tejar	1	300	2.17	1.52
9	Parada del Norte	1	300	2.10	1.36
10	Mercado del Sur	3	300	3.15	0.61
11	El Tejar	3	300	2.17	0.74
12	Parada del Norte	3	300	2.10	0.88

Cuadro N°12 Comparación, expansión del suelo Natural con expansión del suelo estabilizado (15 días en cámara húmeda)

30 día en Cámara Húmeda					
Nº	Muestra	Días Horno	Temp. °C	Expansiones del Suelo Natural %	Expansiones del Suelo Estabilizado %
1	Mercado del Sur	1	100	3.15	1.65
2	El Tejar	1	100	2.17	1.43
3	Parada del Norte	1	100	2.10	1.11
4	Mercado del Sur	3	100	3.15	1.27
5	El Tejar	3	100	2.17	1.07
6	Parada del Norte	3	100	2.10	0.99
7	Mercado del Sur	1	300	3.15	0.54
8	El Tejar	1	300	2.17	0.99
9	Parada del Norte	1	300	2.10	1.14
10	Mercado del Sur	3	300	3.15	0.63
11	El Tejar	3	300	2.17	0.64
12	Parada del Norte	3	300	2.10	0.54

Cuadro N°12 Comparación, expansión del suelo Natural con expansión del suelo estabilizado (30 días en cámara húmeda)

60 días en Cámara Húmeda					
Nº	Muestra	Días Horno	Temp. °C	Expansiones del Suelo Natural %	Expansiones del Suelo Estabilizado %
1	Mercado del Sur	1	100	3.15	1.65
2	El Tejar	1	100	2.17	1.06
3	Parada del Norte	1	100	2.10	1.09
4	Mercado del Sur	3	100	3.15	0.74
5	El Tejar	3	100	2.17	0.94
6	Parada del Norte	3	100	2.10	0.90
7	Mercado del Sur	1	300	3.15	0.55
8	El Tejar	1	300	2.17	0.86
9	Parada del Norte	1	300	2.10	0.74
10	Mercado del Sur	3	300	3.15	0.79
11	El Tejar	3	300	2.17	0.70
12	Parada del Norte	3	300	2.10	0.53

Cuadro N°12 Comparación, expansión del suelo Natural con expansión del suelo estabilizado (60 días en cámara húmeda)

- ◆ A partir de los resultados, se observa que las expansiones disminuyen cuando se da un incremento de la temperatura y el tiempo que se mantiene en el horno.
- ◆ El caso más favorable se presenta en los suelos sometidos a 300°C durante 3 días en el horno, y tratados por 60 días en la cámara húmeda, es decir que aunque el suelo vuelva a adquirir humedad después de la estabilización este no recupera sus propiedades iniciales.

Una propiedad característica de los suelos finos expansivos es su valor elevado de límite líquido, límite plástico y el índice de Plasticidad, propiedades analizadas para los suelos sometidos por tres días a 300°C, y tratados durante 60 días en cámaras húmedas, ya que se considera es el tiempo donde los suelos tienen mayor incremento de humedad, como se presenta en la siguiente tabla:

60 DIAS EN CAMARA HUMEDA									
N°	Muestra	Días Horno	Temp. °C	Suelo Natural LIMITES DE CONSISTENCIA			Suelos Estabilizado LIMITES DE CONSISTENCIA		
				LL	LP	IP	LL	LP	IP
1	Mercado del Sur	1	100	65,12	28,41	36,71	59,16	27.13	32.02
2	El Tejar	1	100	38,71	24,73	13,98	36,55	23.94	12.60
3	Parada del Norte	1	100	26,12	7,18	18,94	25,95	12.64	13.31
4	Mercado del Sur	3	100	65,12	28,41	36,71	52,43	26.76	25.67
5	El Tejar	3	100	38,71	24,73	13,98	32,91	20.34	12.58
6	Parada del Norte	3	100	26,12	7,18	18,94	24,69	12.38	12.31
7	Mercado del Sur	1	300	65,12	28,41	36,71	46,88	24.96	21.92
8	El Tejar	1	300	38,71	24,73	13,98	31,85	19.86	11.99
9	Parada del Norte	1	300	26,12	7,18	18,94	23,51	11.88	11.63
10	Mercado del Sur	3	300	65,12	28,41	36,71	42,78	21.85	20.93
11	El Tejar	3	300	38,71	24,73	13,98	28,37	18.17	10.20
12	Parada del Norte	3	300	26,12	7,18	18,94	20,20	11.19	9.01

Cuadro N°13 Comparación, límites de consistencia del suelo Natural con límites de consistencia del suelo estabilizado (60 días en cámara húmeda)

De los resultados del cuadro N°15 sobre la comparación de los límites de consistencia de los suelos en su estado natural comparados con los límites de consistencia de los suelos estabilizados se observa que:

- ◆ El límite líquido desciende, con respecto a los resultados obtenidos de la caracterización del suelo, comportándose mejor cuando el suelo ha sido tratado durante 3 días en el horno a una temperatura de 300°C y 60 días en las cámaras húmedas.
- ◆ Al igual que el límite líquido, el límite plástico ha disminuido sus valores, esto quiere decir que el material ya no se comporta como un material plástico, mostrando que los suelos después de la aplicación de gradiente térmico el suelo tiende a disminuir, su plasticidad.
- ◆ En cuanto al índice de plasticidad, este valor ha disminuido, manteniéndose en un rango por debajo del ensayo de caracterización, se recuerda que el índice de plasticidad es la diferencia del límite líquido menos el límite plástico, y al disminuir estos valores automáticamente disminuye el índice de plasticidad.

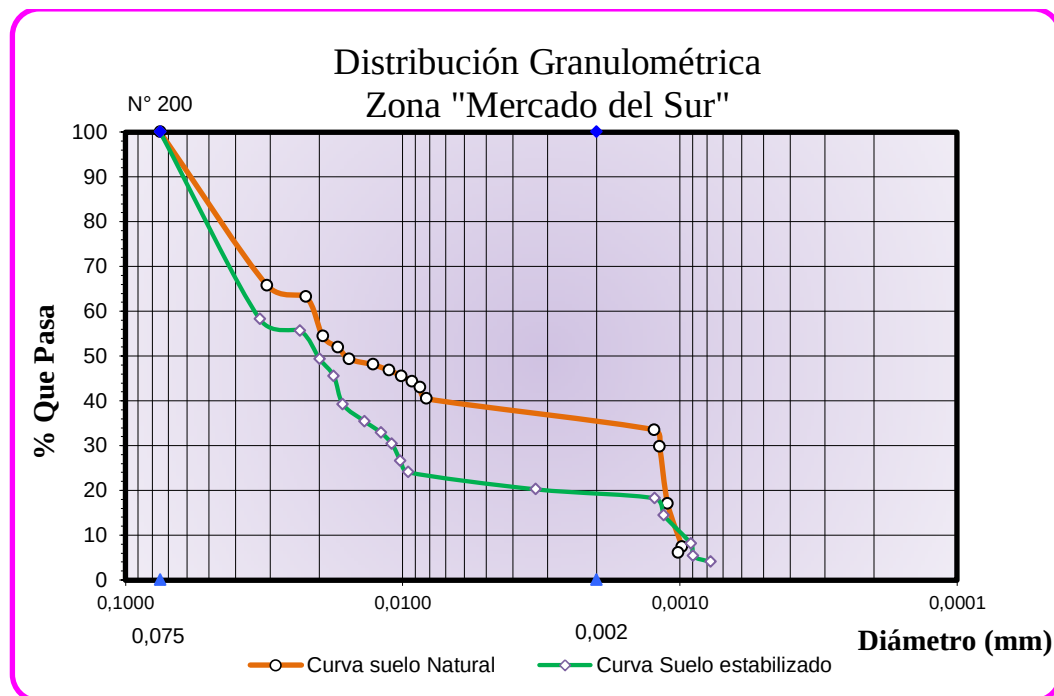
A continuación se presenta un cuadro general de resumen, indicando las propiedades que mejoraron al ser estabilizado el suelo, el cuadro presenta los resultados del suelo estabilizado a 300°C, y tratado durante 60 días en las cámaras húmedas, tiempo en el cual los suelos adquieren mayor humedad.

Cuadro N°16 Comparación general de las propiedades de los suelos para diferentes periodos y temperaturas en el horno, después de 60 días colocados en cámaras húmedas

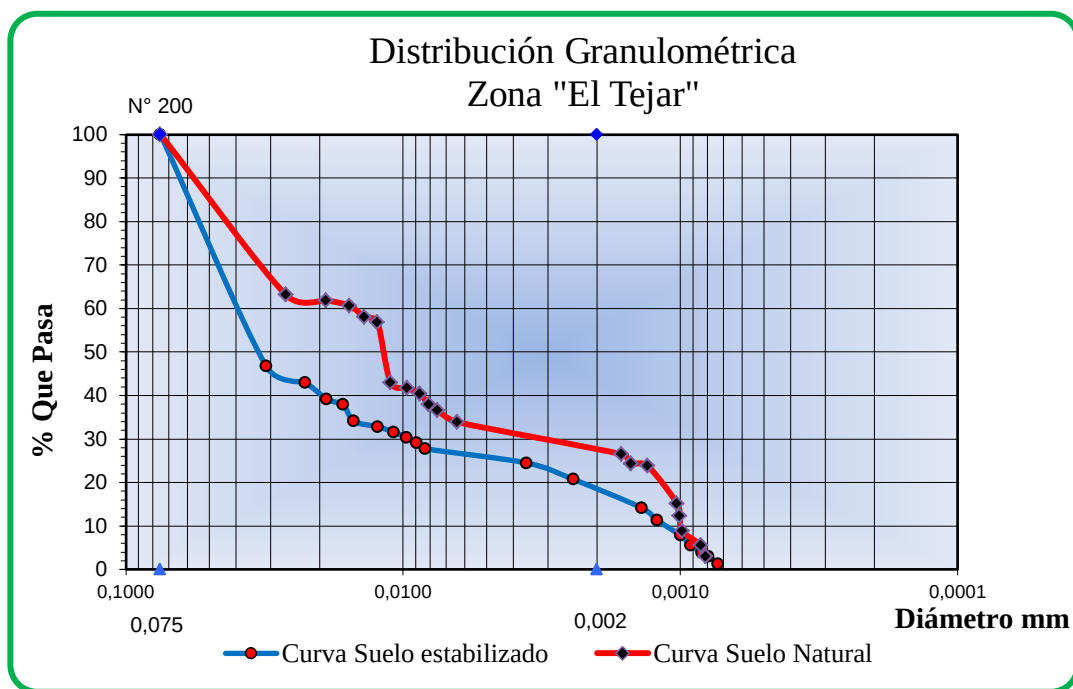
N°	Muestra	Días al horno	Temp. °C	C.B.R				Expansiones		Límites de Consistencia					
				Natural		Estabilizado		Natural	Estabilizado	Natural			Estabilizado		
				100%	95%	100%	95%	%	%	LL	LP	IP	LL	LP	IP
1	Mercado del Sur	1	100	3	2	7	5	3.15	1.65	65,12	28,41	36,71	59,16	27.13	32.02
2	El Tejar	1	100	3	2	7	5	2.17	1.06	38,71	24,73	13,98	36,55	23.94	12.60
3	Parada del Norte	1	100	4	3	8	6	2.10	1.09	26,12	7,18	18,94	25,95	12.64	13.31
4	Mercado del Sur	3	100	3	2	9	6	3.15	0.74	65,12	28,41	36,71	52,43	26.76	25.67
5	El Tejar	3	100	3	2	8	6	2.17	0.94	38,71	24,73	13,98	32,91	20.34	12.58
6	Parada del Norte	3	100	4	3	8	6	2.10	0.90	26,12	7,18	18,94	24,69	12.38	12.31
7	Mercado del Sur	1	300	3	2	10	7	3.15	0.55	65,12	28,41	36,71	46,88	24.96	21.92
8	El Tejar	1	300	3	2	10	9	2.17	0.86	38,71	24,73	13,98	31,85	19.86	11.99
9	Parada del Norte	1	300	4	3	10	8	2.10	0.74	26,12	7,18	18,94	23,51	11.88	11.63
10	Mercado del Sur	3	300	3	2	14	10	3.15	0.79	65,12	28,41	36,71	42,78	21.85	20.93
11	El Tejar	3	300	3	2	13	9	2.17	0.70	38,71	24,73	13,98	28,37	18.17	10.20
12	Parada del Norte	3	300	4	3	16	15	2.10	0.53	26,12	7,18	18,94	20,20	11.19	9.01

De una manera general en el cuadro 16 se observa que los suelos estudiados de alta, media y baja expansión, presentan un mejor comportamiento al someterlas al horno por 3 días a una temperatura de 300°C, aumentando sus valores de C.B.R, disminuyendo la plasticidad, característica muy importante debido a que el suelo mientras menos plástico sea, será menos propenso a los cambios bruscos de volumen, y la disminución de la expansión.

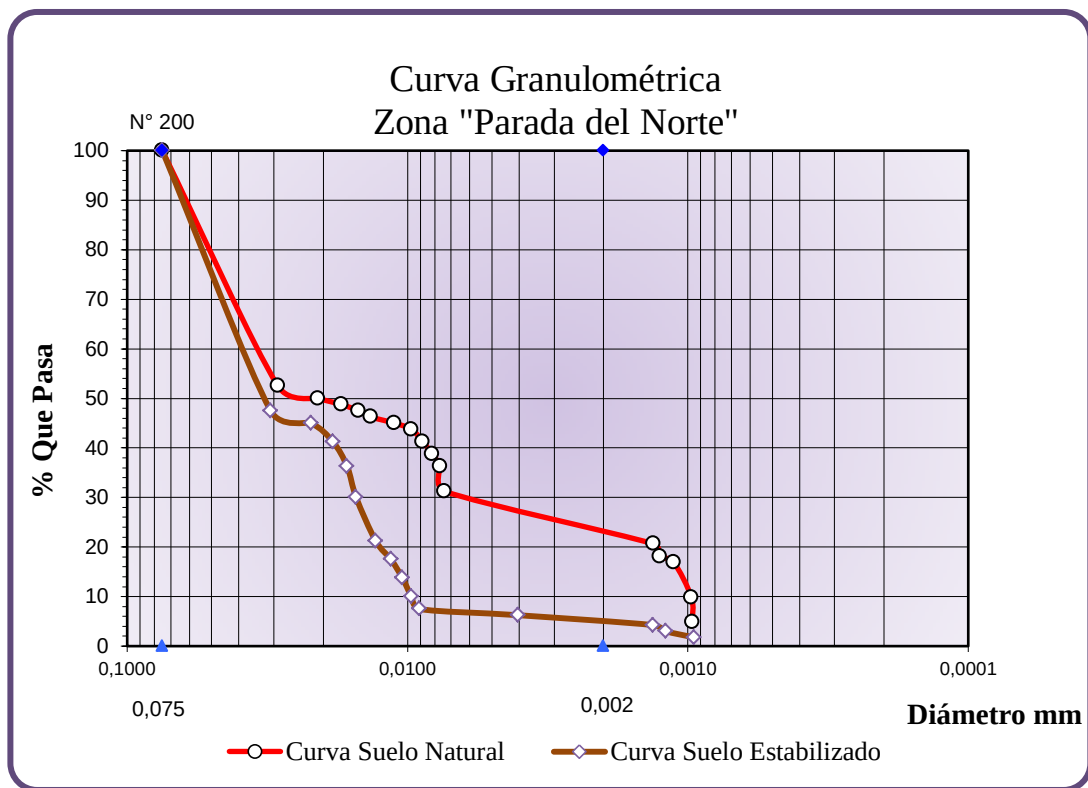
Se realiza el ensayo de granulometría por el método del hidrómetro para observar cuanto disminuye el porcentaje de arcilla, como se observa en las siguientes curvas granulométricas:



Cuadro N°14 Comparación de Curva Granulométrica suelo "Mercado del Sur"



Cuadro N°14 Comparación de Curva Granulométrica suelo "El Tejar"



Cuadro N°15 Comparación de Curva Granulométrica suelo "Parada del Norte"

3 días en Horno a 300°C y 60 Días en Cámaras húmedas				
Muestra	Hidrómetro			
	Estado natural		Estabilizado	
	% Limo	%Arcilla	% Limo	%Arcilla
Mercado del Sur	65,718	34,282	81,04	18,96
El Tejar	72,78	27,22	81,96	18,04
Parada del Norte	91,93	8,07	95,255	4,745

Tabla N°15 Comparación de los porcentajes de arcilla y limo en los suelos

Para los tres tipos de suelo el valor del porcentaje de arcilla disminuye, el suelo pierde elasticidad, haciendo que sea menos compresible aumentando su resistencia, y disminuyendo la expansión del mismo, dado que el porcentaje de arcilla provoca en estos suelos los grandes cambios de volumen, por lo tanto al disminuir este valor el suelo adquiere mejores características.

Por otra parte se analiza los valores del límite de contracción, ya que este parámetro indica la humedad máxima de un suelo para la cual la una reducción de la humedad no causa disminución de volumen de suelo, el análisis se realiza, para los suelos que dieron mejor resultado con la estabilización, estos son los sometidos a 300°C por 3 días en el horno, y tratados durante 60 días en las cámaras húmedas.

Muestra	Límite de Contracción (%)	
	Estado Natural	Suelo Estabilizado
Mercado Del Sur	6,26	6,96
El Tejar	10,22	14,47
Parada del Norte	14,3	18,12

Tabla N°15 Comparación de límites de contracción

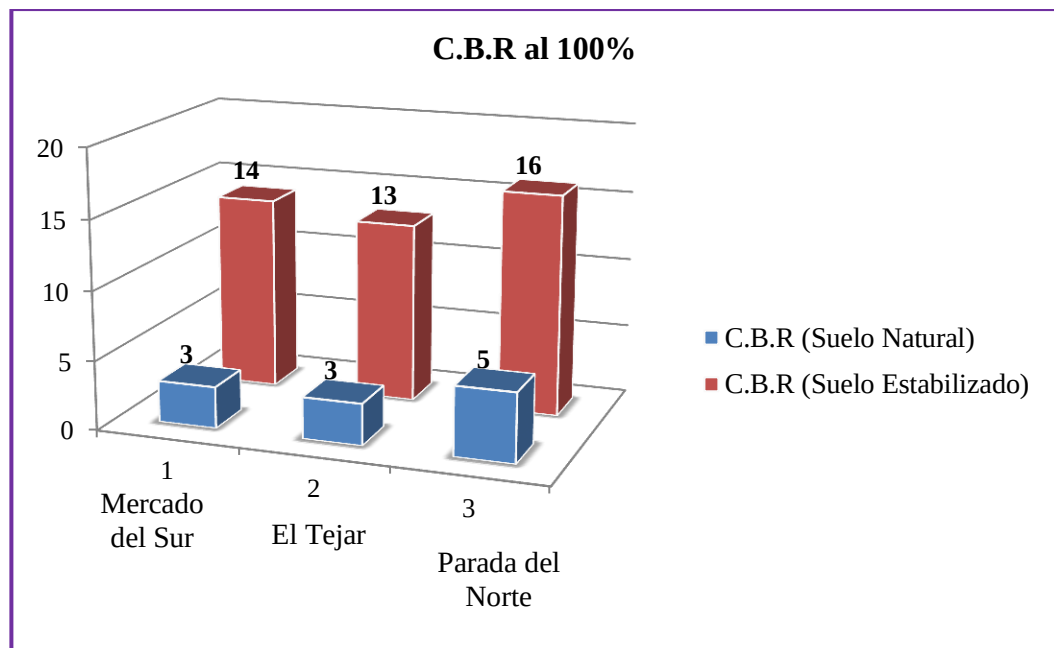
Jhosep Bowles (1982) menciona “Si el límite de contracción es igual a 5%, cuando el contenido de agua “in situ” excede este valor, el suelo comienza a expandirse, entre más pequeño el límite de contracción más susceptible es el suelo al cambio de volumen, a menor humedad del suelo menos agua se requiere para iniciar un cambio de volumen”, si se observa los resultados, el valor del límite de

contracción aumenta lo cual demuestra que el suelo ya no es tan susceptible al cambio volumétrico como lo era inicialmente.

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

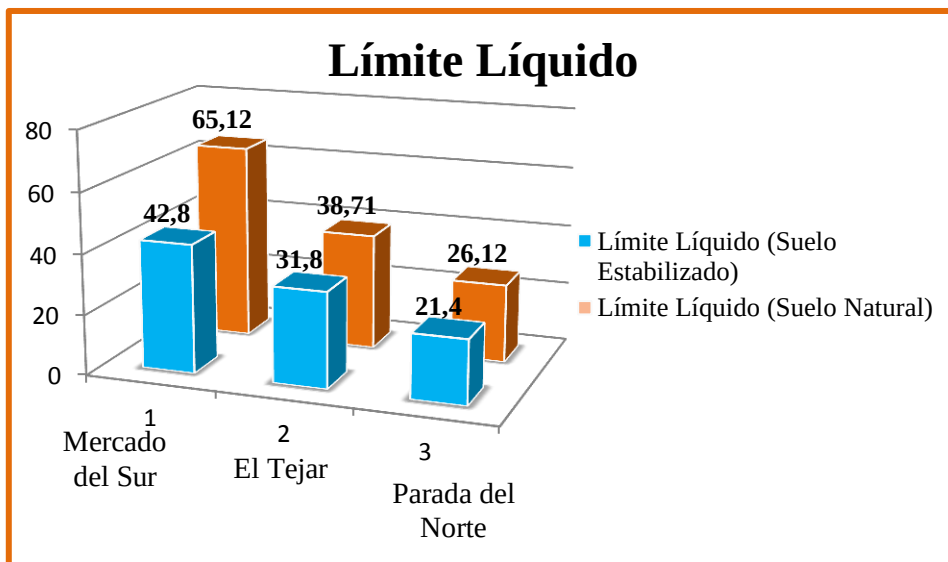
5.1.CONCLUSIONES.

- ◆ Se confirma a partir de la literatura, que en procesos de aplicación de gradientes térmicos en suelos finos expansivos que a temperaturas de 100°C, el agua comienza a evaporarse, mientras que los cambios más representativos ocurren en temperaturas de 300°C adelante, los suelos finos expansivos no presentan recuperación de las propiedades iniciales ya que estas se estabilizan.
- ◆ Los valores iniciales de C.B.R tienden a aumentar, con la aplicación del gradiente térmico, el incremento más óptimo se da cuando se somete las muestras a una temperatura de 300°C por 3 días en el horno, y un tratamiento del suelo en las cámaras húmedas por un periodo de 60 días, los resultados se ven reflejados en la siguiente gráfica.

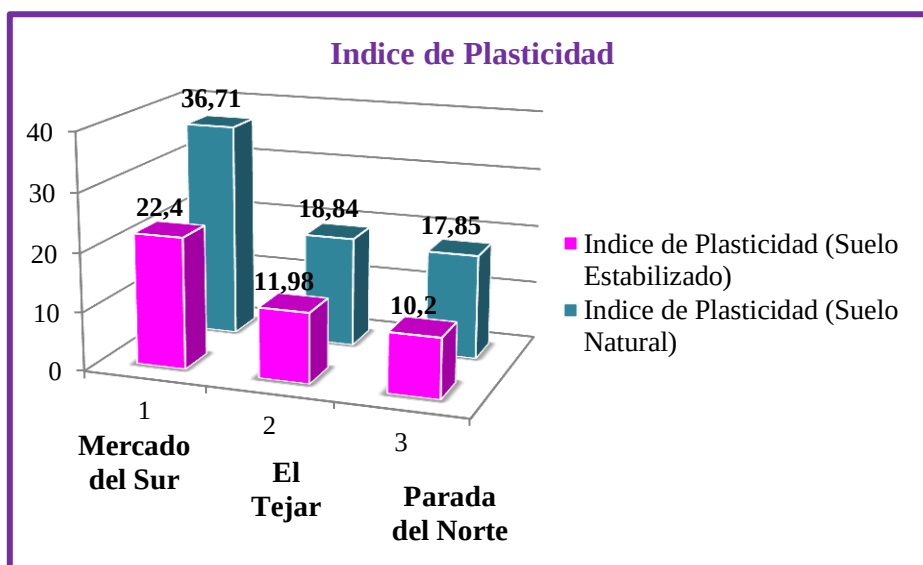


Grafica N°1 Comparación de C.B.R

- ◆ Analizando los límites de consistencia, para los suelos sometidos a 300°C durante 3 días en el horno, y tratados por 60 días en cámaras húmedas, se observa que los valores disminuyen con respecto a sus valores iniciales del suelo en su estado natural, hecho muy favorable para que se reduzcan los cambios volumétricos de los suelos finos expansivos.

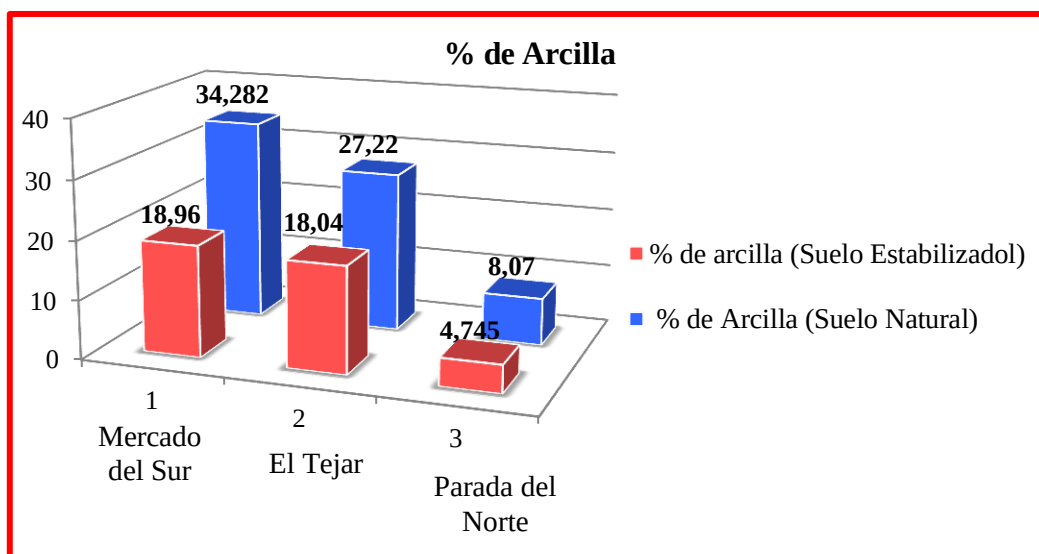


Grafica N°1 Comparación de Límite líquido



Grafica N°1 Comparación del Índice de Plasticidad

- ◆ Por otra parte realizando un análisis granulométrico de las tres muestras, colocadas durante 3 días en el horno a una temperatura constante de 300°C, luego de ser tratados 60 días en la cámara húmeda, periodo en el cual se dan las condiciones más críticas de la estabilización, se observa en la gráfica N que los porcentajes de arcilla disminuyen, para los tres tipos de suelos.



Grafica N°1 Comparación del Índice de Plasticidad

- ◆ Se observa que los porcentajes de arcilla presente en los diferentes tipos de suelo, ha disminuido, es por este motivo que el suelo mejora sus propiedades, es decir reduce su plasticidad, haciendo al suelo menos compresible, e incrementando su valor soporte, además de mejorar sus condiciones de plasticidad.
- ◆ De los límites de contracción de los tres casos más críticos, cuando los suelos son sometidos durante 3 días en el horno a una temperatura constante de 300°C, luego de ser tratados 60 días en la cámara húmeda, se observa que los suelos aumentan el porcentaje de límite de contracción, para el suelo de la Zona del Mercado del sur incrementa de 6.26 a 6.96%, para el suelo de la

zona de El tejär incrementa de 10.22 a 14.47 %, y para el suelo de la zona de La Parada del norte este valor incrementa de 14.3 a 18.2, por lo tanto se concluye que el suelo al incrementar el porcentaje del límite de contracción será menos susceptible a los cambios de volumen, caso muy favorable ya que al hacer que el suelo aumente su límite de contracción aseguraremos de que los cambios de volumen se den en menor proporción comparados con el cambio de volumen del suelo en su estado natural.

- ◆ Con los valores obtenidos de C.B.R valores que van desde 9 a 16 %, para los tres tipos de suelo, podemos decir que los suelos se convirtieron en suelos aptos para ser utilizados en la capa sub rasante, llegando a cumplir los requerimientos, en las obras.
- ◆ Este método de estabilización es aplicable en nuestro medio, actualmente en no se tiene un amplio conocimiento sobre este método, lo que se logra es dar el primer paso, para posteriormente aplicarlo en el campo, de manera que se evite el reemplazo de los suelos finos expansivos, ya que sus condiciones iniciales son pésimas.
- ◆ Después de un análisis de todas las propiedades de los suelos estudiados, finalmente se concluye que los resultados obtenidos son favorables para la investigación, dado que se logra mejorar las características de los suelos finos expansivos, aumentando los valores de resistencia, reduciendo su plasticidad, logrando cumplir los objetivos trazados tanto técnica como académicamente.

5.2.RECOMENDACIONES

- ◆ Es recomendable extraer la suficiente cantidad de material para realizar todos los ensayos ya que si este no es suficiente se corre el riesgo de que al volver a sacar más muestra esta esté alterada.

- ◆ Una vez realizada la compactación con la humedad optima, se debe extraer la muestra con el mayor cuidado para que esta no sea alterada, al introducir al horno.
- ◆ Se debe tener cuidado, al manejar la muestra para que esta no se desmorone ya que al someterla a elevadas temperaturas el suelo se vuelve totalmente seco y presenta grietas.
- ◆ Al momento de introducir a la cámara húmeda se debe tratar de no alterar la muestra para que esta no pierda las propiedades adquiridas.
- ◆ Cabe resaltar que se debe tener especial cuidado al momento de realizar el ensayo de límite de contracción, ya que para este se utiliza el mercurio, el cual es una sustancia toxica, tanto como para la piel como para los ojos principalmente, por lo tanto se deben utilizar gafas, mascarilla y guantes.
- ◆ Antes de realizar los ensayos de C.B.R, no se debe olvidar de engrasar o colocar cualquier tipo de aceite, esto para que la extracción del espécimen sea más fácil, y no se altere la muestra.

BIBLIOGRAFIA

- Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica; Terzaghi, K., 1978.
- Reunión del Comité Técnico para suelos expansivos de la I.S.S.M.F.E, Coincidencias Técnicas Logradas, Trevisán Jorge, 1987.
- Mejoramiento y Estabilización de suelos. Fernández Loaiza, Carlos. Ed. Limusa. México DF. , 1982.
- La ingeniería de los suelos en las vías terrestres: Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas, Tomo 1 y 2. Rico Rodríguez, Alfonso y Castillo Mejía, Hermilo. Ed. Limusa. México D.F., 2005.
- Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Das Braja M. Ed Thomson Learning. México D.F 1999.
- Fundamentos de la mecánica de suelos (tomo 1), Juárez Badillo, Eulalio y Ric Rodríguez, Alfonso, Ed Limusa, Tercera edición. México D.F 2006.