

1.1 INTRODUCCIÓN

Frecuentemente el ingeniero civil puede encontrarse en un lugar específico con suelos poco o nada adecuados para la utilización para ciertos propósitos. Este hecho obliga al profesional en esta área, a efectuar un análisis de la situación y tomar decisiones, que pueden ser: aceptar el suelo natural tomando en cuenta su calidad real en el diseño a efectuar, o caso contrario retirar el material problemático y reemplazarlo por otro de características adecuadas. Por otro lado existe una tercera alternativa de solución al problema, que bajo ciertos factores vitales como son los económicos y técnicos puede aplicarse. Esta es la estabilización de suelos que con su amplia gama de técnicas puede mejorar una o más propiedades del material problemático para que el mismo sea capaz de cumplir con los requerimientos necesarios que se exige en el campo de la ingeniería.

El comportamiento de los suelos cohesivos en estado natural y como material de fundación, representa un gran problema en la construcción, ya que cuando este tipo de suelos, es sometido a variaciones de humedad, este sufre contracciones e hinchamientos, además con cierto contenido de humedad se convierte en un material blando y resbaladizo que provoca fallas en los pavimentos e inestabilidad en las estructuras fundadas sobre estos. Frente a esta situación comúnmente en nuestro medio se resuelve por la aplicación de una técnica de uso muy difundido que es la de acarrear de los cauces de los ríos existentes agregados granulares para estabilizar las calles, sin hacer un estudio y análisis comparativo con otras técnicas de estabilización que tal vez podrían llevar a obtener una alternativa óptima para mejorar las calles conformadas sobre suelos cohesivos.

Diversos son los procedimientos para lograr la mejoría de los suelos, pero dos de las más efectivas, son las técnicas de estabilización por medios mecánicos y por medios químicos.

La estabilización de los suelos en la ingeniería practica, ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar el comportamiento esfuerzo deformación de los suelos.

El mejoramiento de los suelos ha atendido a diversos requerimientos, tales como la resistencia de esfuerzo cortante, la deformabilidad o compresibilidad, la estabilidad volumétrica ante la presencia de agua, entre otros, buscando en todos los casos, un buen comportamiento esfuerzo deformación de los suelos y de la estructura y que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil.

Hoy en día en diversos países del mundo se cuenta con una gama de datos a base de estudios realizados dando como resultados especificaciones, manuales y algunos proyectos de investigación que sirven como guías para las diferentes estabilizaciones, pero para la adición de la Vinaza de caña de azúcar en la estabilización de suelos cohesivos, no existe más que un trabajo de investigación ya que es un método que se pretende incorporar dentro de las estabilizaciones, debido a que se pretende economizar los costos, llegando a tener una amplia experiencia.

Con el desarrollo del país, la demanda creciente de infraestructura de transporte para unir todas las regiones exige que se optimice la inversión y se cumpla con los objetivos de cada proyecto. La utilización adecuada de nuevas tecnologías que permitan un mejor desempeño de las estructuras de pavimento e incrementen su vida útil, resultan importantes para el diseño de nuevas vías y el mantenimiento de las existentes.

En nuestro país no existe mucha información ni mucha experiencia, peor aun con manuales de este tipo, la escasa base de datos desarrollada en nuestro país nos muestra la falta de estudios que faltan por hacer, de ahí que nace la idea de buscar nuevas metodologías, y buscar minimizar los costos de mantenimiento.

Este tipo de estabilización suelo vinaza como material estabilizante se lo realizó en la facultad de ingeniería civil y arquitectura Unheval- Huanuco – PERU en las bodas de perla de dicha facultad por el ingeniero Edgar G. Matto Pablo.

Este método no se encuentra normalizado por que las características del suelo y de la vinaza son distintas para diferentes zonas por lo cual los resultados serán diferentes.

En Bolivia no se tiene experiencia de este tipo de estabilización y por lo tanto no tenemos carreteras estabilizadas por el método mencionado anteriormente.

En el departamento de Tarija de igual forma no se hizo este tipo de estudio.

El autor de este trabajo pretende experimentar este tipo de estabilización y poder confirmar que este tipo de estabilización es viable, utilizando este aditivo que se desperdicia en la Ciudad de Bermejo el cual es un contaminante potencial en las aguas del río Tarija .

Teóricamente se utilizarán métodos de estabilización ya conocidos la aplicación para estos ensayos se realizarán con materiales de la ciudad de (Bermejo), El presente trabajo de investigación pretende convertirse en un lineamiento referencial para trabajos futuros al respecto, ya que es de suma importancia tener pleno conocimiento de las características particulares del suelo y de la vinaza usada, y por lo tanto brindar una alternativa de solución más económica a las instituciones encargadas de construir caminos.

Por último, esta investigación pretende aprovechar los recursos naturales y sus desechos, propios de la región a fin de generar un valor agregado, planteando Alternativas técnicas, que redunden en beneficio de los usuarios.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Existen importantes razones de orden técnico, económico y ambiental que justifican el presente trabajo de investigación, las cuales brevemente se dan a conocer a continuación:

- Los suelos granulares bien graduados que son adecuados para construir un pavimento son escasos en nuestro medio, es por eso que se aplica más de una técnica de estabilización para lograr en el suelo las propiedades que se asemejen a los suelos antes mencionados, pero siempre buscando tener beneficios que justifiquen los costos de manera óptima.
- En el campo de la ingeniería vial, los suelos cohesivos son considerados como suelos inadecuados para formar parte de la estructura de un pavimento; estos suelos son los más adecuados para la estabilización con vinaza.
- Mediante esta estabilización podremos aprovechar los recursos naturales y sus desechos propios de la región a fin de generar un valor agregado.
- En lo económico tiene un gran éxito pues el material que se utilizara en la estabilización es un desecho y por consiguiente el costo del material estabilizante será mínimo.
- Con relación al medio ambiente este material es desechado el cual desemboca a al río Tarija (La Cachaza) y es un contaminante para los peces y el agua.

1.3 SITUACIÓN PROBLEMICA

Uno de los problemas fundamentales en las obras viales, es la capacidad de soporte de los suelos que conforman la sub Rasante, trayendo como consecuencia el constante deterioro de las vías.

El conocimiento de las técnicas de estabilización, dividen a esta en tres formas generales, la física, la mecánica y la química, siendo la que mas desarrollo ha tenido hasta la actualidad la Estabilización Química, que busca a través del estabilizante generar una reacción química en el suelo, modificando las características y propiedades del suelo natural, dándole mayor capacidad de respuesta a los requerimientos de carga dinámica a la que están sujetas.

1.4 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

¿Puede estabilizarse un suelo cohesivo con vinaza de caña?

1.5 OBJETO DE ESTUDIO

Estudio de una nueva técnica para mejorar la calidad de suelos malos con la inclusión de un estabilizante que ayude a mejorar las propiedades del suelo existente.

1.6 CAMPO DE ACCION

Alternativa para solucionar problemas de estabilización de suelos cohesivos con vinaza de caña de azúcar.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 OBJETIVO GENERAL

- Utilizar la vinaza de caña de azúcar como un material para estabilizar suelos cohesivos y proporcionar todos los datos necesarios, suficientes proveniente de un estudio minucioso de laboratorio de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla de suelo – vinaza.

1.7.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer cuáles son las propiedades más importantes del material cohesivo que se modifican con la adición de vinaza de caña de azúcar
- Determinar las propiedades físicas y químicas más relevantes de la vinaza producida en la región
- Determinar experimentalmente en que magnitud y sentido se ven afectados las propiedades del suelo cohesivo.
- Aplicar la vinaza reemplazando el volumen de agua necesario para la compactación, para diferentes porcentajes de volumen de agua.
- Determinar si este método propuesto es viable o no, constructivamente y económicamente.

1.8 ALCANCE

En el capítulo I dará a conocer la importancia del tema en estudio, los objetivos o resultados esperados, justificar el por qué de su estudio y otros aspectos importantes que engloban el problema planteado.

En el capítulo II estudiara los principios de estabilización de suelos, los métodos ya conocidos por los cuales podremos adquirir conocimientos básicos que nos servirán para realizar la investigación.

También se profundizara en cuanto a las propiedades que se mejoran después de haber estabilizado el suelo.

- Plasticidad
- Resistencia
- Permeabilidad
- Durabilidad

Mediante toda esta información recopilada podremos establecer el tipo de estabilización que se realizara en el presente trabajo.

En el capítulo III se dará a conocer los conceptos fundamentales de lo que es la vinaza, su uso en la actualidad, características del suelo sus propiedades de los suelos en estudio, también su composición química del material. Con respecto a los suelos en estudio de igual forma se dotara de la información recopilada y analizada sobre este material.

En el capítulo IV se detallara los ensayos que se realizaran, su concepto y procedimiento para su realización.

En el capítulo V se realizara la aplicación práctica mediante los ensayos de laboratorio necesarios para su verificación con fines de estabilización.

Para esto se tomara como muestra dos tipos de suelo los cuales deben cumplir con los requisitos de ser cohesivos descartando aquellos suelos que no cumplan con este requisito, las muestras serán dos en función de su plasticidad, esto poder hacer un análisis de su reacción al estabilizante y poder sacar las conclusiones de las propiedades que se mejoran con la adición de la vinaza.

Los porcentajes de Vinaza que se utilizaran para los ensayos de la laboratorio serán del 0 % (suelo natural sin adición de vinaza) 25 %, 50 %, 75 %, 100% de Vinaza.

En el CAP. V se establecerá las conclusiones y recomendaciones las cuales serán en función de los resultados obtenidos.

2.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Se denomina estabilización de suelos al proceso de someter a los suelos naturales a ciertos tratamientos, para aprovechar sus mejores cualidades de manera que puedan soportar las condiciones adversas de clima, rindiendo en todo tiempo el servicio adecuado que de ellos se espera. Así, por ejemplo, se dice que se estabiliza un talud, cuando empleando el procedimiento adecuado para el caso (ya sea acostando el talud, revistiéndolo con mampostería o sembrando en él plantas adecuadas), se logra la eliminación de derrumbes, con lo que se evita el peligro de suspensiones de tránsito o de azolve de cunetas. Cuando se dice estabilización de acotamientos se entiende que mediante el procedimiento adecuado (ya sea revistiéndolos, empedrándolos, dándoles cohesión o sembrando pasto), se consiguen que no se deslaven y que distinguiéndose de la superficie de rodamiento del camino, permitan el estacionamiento de vehículos sin producir lodo y que en casos de emergencia pueda utilizarse como superficie de rodamiento para evitar accidentes. También se pueden estabilizar los suelos para aprovechar sus mejores cualidades y construir con ellos buenas terracerías, o adecuadas sub-bases y bases de pavimentos.

La estabilización de suelos consiste en la mezcla de suelo con aditivos para mejorar sus características. Los aditivos más usuales son la cal y el cemento, aunque pueden utilizarse otros (emulsiones o betún, cenizas volantes, escorias, etc.).

La estabilización puede realizarse en planta o in situ, aunque por razones económicas suele ser preferible esta última.

Sus principales campos de aplicación son:

Tratamiento de suelos plásticos en los fondos de desmonte y en las capas de asiento de los terraplenes.

Aumento de la capacidad de soporte de las capas de asiento, o disminución de sus espesores.

Si se encuentra en el camino suelos blandos, o con valor de soporte bajo se puede mejorar el sitio logrando tener una base de resistencia estructural con las siguientes medidas:

1. Agregando material de buena calidad sobre el suelo blando, como una capa de grava.
2. Mejorando el suelo blando en el lugar (in situ), mezclándolo con materiales como cal, cemento, asfalto, o químicos.
3. Puenteando el suelo blando, con materiales como geotextil o trozos de madera.
4. Eliminando el suelo pobre o suave y remplazándolo con un suelo de alta calidad o de material rocoso.
5. Limitando el uso del camino en época de lluvia (Cuando se trata de suelos arcillosos y limosos).
6. Drenando la superficie del camino con sistema efectivo de drenaje o sellando el suelo para no dejar infiltrar el agua.

La medida más importante que se debe tomar para mantener las características de resistencia del suelo es la de ***mantener el suelo seco***. Los agregados y los suelos granulares pierden algo de resistencia cuando están saturados; sin embargo, un poco de humedad es recomendable para reducir al mínimo el desmoronamiento y la formación de baches. Los suelos limosos son muy sensibles a la humedad, éstos pueden perder resistencia con un cambio pequeño del contenido de humedad. Los suelos ricos en arcillas pueden ser muy resistentes cuando están secos, y tardan en saturarse. Sin embargo, una vez mojados su resistencia es muy baja y fácilmente se forman huellas de rodadura y resulta que el camino sea intransitable. De modo que es muy importante que el camino cuente con un buen drenaje.

Cuando se compactan los suelos se aprietan los granos entre sí aumentando su fricción interna, lo que incrementa su poder soportante. Por otro lado, al densificarse la masa del suelo por la compactación, se reducen los vacíos del mismo y por lo tanto se reduce también la cantidad de agua que puede penetrar y afectar su resistencia al corte y causar cambios volumétricos perjudiciales.

Aunque la compactación mejora la calidad de los suelos, ella por sí, sola no proporciona la resistencia y durabilidad que necesitan las sub-bases y bases, pues aún los suelos bien

compactados son seriamente afectados por los cambios de humedad y por el desgaste del tránsito si no poseen cualidades indispensables.

Cuando hablamos de estabilización de suelos, nos referimos a procedimientos que alteran significativamente las propiedades esenciales del suelo con el único fin de mejorarlos y a ser los apropiados hacia algún uso específico en el campo de la ingeniería. Cuando este Objetivo es alcanzado, con seguridad el suelo estabilizado exhibe una durabilidad y sensibilidad al agua y una marcada y sostenida resistencia a la deformación frente a repetidas o continuas cargas aplicadas de la acción perjudicial del clima.

De esta manera la estabilización de suelos, abre la posibilidad de utilizar en caminos los suelos tolerables e incluso inadecuados para la construcción de terraplenes, pero también los suelos granulares de buenas características pero de estabilidad insuficiente como base y sub-base de un pavimento.

2.2 OBJETO DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos tiene por objeto procurar por diversos medios la estabilidad de ellos, para cualquier condición de tiempo y de servicio, entendiendo por estabilidad la permanencia en el tiempo de las características mecánicas obtenidas al momento de la construcción.

Estos medios o procesos van desde la incorporación a los suelos de materiales o nuevos elementos que proporcionen estabilidad, hasta la formación de verdaderos mecanismos de defensa contra la acción de las fuerzas climáticas.

La estabilización significa entonces, no solo llegar a un estado del suelo con suficiente resistencia a la acción destructora y deformante de las cargas, sino también asegurar la permanencia de ese estado a través del tiempo. Este último aspecto del proceso tiene fundamental importancia, ya que de su existencia, depende la existencia del primero.

2.3 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Existen diferentes sistemas que pueden emplearse para lograr estabilizar un suelo, los cuales exigen frecuentemente ciertos requisitos básicos para ser considerados como convenientes a ser cualquier aplicación en el campo de la ingeniería. Algunos de estos requisitos que deben cumplir los sistemas de estabilización son los siguientes:

- a) El material básico a emplear es el suelo, ya sea en estado natural en que se encuentra a lo largo del camino, adicionando de otros materiales o, acarreando lo de los depósitos o bancos cercanos.
- b) El material estabilizador debe desistir satisfactoriamente el tránsito de vehículos, para ello debe desarrollarse suficiente cohesión y fricción interna en el suelo
- c) El suelo estabilizado debe resistir la acción de los agentes atmosféricos para que pueda conservar sus buenas propiedades durante un largo periodo de tiempo.
- d) El sistema debe ser económico, para ello los materiales y los métodos de construcción deben ser convenientes en el costo.

De las diferentes técnicas de estabilización que existe en la actualidad, generalmente no todos cumplen un último requisito, esto ocurre especialmente en los países subdesarrollados como el nuestro, no se limita su uso en la mayoría de los casos debido al alto costo de los sistemas de estabilización.

La tecnología actual ha venido desarrollando diferentes tipos de estabilización de suelos; sin embargo, este trabajo reúne algunas de ellas y explica brevemente sus ventajas y desventajas en la siguiente sección.

2.3.1. ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

Anteriormente se ha mencionado lo relacionado a la estabilización de suelos con cal, que se refiere principalmente, a los tratamientos encaminados a proporcionar estabilidad a los suelos naturales que se van encontrando a lo largo de la franja vial, adicionándoles pequeñas cantidades de materiales de otra procedencia. En la estabilización mecánica de los suelos a menudo se acarrea de otros lugares la mayor parte de los materiales empleados, específicamente es el caso del presente trabajo.

La estabilización granulométrica se hace remontar usualmente a la segunda década del siglo XX, ocurriendo en los Estados Unidos los primeros trabajos en los que se usó con plena conciencia de sus objetivos. Los nombres de algunos ilustres pioneros de la mecánica de suelos, como Terzaghi, Casagrande no son ajenos a los desarrollos de inicio de estas técnicas.

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

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

Los buenos caminos enripiados no eran algo nuevo, pero si constituyó una novedad conocer la granulometría adecuada de las mezclas y algunas características de sus componentes, es

decir se obtuvo un aporte al análisis sistemático y parametrizado del problema, que permitió encontrar la solución más adecuada según las necesidades planteadas siguiendo un método racional.

Queda pues determinado que en un suelo estabilizado de este tipo, existen los mismos materiales y en idénticas proporciones que en cualquier buen enripiado, ya que el estudio de la estabilidad de estos últimos, han surgido las condiciones a cumplir para poder reproducirlos.

En esencia las condiciones que debe reunir una base estabilizada mecánicamente son: una granulometría determinada para el material que la constituye y características de plasticidad de las partes finas de ese material. Estas partes son las que constituyen con la humedad que las rodea, el medio ligante o cohesivo. Por esta razón suele denominarse a este tipo de estabilización “con ligante arcilla-agua”.

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

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

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

El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y ofrecen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy segregables. La

presencia de contenidos significativos de materiales finos, menores que la malla N° 40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además de que puede conducir a superficies demasiadas lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas.

2.3.2. APLICACIONES DE LA ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

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

Este tipo de técnica de estabilización tiene su aplicación de dos formas o componentes en el sistema de una vía; puede utilizarse como bases y como superficies de rodamiento.

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

La estabilización mecánica, se emplea generalmente en nuestro medio para conformar los terraplenes y los caminos revestidos o caminos “ripiados”, los cuales están constituidos por una capa firme de suelo granular que a veces sirve como capa de rodamiento en todas las

condiciones climatológicas. Pero también dependiendo de la calidad del suelo, esta técnica se emplea ampliamente para construir bases y sub-bases de la estructura de un pavimento.

2.4. COMPONENTES DE UNA ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

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

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

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

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

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

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

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

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

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

produce una rápida caída de la fricción interna, un pequeño aumento en la cohesión y mayor compresibilidad.

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

- Los granulares
- Los finos, o ligantes

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

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

Revestimiento estabilizado	Agregado grueso (R.T. 10)	{	De 25 a 2 mm, suministra al conjunto fricción y dureza, resistencia al impacto y al desgaste. Debe ser aproximadamente de un 45 % a 70% del total.
	Mortero del suelo (P.T. 10)	{	Agregado fino (Entre T. 10 y 200) { <u>Arena gruesa</u>: Fricción y dureza (similar a la grava y agregado grueso). Entre tamices 10 y 40. <u>Arena fina</u>: Sirve para acunamiento del material grueso. Entre tamices 40 y 200. <u>Limo</u>: 50 a 5 μ. Actúa como relleno para impedir el movimiento de las partículas gruesas. <u>Arcilla</u>: Menor de 5 μ (coloides menos de 1 μ). Suministra poros diminutos de modo que las películas de agua sean suficientemente delgadas para que produzcan alta cohesión.

Cuadro 2.1.: Granulometría en grupos y su función dentro de la estructura de un suelo.

Cuando las especificaciones de granulometría son correctamente satisfechas y el procedimiento constructivo es adecuado, pueden alcanzarse densidades de hasta 2,3 a 2,4 Kg/dm³.

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

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

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

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

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

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

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

1. Forma de las partículas.
2. Granulometría del material.
3. Calidad de las partículas.

4. Tamaño máximo.
5. Grado de acomodamiento.

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

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

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

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

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

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

<i>Abertura de la criba/número del tamiz</i>	<i>Abertura en mm</i>	<i>% en peso que pasa por cada tamiz o criba</i>
1"	25,40	100
3/4"	19,00	80-100
3/8"	9,50	50-90
Nº 4	4,76	40-75
Nº 10	2,00	30-55
Nº 40	0,42	20-35
Nº 200	0,074	10-20

Cuadro 2.2.: Rangos de distribución granulométrica recomendables.

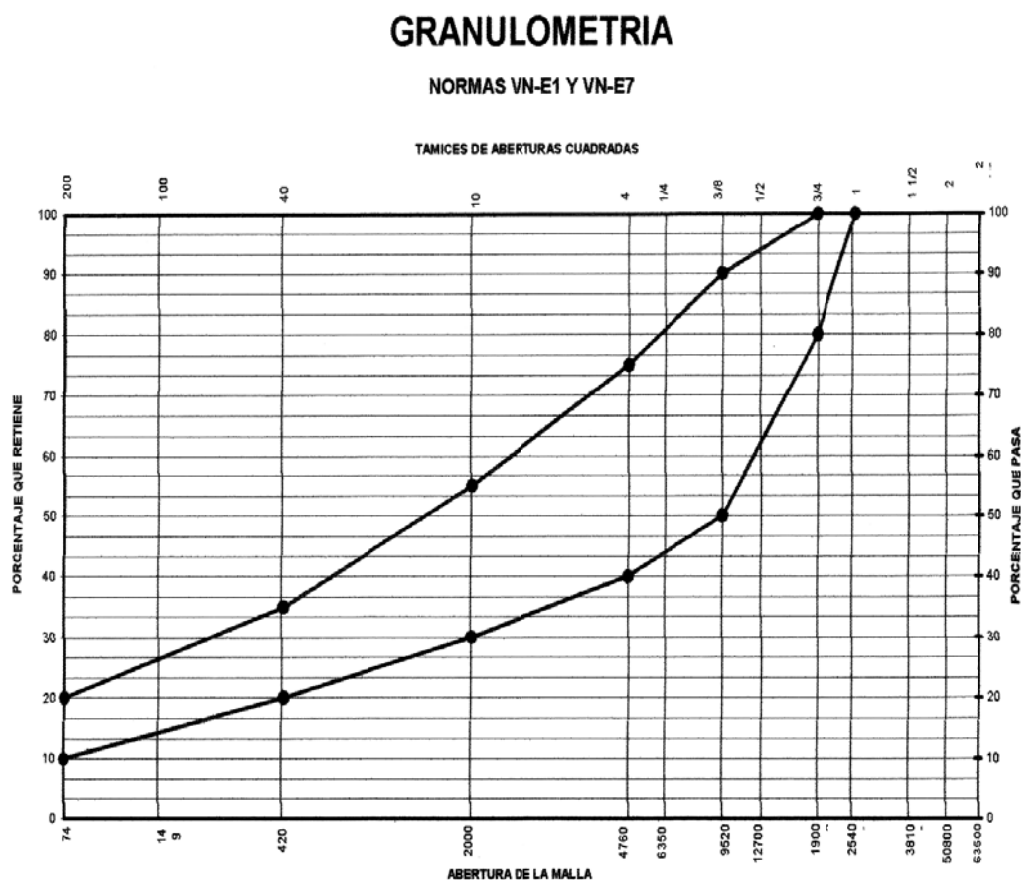


Figura 2.1.: Especificaciones para curvas granulométricas recomendables.

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

2.5. ESTABILIZACIÓN POR ALTERACIÓN TÉRMICA

Esta técnica se utiliza en suelos arcillosos. Consiste en aplicar un calor intenso en el suelo que excede los 1100 °C. Este calor se difunde dentro de la masa por conducción con el único fin de desecar el suelo hasta producir una limitada fusión y cierta verificación, la masa como de ladrillo cilíndrico que se forma de 2 a 3 m. de diámetro, queda de esta manera permanentemente estabilizada.

El costo de la estabilización térmica por medio del calor, depende de la humedad del suelo, su conductividad térmica y la disponibilidad de combustible en el lugar. En los suelos secos y en áreas donde combustible es abundante y barato, es aparentemente económico. Sin embargo, en nuestro medio no será empleada por el alto costo y la dificultad del sistema.

Otro sistema que también se emplea es congelando el suelo dado la que es equivalente a cementar un hierro por ello se introduce a 18 °C en el suelo, el cual se solidifica aglutinando las partículas del suelo y convirtiendo el material en una masa sólida. Debido al alto costo del procedimiento y desde luego falta de permanencia, este método se emplea sólo en casos de emergencias, por ejemplo, en las estructuras con peligro al derrumbarse o deslizarse.

2.6. ESTABILIZACIÓN POR MEDIOS ELÉCTRICOS

Este tipo de estabilización se aplica a ser los blandos y saturados. Se logra a través del fenómeno de electroósmosis. Y consiste en aplicar un potencial eléctrico a una serie de electrodos situados en pozos de bombeo. Este potencial origina una serie de fenómenos de

naturaleza físico-química, el cual produce un flujo de agua a través de los polos del suelo y va dirigido del electrodo positivo al negativo donde se concentra y extrae.

El drenaje producido por defecto ósmosis ayuda a modificar el suelo, ya que durante el fenómeno los cationes de aluminio se desprenden del electrodo positivo de aluminio y emigran en el suelo hacia el electrodo negativo y, en el curso de su movimiento efectúa un cambio de base o cambio e cationes en la película de agua absorbida de las partículas de arcilla, lo que tiende a disminuir la plasticidad del suelo.

2.7. ESTABILIZACIÓN POR MEDIOS QUÍMICOS

Es el tipo de estabilización de mayor interés de este trabajo de investigación; el mismo consiste en mezclar un suelo pulverizado con una cantidad apropiada de uno o más agentes estabilizadores específicos que actúan químicamente sobre las propiedades esenciales del suelo.

De todas las formas de estabilización revisada enteramente la estabilización química es de mayor importancia en el campo de la ingeniería vial de que frecuentemente se utilizan este tipo de estabilización, cuando la estabilización mecánica no es posible o resulta demasiado caro reemplazar un suelo indeseable con un suelo granular de buenas características.

En una estabilización química, el agente estabilizador y se debe proporcionar las cualidades requeridas y además satisfacer las condiciones siguientes:

1. Debe ser compatible con material del suelo
2. Debe ser permanente
3. Debe ser fácil de manejar y preparar
4. Debe tener bajo costo

Se han empleado varios tipos de agentes desestabilizadores, pero con éxito variable, ya que ninguno proporciona todos los requisitos exigidos y una mayoría de los casos son deficientes en la última condición, el costo. Por ello, debemos tener bien claro que aún las cristalizaciones químicas puede ser eficiente a una amplia variedad de condiciones, es

necesario reconocer que no existe ningún producto químico mal con que pueda estabilizar todo los tipos de suelos en todas las circunstancias, de ahí que en algunos casos es común emplear una o dos sustancias químicas que mezclándose en pequeñas cantidades ayudan y mejoran otros sistemas de estabilización.

Generalmente los materiales tratados por medios químicos son capas superficiales del suelo que se encuentran a lo largo del camino; pero también se emplean materiales de bancos cercanos cuya estabilidad disiente para formar bases o sub- bases de pavimentos.

2.8. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

Existen diferentes tipos de estabilización química que dependen del tipo delictivo que siempre en el sistema. Estas sustancias químicas pueden variar desde las más comunes hasta las más especiales; estas últimas son muy poco utilizadas en la práctica y algunas de ellas son: las casillas ventanitas, el acrilato de calcio, la resina de anilina, por y fosfatos, silicatos de sodio, cloro de sodio, cenizas volantes, etcétera. Sin embargo, vale aclarar que más del 90% de los proyectos de estabilización química utilizan frecuentemente estabilizadores comunes, tales como cemento Portland, el asfalto y la cal. Estos aditivos dan lugar con el mismo nombre a los respectivos tipos de estabilización química, los cuales a continuación se explican brevemente sus ventajas y desventajas de su aplicación.

2.9. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND

Es el tipo de estabilización química en los últimos años se han utilizado con mayor frecuencia en nuestro país este sistema consiste en la incorporación de cemento por la en cantidades que son medidas con relación al peso seco del suelo pulverizado. Tales cantidades varían aproximadamente del 3 al 6% en suelos con grava, del 7 al 10% de los arenosos y de 11 a 16 % en suelos arcillosos.

Como se puede notar, los suelos arcillosos requieren mucho más cemento que los suelos arenosos, además telones de arcilla siempre son más difíciles de pulverizar en campo, lo

que hace más complicada la mezcla y la estabilización de este tipo de suelos con cemento portland.

Un factor muy importante que hay que tomar en cuenta en este tipo de estabilización, es el costo del cemento, ya que en algunos casos encarece el sistema especialmente cuando el suelo a estabilizar es una arcilla.

La experiencia de muchos investigadores indica que los más adecuados para el tratamiento con cemento Portland, son los que tienen una apreciable componente arenosa, mientras que los suelos arcillosos son más adecuados para una estabilización con cal.

En la práctica normal de una estabilización con cemento Portland, primeramente se determina la dosis necesaria de cemento para obtener el incremento requerido en las propiedades de resistencia y durabilidad. Esta dosis de directivo se establece generalmente por ensayos de laboratorio, con mezclas de prueba que son sometidas a pruebas de comprensión inconfiada y ciclos de mojado -secado - cepillado y de congelado - deshielo los resultados de estas pruebas para el diseño de la mezcla, deben encontrarse por encima de las especificaciones establecidas por la Portland Cement Association de EEUU.

Por último los procedimientos de construcción de una estabilización con cemento Portland son básicamente los mismos que aquellos escritos de manera general en la siguiente sección

2.10. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL

La cal es uno de los agentes estabilizadores más utilizados a lo largo de la historia y sin lugar a dudas con grandes propiedades para el mezclado con suelos naturales muy plásticos de tal manera que logra regular esta plasticidad y mejora las características mecánicas del mismo. Es difícil encontrar en la naturaleza cales químicamente puras, normalmente están acompañadas de otros materiales como el carbonato de magnesio, arcilla, hierro, azufre, álcalis, etc

Los efectos de la cal en suelos arcillosos son los siguientes.

- a) Disminución del índice de plasticidad.
- b) Disminución del valor de la densidad óptima proctor y/o aumento de la humedad óptima Proctor, lo que permite el uso de cal en suelos más húmedos.
- c) Aumento del índice CBR o de la capacidad portante.
- d) Disminución de la sensibilidad al agua.
- e) Aumento progresivo de la resistencia a la compresión simple del suelo por formación de silicatos y aluminatos de calcio hidratados.

Se puede escoger cal viva o cal viva apagada. La cal viva es más eficaz ya que rebaja en mayor medida la humedad del suelo, es más densa y contiene más iones de calcio lo que produce mayor reacción con el suelo. La cal apagada tiene, sin embargo, la ventaja de la seguridad de manejo. Así pues se usará la cal viva cuando las operaciones de almacenamiento, transporte, extendido y mezclado estén muy automatizadas y no presenten peligro para los operarios y cal apagada cuando se usen máquinas más convencionales o intervalos largos entre las diversas fases de proceso, sobre todo entre extendido y mezclado. La utilización de cal viva exige un personal experimentado, suprimir el extendido cuando hay viento, utilización de guantes, mascarillas, gafas protectoras y ropa adecuada, y además una previsión de productos para curar las posibles quemaduras.

2.11. PROCEDIMIENTO GENERAL DE CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

La forma de ejecutar una estabilización química consiste principalmente en realizar los pasos básicos mencionados en los siguientes párrafos.

- a) Como primer paso de la construcción, el suelo debe ser descalificado y liderado utilizando escarificadores de discos de terreno múltiple o mezcladoras giratorias de velocidad.

- b) Luego se mezclan el suelo con el aditivo ya sea in situ o en planta central. En el primer caso, se distribuye el aditivo y el agua sobre el suelo de la forma más uniforme posible. Luego la mezcla se realiza utilizando una moto niveladora, descalificadores de discos, escaladores rotativos, dándose las pasadas necesarias hasta conseguir una buena mezcla de los materiales. En el segundo caso, la mezcla en central requiere del transporte del suelo hasta la misma planta. Se trata con frecuencia de centrales continuas en las que se dosifican los distintos componentes y al mismo tiempo se realiza la mezcla de los mismos. Por último, se realiza del transporte de la mezcla hasta el lugar de la obra y, luego se esparce generalmente con expendedoras similares a las empleadas para mezclas bituminosas en caliente.
- c) El siguiente paso es la compactación, que se inicia cuando la humedad del material sea la prescrita según el diseño efectuado. Cuando el aditivo empleado sea un condón delante era único la compactación debe terminarse en un periodo de dos a cuatro horas, según las condiciones atmosféricas. Con los suelos finos algo cohesivos deben emplearse preferentemente rodillos en patas de cabra y compactadoras de neumático, pero con los suelos granulares deben emplearse rodillos vibratorios y compactadoras de neumático.
- d) Finalmente para que el agua de compactación de la capa terminada no se pierda por evaporación, debe realizarse necesariamente el jurado, que se ejecutan generalmente aplicando una ligera capa de material bituminoso o imprimación.

2.12. PROPIEDADES DEL SUELO QUE MEJORAN EN UN SUELO ESTABILIZADO.

Comúnmente las técnicas de estabilización revisadas anteriormente, pueden mejorar varias de las propias necesidades de los suelos pero también puede aparecer el caso de que algunas de estas propiedades lleguen a deteriorarse inmediatamente o con el paso del tiempo, obteniendo resultados contradictorios a los objetivos que puede tener la estabilización de suelos. Obteniendo resultados contradictorios a los objetivos puede tener la estabilización de suelos. Para evitar esta situación es importante elegir o especificar un

sistema de estabilización que sea el correcto, además es necesario determinar la cantidad tipo de estabilizante químico adecuado para cada caso particular pero lo más importante y necesario que debe realizarse para no caer en el error de obtener resultados desfavorables con un sistema de estabilización, es realizar la investigación del comportamiento de los materiales estabilizados analizando a corto y a largo plazo las propiedades mejora y el grado de perjuicio de otras, así como también el trabajo y dinero que implicaría la aplicación del sistema de estabilización.

De las diversas propiedades que presentan los suelos las que más frecuentemente se busca mejorar con las técnicas de estabilización, son: la plasticidad, la estabilidad volumétrica, la resistencia, la permeabilidad, la compresibilidad y la durabilidad.

Por la importancia de tales propiedades para los fines que persigue el estudio éstas se explican brevemente en la siguiente sección.

2.12.1. PLASTICIDAD

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

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

2.12.2. ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA

Esta propiedad se refiere al apreciable cambio de volumen que sufren los suelos, debido a los cambios de humedad y los esfuerzos internos afectados por el agua. Cuando un suelo saturado se seca éste disminuye el volumen visiblemente, fenómeno al cual se denomina

comúnmente como retracción. Esta pérdida de volumen se debe a la desecación ocurrida en el suelo, que provoca una modificación en atención capilar del menisco formado en cada punto de la superficie.

Consecuentemente, se produce una atracción en agua del suelo y la correspondiente compresión en la estructura del mismo. Este esfuerzo de compresión en el suelo es bastante considerable, pues llega a ser tan efectivo como una carga externa aplicada al mismo.

Por otro lado, cuando un suelo en estado sérico aumenta la humedad consecuentemente aumenta también de volumen. Este fenómeno se conoce como expansión o hinchamiento; y especialmente en los suelos cohesivos se debe a diversos factores, como la atracción del agua por los minerales arcillosos, la repulsión eléctrica de las partículas de arcilla y de sus cationes absorbidos.

La estabilidad volumétrica está íntimamente relacionada con la composición minero lógica del suelo y también con los cambios climatológicos de la región, siendo muy peculiar esta propiedad en los suelos que contiene un alto porcentaje de minerales arcillosos.

La experiencia de muchos autores indica que la estabilidad volumétrica puede modificar cementando el material y disminuyendo la capacidad del mineral arcilloso para absorber de agua. En ese sentido, varios investigadores han establecido que los tratamientos químicos y técnicos son muy útiles para mejorar esta propiedad, siendo estos últimos más aplicados a arcillas profundas.

2.12.3. RESISTENCIA Y CAPACIDAD PORTANTE

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

En general, todas las formas de estabilización química revisada anteriormente, pueden mejorar en mayor o menor grado la resistencia del suelo; pero mucho depende de la

cantidad de materia orgánica contiene el mismo, ya que el efecto de la materia orgánica en el cerro estabilizado por medios químicos, reduce la reacción con el aditivo empleado y disminuye considerablemente la resistencia normalmente adquirida.

2.12.4. PERMEABILIDAD

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

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

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

2.12.5. COMPRESIBILIDAD

La compresibilidad es una propiedad que está relacionada íntimamente con el cambio volumétrico del suelo, el cual se manifiesta a través de un asentamiento. Este asentamiento es producido por peso propio del material por cargas externas superficiales que origina un cambio en la relación de vacíos, flexión y la distorsión o cambio de formas de la fase sólida del suelo inmediatamente debajo de la carga.

Asimismo, la fractura de los sólidos especialmente en los puntos de contacto es un factor irreversible en la con flexibilidad de todos los pueblos no corrosivos. Sin embargo, en las arcillas el factor más importante de la compresibilidad es la repulsión eléctrica entre sus partículas que tienen cargas iguales o, que están rodeadas de cationes con cargas semejantes que las mantienen apartadas.

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

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

2.12.6. DURABILIDAD

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

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

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

3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES A UTILIZAR.

Es necesario comprender la naturaleza de los suelos, para entender que es lo que sucede en un proceso de estabilización. Partimos de que un mineral es una sustancia inorgánica y natural, que tiene una estructura interna característica determinada por un cierto arreglo de átomos e iones.

3.2. EL SUELO

Básicamente la definición de la palabra suelo desde el punto de vista de la ingeniería, es muy amplia. Pero de manera general, puede definirse como todo material terroso que cubre la costra rocosa de la tierra, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Quedan excluidos de la definición las rocas sanas, ígneas y metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados que no se ablandan o desintegran rápidamente por la intemperie.

Uno de los aspectos más importantes respecto a los suelos y a los depósitos de tierra es su falta normal de homogeneidad, ya que debido al proceso más o menos azaroso de formación, éstos varían notablemente en su composición física y química en las diferentes localidades sobre la superficie de la tierra. Esta falta normal de homogeneidad de los suelos, hace necesario dividirlos dentro de la ingeniería y para propósito de este estudio en dos grandes grupos: suelos cohesivos y no cohesivos.

3.3. SUELOS COHESIVOS

Las arcillas o suelos cohesivos tienen características físicas y químicas muy particulares, ya que en primer lugar son materiales altamente plásticos, es decir, pueden deformarse plásticamente sin romperse a distintas humedades, cambiando fácilmente de forma cuando se les aplica una fuerza. Asimismo, estos suelos cambian de volumen contrayéndose o hinchándose; se contraen al secarse y se hinchan al absorber agua. Estos fenómenos llamados expansión y contracción respectivamente, constituyen un peligro para las

construcciones civiles y su explicación se encuentra en el entendimiento de la impresionante estructura microscópica de las partículas de arcillas que interactúan con las moléculas de agua.

Aunque no se encuentra dentro del alcance de este estudio indagar minuciosamente en las características microscópicas del material cohesivo, es necesario conocer ciertos apuntes con relación a este tema para entender la causa de sus propiedades naturales y las reacciones desencadenadas cuando se adiciona Vinaza a un suelo arcilloso.

En ese sentido, podemos indicar de manera general, que las partículas de arcilla microscópicamente son una combinación de pequeñísimas láminas atómicas de sílice y alúmina. Estas láminas, tienen una superficie muy grande con relación a su volumen y se combinan superponiéndose entre sí hasta crear estructuras definidas llamadas placas. Estas placas se multiplican en variadas formas y en cierto número como las hojas de un libro para formar finalmente un mineral de arcilla.

Los minerales de arcilla se clasifican en tres grandes grupos: las caolinitas, las montmorilonitas y las ilitas, cada una con características propias de acuerdo a su estructura molecular.

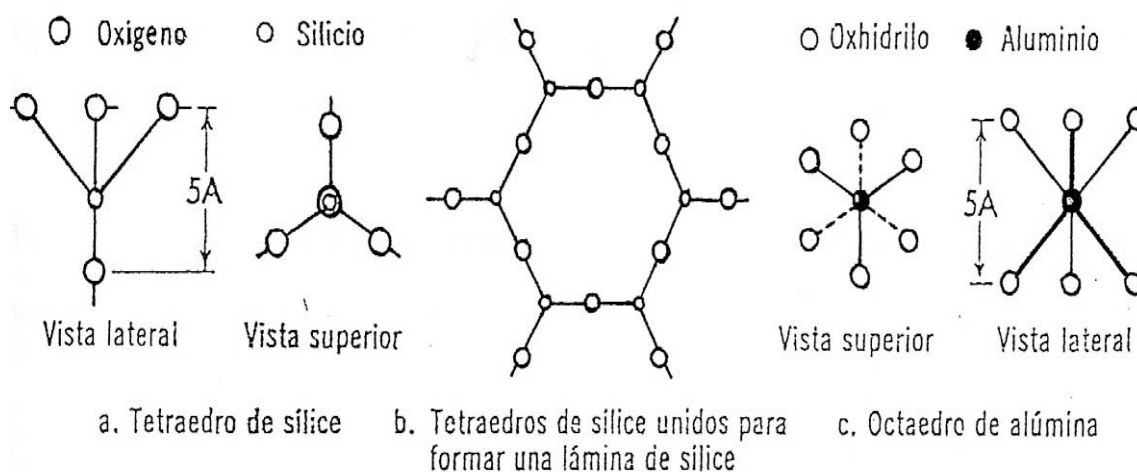


Figura 3.1. Distribución atómica en las láminas de los minerales de las arcillas

Debido a la constitución molecular de las partículas de arcillas, estas se encuentran eléctricamente activas, ya que poseen cargas negativas en sus caras y positivas en sus aristas las cuales no se encuentran equilibradas. Debido a ello, las láminas de arcilla son capaces de atraer cationes metálicos en su superficie que se mantienen sujetos por fuerzas electrostáticas.

Tales iones atraídos provienen de productos solubles de la meteorización y otros son aportados por aguas de infiltración en forma natural; pero también pueden ser adicionados intencional mente como sucede en una estabilización con Vinaza.

Los cationes no se encuentran completamente integrados en los minerales arcillosos, por lo tanto pueden ser reemplazados por otros cationes siempre que el equilibrio total de valencias sea mantenido. Debido a esta situación estos cationes se denominan también iones de cambio o cationes cambiables.

En un estado teórico seco, estos cationes se distribuyen en una sola capa sobre la superficie de la partícula de arcilla, pero en estado húmedo, las partículas de arcillas además de atraer los iones metálicos, pueden atraer moléculas de agua a causa de su naturaleza polar. Esta atracción de agua provoca que los cationes metálicos se hidraten, adquiriendo un volumen de agua en torno al mismo y aumentando varias veces su diámetro. La hidratación de los cationes obliga a los mismos a formar en torno a la arcilla una capa denominada "doble capa de difusión", en la cual encuentra la posición de equilibrio.

En la doble capa, el agua y los cationes se depositan muy cerca de la superficie de la arcilla, así como las limaduras de hierro son atraídas por un imán.

Todo el sistema de la partícula de arcilla experimenta fuerzas de repulsión y atracción alrededor de ellas. Estas y otras fuerzas de menor importancia se encuentran en equilibrio, pero cualquiera que sea el motivo de una alteración de la doble capa de difusión puede provocar una resultante de atracción o repulsión entre las partículas arcillosas. Así, un aumento en la humedad del suelo cohesivo incrementa la separación de las partículas de arcilla y por lo tanto también el volumen (expansión), pero además, se debilita la estructura interna del material debido a que existe menor atracción entre ellas y mayor movilidad de las mismas. Por otro lado, una reducción en la humedad del suelo reduce el espesor de la

doble capa de difusión y permite un acercamiento entre las partículas, aumentando de esta manera la atracción entre ellas y reduciendo el movimiento potencial de las mismas para convertir finalmente el material en una masa más rígida.

3.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS ARCILLAS

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

Los minerales arcillosos, son filosilicatos hidratados que se presentan en cristales muy pequeños. Debido a su estructura cristalina, las arcillas son intercambiadores de iones muy eficaces. Las arcillas poseen una carga neta superficial negativa que les permite absorber cationes y materia orgánica.

Los minerales de arcilla poseen dos componentes estructurales básicos: uno es el tetraedro de Silicio - Oxígeno y el otro es el octaedro, en el cual un átomo de aluminio, magnesio y/o hierro es rodeado por seis aniones (2 ó 4 oxígenos y 4 ó 2 hidróxidos).

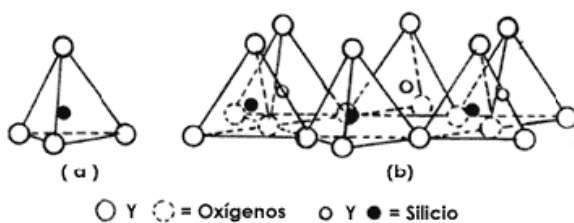


Figura 3.2 Tetraedro de Silicio - Oxígeno

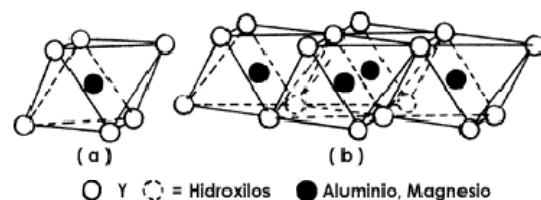


Figura 3.3. Octaedro de Aluminio/magnesio -

Los filosilicatos que componen las arcillas pertenecen fundamentalmente a cuatro grupos: el del Caolín, el de la Montmorillonita, el de la Mica arcillosa (fundamentalmente illita), y el de la Clorita.

Los minerales arcillosos pueden proceder de la alteración de la roca magmática o metamórfica, y después del transporte, dar arcillas detríticas (es el caso más frecuente). Pueden formarse en una cuenca de sedimentación en cuyo caso son minerales arcillosos neoformados. En otros casos pueden proceder de una reorganización mineralógica durante la diagénesis (minerales arcillosos diagenéticos). Las arcillas detríticas son corrientemente denominadas arcillas primarias o heredadas, y las otras arcillas secundarias.

Desde el punto de vista mineralógico, la Arcilla engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a $2\mu\text{m}$).

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula. 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 las $2\mu\text{m}$.

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.

3.5 TIPOS DE ARCILLAS

De acuerdo a su estructura, los minerales de arcilla se clasifican en tres grandes grupos:

- •Caolinitas
- •Montmorilonitas
- •Ilitas

3.5.1. CAOLINITAS

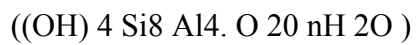


La unión de sus retículas son suficientemente firmes para no permitir la penetración de moléculas de agua. Es decir son relativamente estables ante el agua



*Figura 3.4
caolinita*

3.5.2. LA MONTMORILONITA :



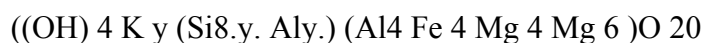
La unión de sus retículas son débiles, por lo que son susceptibles a ser afectados por el agua, a causa de las fuerzas eléctricas dipolares.

Es decir son muy expansivas.



*Figura 3.5
montmorillonita*

3.5.3. LAS ILITAS :



Su estructura es similar a la montmorilonitas, pero su constitución interna muestra tendencia a formar grumos de materia, reduciendo el área expuesta al agua. Por lo que su potencial de expansión es menor.



*Figura 3.6
ilitas*

3.6 EFECTO DE LAS ARCILLAS EN OBRAS CIVILES

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

Por ejemplo en casos en donde el material sobre el que se desarrolla el proyecto es arcilloso hace que se presenten condiciones desfavorables incrementando el valor de la obra y haciendo más complejo el diseño.

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

Algunas soluciones a problemas ocasionados por los suelos expansivos. Debido a que se presenta una variación en el comportamiento de los suelos en cuanto a su volumen, las estructuras se pueden ver afectadas debido principalmente a las fuerzas de levantamiento

provocadas sobre la cimentación, haciendo que se presente desde una variación en el nivel de fundación, hasta la falla misma.

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

- Reemplazar una porción de suelo expansivo, por otro tipo de suelo, preferiblemente de tipo granular, con el fin de que el peso generado por el relleno no permita que se expanda el suelo restante.
- Adecuación de estructuras con el fin de que no permita el paso del agua hacia el suelo de fundación.
- Aplicación de aditivos que no permita que se genere algún tipo de expansión, cuyo procedimiento consta en tomar una porción de suelo, el cual es remoldeado con alguna clase de aditivo y luego es adecuado sobre el terreno, de manera que este sea compactado.

Teniendo en cuenta las anteriores recomendaciones se sugiere:

- Controlar la humedad del sitio de trabajo, procedimiento que se realiza mediante la excavación hasta un determinado punto, luego se extiende una capa plástica y se vuelve a rellenar el sitio, pero a la parte superior de la capa se le deben adecuar unos drenajes o impermeabilizantes.

El primer paso es identificar el suelo para evidenciar el potencial de cambio volumétrico, para ello se recurre a los límites de Atterberg, fundamentalmente a:

- Índice de Plasticidad
- Expansión probable al pasar de estado seco a saturado

Están compuestos por partículas minerales que tienen una gran afinidad por el agua, la absorben del medio ambiente y la incorporan a su estructura molecular. Las arcillas montmorilloníticas poseen esta propiedad.

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

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

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

EFFECTOS

- Levantamiento diferencial
- Agrietamiento

La expansión depende de:

- Cambios de humedad
- Presiones aplicadas

3.7 VINAZA DE CAÑA DE AZÚCAR

La vinaza es un líquido de color café y olor dulce, se obtiene de la melaza de la caña de azúcar y constituye el desecho industrial de mayor importancia en las destilerías de alcohol.

Este residuo, altamente corrosivo y contaminante de las fuentes de agua, presenta en su composición química altos contenidos de materia orgánica, potasio y calcio ‘y cantidades moderadas de nitrógeno y fósforo.

Como las vinaza son un sustrato complejo (azúcar, polifenoles, levaduras muertas, fosfatos, sulfatos, etc.) su tratamiento biológico no es sencillo.

Su valoración valor nutricional como fertilizante o suplemento en alimentos balanceados está ya bastante estudiado, y su tratamiento primario (centrifugado, concentrado, otros).

El proceso se inicia en el mismo momento del corte de la caña de azúcar. La caña en su corteza posee un componente llamado LIGNINA, que al moler la caña se incorpora en el jugo, produciendo la melaza, materia prima fundamental para la elaboración del alcohol. Al agregarle ácido sulfúrico acabamos de transformar toda esta lignina en LIGNOSULFONATOS.

3.8. PRODUCCIÓN DE LA VINAZA

En términos del volumen producido, se estima que por cada litro de alcohol obtenido a partir de mosto de melaza, se generan alrededor de quince litros de vinaza. Este residuo, presenta en su composición química altos contenidos de materia orgánica, potasio y calcio y cantidades moderadas de nitrógeno y fósforo.

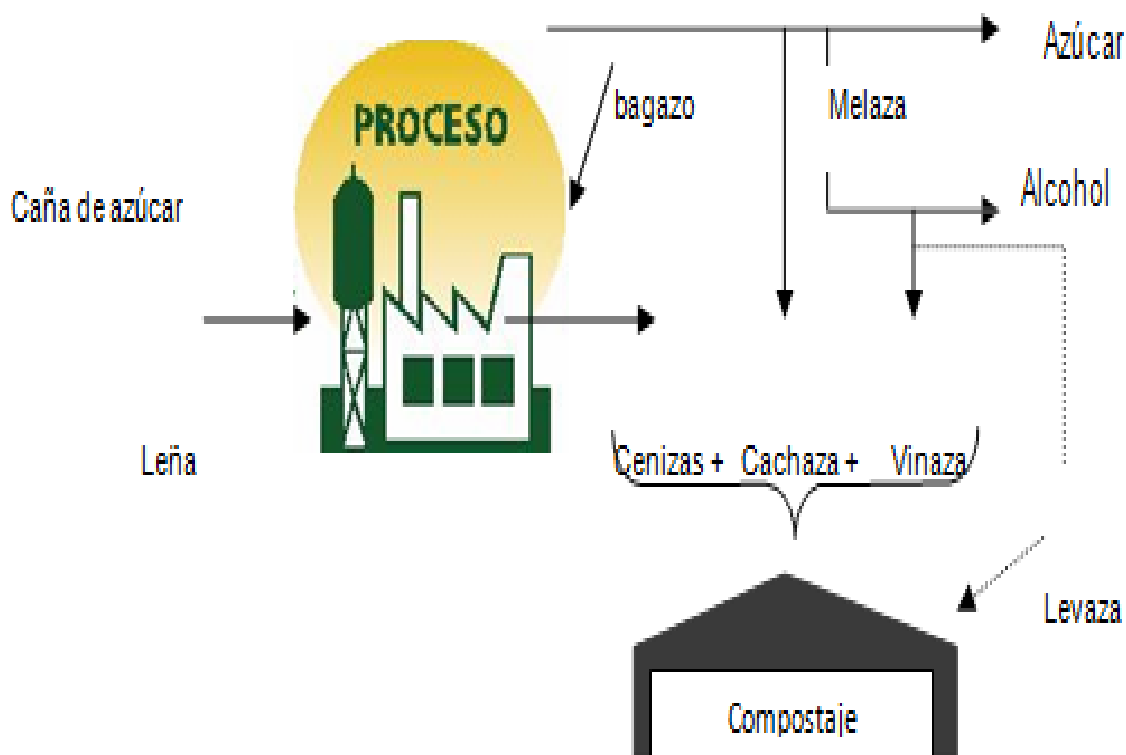


Figura 3.7: Proceso de producción de la vinaza de caña de azúcar

3.9. NOMBRES CON LOS QUE SE CONOCE A LA VINAZA

NOMBRES DE LA VINAZA	
➤	Vinhaca
➤	Vinhoto
➤	Bottom stills
➤	Dunder
➤	Vinasse
➤	Bottom slops
➤	Waste distillery

Cuadro 3.1. Nombres de la vinaza

3.10. CARACTERIZACION DE LA VINAZA

CARACTERIZACION DE LA VINAZA	
➤ pH	➤ Potasio
➤ Desecho no filtrable total	➤ Magnesio
➤ Dureza	➤ Sulfato
➤ Conductividad eléctrica	➤ Fosfato total
➤ Nitrógeno total (Kjeldhal)	➤ DBO
➤ Sodio	➤ DQO
➤ Calcio	

Cuadro 3.2. Características de la Vinaza

3.11. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA VINAZA

Composición Química de la Vinaza al 55% de sólidos totales

ANALISIS	UNIDAD	
Materia Orgánica	%	47,77
N	kg/m3	4,3
K2O	kg/m4	41
P2O5	kg/m5	0,5
CaO	kg/m6	7
MgO	kg/m7	9
SO4-2	kg/m8	35
Ph		4,3 - 4,5
Densidad	kg/m10	1,35

Cuadro 3.3. Composición química de la vinaza

3.12. USO DE LA VINAZA DE CAÑA AZÚCAR EN LA ACTUALIDAD

Usos	Aporte	Efecto	Observaciones
Fertilización	Materia orgánica Potasio Calcio Sulfatos Micronutrientes	* Fomenta la reproducción de microorganismos en el suelo * Aporte de nutrientes disponibles	Se puede aplicar con equipos especiales o directamente con el agua de riego
Sustrato para compost		Sirve como fuente de energía y nutrientes a los microorganismos que compostan el material vegetal residual de las cosechas	El exceso de vinaza concentrada en la mezcla da lugar a la detención del proceso de compostaje debido al DBO elevado, que interfiere negativamente en la degradación del material vegetal
Producción de biogás y biosólidos		* Al descomponerse la materia orgánica en un reactor anaerobio, se genera biogás con contenidos utilizables de metano, gas carbónico y ácido sulfhídrico * Se producen biosólidos ricos en carbono, nitrógeno y azufre asimilable por las plantas	Se deben controlar las concentraciones de ácido sulfhídrico ya que producen malos olores y deteriora las tuberías de recuperación del gas
Medio de cultivo		Suplementada con urea y sacarosa es un excelente sustrato para promover el crecimiento de levaduras, algas del género <i>Chlorella</i> , bacterias como <i>Pseudomonas</i> y <i>Methanomonas</i> y hongos filamentosos	La proteína unicelular es aquella proveniente de bacterias, algas y hongos y se constituye en una importante fuente de proteínas para la alimentación animal y humana
Suplemento alimenticio	Proteína Energía neta?? Sales minerales	* Mezcla con otros elementos para elaborar concentrados para animales (GICABU) * Sustituye parte de la melaza usada en la suplementación de ganado bovino, porcino y conejos	En bovinos dosis de potasio superiores a 1.5 kg/animal causan efectos laxantes??
Incineración	Poder calorífico	Se constituye en un buen combustible para incinerar y generar energía térmica para distintas aplicaciones	Actualmente existen dos calderas en Tailandia operando con este combustible
Otros		Agentes plastificante de concretos reforzados. Fabricación de ladrillos. Materia prima para obtener sulfatos de cloruro y potasio, potasa y carbonato de sodio, ácido glutámico y glutamina vía fermentativa.	

Tecnologías modernas para alimentación animal: Uso de efluentes agroindustriales de plantas de procesamiento de caña de azúcar
CIAT-CLAYUCA-PALMIRA, Marzo 21 de 2007

3.13. EFECTOS DE LA VINAZA EN EL SUELO

Vinaza y agregación del suelo
Tiene efecto agregador de lo suelo – muchas causas, incluso producción mucilagens por microorganismos.
La adicción de materia orgánica por la vinaza es responsable por mayor estabilidad de los agregados del suelo y no solo por el Ca adicional por la vinaza.
Camargo et al. (1988)

Cuadro 3.5. Efectos de la Vinaza en el suelo

3.14 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DE LA VINAZA.

Las vinazas de destilería de alcohol se encuentran entre los residuales orgánicos de mayor efecto contaminante sobre la flora y la fauna del planeta. La problemática principal radica en que por cada hectolitro de alcohol producido a partir de miel final, se obtienen de manera adicional 15 hectolitros de vinaza como residual, con una Demanda Química de Oxígeno (DQO5) entre 60 y 70 g/l y un Ph alrededor de 4. En muchos lugares esta vinaza es vertida en ríos, lagos, presas y canales sin ningún tratamiento, contaminan en gran medida las fuentes de aguas superficiales y subterráneas con un fuerte impacto sobre el medio ambiente. Por citar un ejemplo, en Cuba si las 12 destilerías que posee el Ministerio del Azúcar trabajaran a plena capacidad, la vinaza generada, si no es tratada provocaría una contaminación equivalente a 6 millones de habitantes (Valdés y Obaya 1997).

Las actuales perspectivas a nivel mundial de incrementar la producción de alcohol a partir de jugos y melazas para su empleo como combustible automotor (Gálvez 2005), incrementa grandemente el peligro de una mayor contaminación, si no se aplican tecnologías que disminuyan la carga contaminante.

Por todo lo anterior nos proponemos en esta oportunidad abordar el caso de las vinazas de las destilerías de alcohol por su importancia, agresividad e incremento sostenido en los próximos años.

En una destilería de mediano tamaño que producen diariamente 50.000 litros de alcohol base 960, se generan diariamente 750 m3 de vinaza (ICIDCA 1988), 225.000 m3 en 300 días de un año, cifra suficiente para preocupar a más de un entendido en la materia y más

aún si sabemos que en la mayoría de los países y lugares donde existen destilerías estas son vertidas libremente sin ningún tratamiento. Las melazas provenientes de caña de azúcar son las que mayores concentraciones de residuos orgánicos y químicos aportan.

3.15. ÍNDICE PH

La definición del índice pH, en resumen indica que las sustancias acidas en contacto con el agua, liberan iones de hidrogeno H^+ de carácter eléctrico fuertemente positivo.

Opuesta a los ácidos son las bases que en las mismas circunstancias desprenden elementos llamados oxidrilos, unión inestable de un átomo de oxigeno con uno de hidrogeno (OH). Los oxidrilos son por el contrario del hidrogeno(H^+), radicales negativos la cantidad de átomos de hidrogeno presentes en una solución, nos indicara pues la acides de la sustancia.

En la práctica, la concentración de estos iones positivos o cationes (H^+), llamado potencial de hidrogeno, no se mide por su valor real sino por el índice Sorensen que se designa por el símbolo de pH. Pero prescindiendo de más explicaciones teóricas, diremos que cuanto menos es el pH de una sustancia, mayor es la acides de esta. El valor del $pH = 7$ corresponden a sustancias neutras; los valores entre 0 y 7 a las sustancias acidas y de 7 a 14 a las sustancias básicas.



Cuadro 3.6. Escala de pH

Cortesía de Environmet Canadá (<http://www.ns.ec.gc.ca>)

4.1 TOMA DE MUESTRAS

La obtención de muestras es una de las operaciones más importantes, pues requiere no solo conocimientos de suelo y materiales, sino experiencia para seleccionar el o los sitios donde deberán tomarse y poder determinar, además, la profundidad a la cual habrán de sacarse.



Fig. 4.1 (Barrio las palmeras)



Fig. 4.2 (Barrio el Lapacho)

Las muestras que se obtengan, deben ser representativas, es decir, deben ser una fiel representación del material existente en el sitio.

Si la obtención de muestras o “testigos”, no ha sido cuidadosamente realizada, se corre el riesgo de dar una idea falsa del terreno de fundación o del material a emplearse. Así, un material disgregado que se clasifica en laboratorio por ejemplo como suelo limo – arcilloso - arenoso puede que “ in situ “, sea roca meteorizada, un esquisto por ejemplo, que al extraerse ha sido desmenuzado.

Si las muestras que se obtengan, no son una fiel representación del material existente en el sitio, los mejores análisis y ensayos de laboratorio darán una información que puede ser confusa y hasta perjudicial.

Debemos tener siempre presente, que la investigación del lugar, así como la obtención de muestras, es de capital importancia y estos trabajos, repetimos, deben estar no solo bajo la dirección sino también bajo la constante supervisión de ingenieros especialistas de suelos.

4.2. ENSAYOS INICIALES

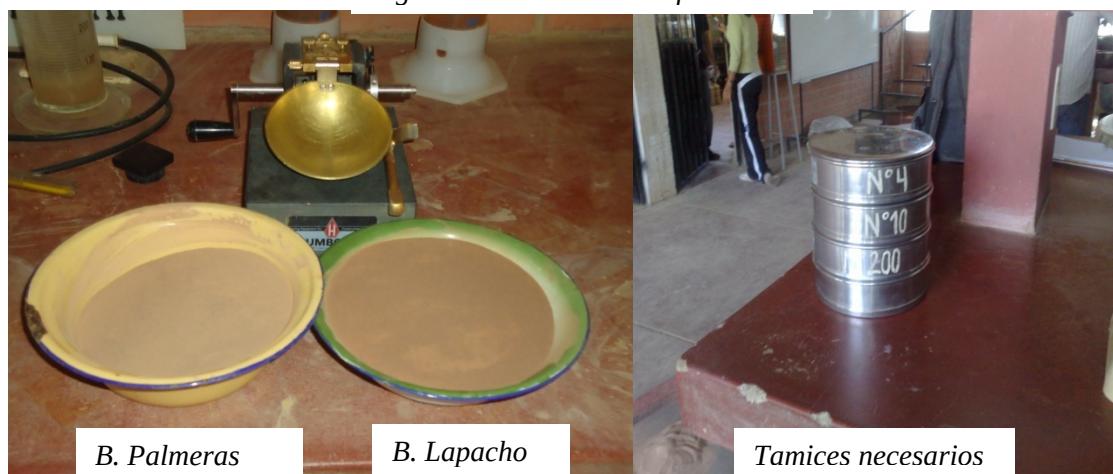
4.3. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Entre las diferentes clasificaciones de suelos existentes, indicamos la adoptada por la AASHTO, la conocida como la “Clasificación Unificada de Suelos”

Equipo Casagrande

Tamices

Fig. 4.3 Material de Clasificación



4.3.1. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO

Hace varios años, los organismos viales de los EE.UU. de N. A., sugirieron diferentes clasificaciones para los suelos. Así se conocía la clasificación propuesta por la Public Roads Administration (actualmente Bureau of Public Roads), por el Highway Research Board, etc.

Hoy en día, todas estas clasificaciones han sido agrupadas en una sola, que basa en la que originalmente propuesto el Bureau of Public Roads en 1929 y es prácticamente la misma que la recomendada en 1944 por Highway Research Board.

La AASHTO que representa a todos los Departamentos de carreteras de los Estados Unidos de Norte América, ha adoptado esta clasificación. Designaremos esta

clasificación como “Clasificación de Suelos AASHTO”.

Los suelos se clasifican en siete grupos, basándose en la composición granulométrica, en el límite líquido y en Índice de plasticidad de un suelo. La evaluación de cada grupo, se hace por medio de su “Índice de Grupo”, el cual es calculado mediante la fórmula empírica.

Esta clasificación divide los suelos en dos clases: una formada por suelos granulares y otra por suelos de granulometría fina, limo-arcillosos.

A continuación, indicamos cada una de estas clases con sus correspondientes grupos y subgrupos.

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

- *Tamaño del grano*; Grava: fracción que pasa la malla de 75 mm y es retenida en la malla N° 10 (2mm). Arena: fracción que pasa la malla N° 10 (2 mm) y es retenida en la malla N° 200 (0.075 mm).Limo y Arcilla: fracción que pasa la malla N° 200.
- *Plasticidad*; El término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menor. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen un índice de plasticidad de 11 o mayor.
- *Si Cantos rodados o voleos* (tamaños mayores que 75 mm) están presentes estos se excluyen de la porción de la muestra de suelo que se esta clasificando, sin embargo el porcentaje de tal material se registra.

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

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

Donde:

a = % Pasa N° 200 – 35%

b = % Pasa N° 200 – 15 %

c = Límite Líquido – 40 %

d = Índice de Plasticidad – 10 %

Clasificación de los suelos según AASHTO

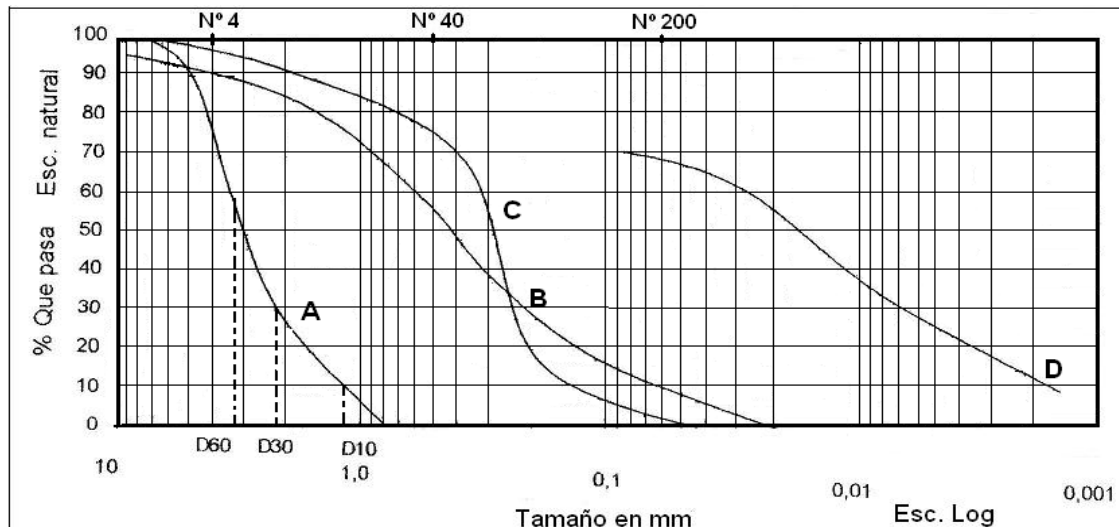
Clasificación general	Suelos granulosos 35% máximo que pasa por tamiz de 0,08 mm							Suelos finos más de 35% pasa por el tamiz de 0,08mm				
Grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
símbolo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Análisis granulométrico % que pasa por el tamiz de:												
2 mm	máx. 50	máx. 50	mín. 50									
0,5 mm	máx. 30	máx. 25	máx. 10	máx. 35	máx. 35	máx. 35	máx. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35
0,08 mm	máx. 15											
Límites Atterberg												
Límite de liquidez				máx. 40	mín. 40	máx. 40	mín. 40	máx. 40	máx. 40	máx. 40	mín. 40	mín. 40
Índice de plasticidad	máx. 6	máx. 6		máx. 10	máx. 10	mín. 10	mín. 10	máx. 10	máx. 10	mín. 10	mín. 10 IP<LL-30	mín. 10 IP<LL-30
Índice de grupo	0	0	0	0	0	máx. 4	máx. 4	máx. 8	máx. 12	máx. 16	máx. 20	máx. 20
Tipo de material	Piedras, gravas y arena		Arena fina		Gravas y arenas limosas o arcillosas			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Estimación general del suelo como subrasante	De excedente a bueno							De pasable a malo				

Tabla 4.1 Clasificación AASHTO

4.3.2. REPRESENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

Siempre que se cuente con suficiente número de puntos, la representación grafica de la distribución granulométrica debe estimarse preferible a la muestra en tablas,

Fig. 4.4 Curvas granulométricas de algunos suelos



4.3.3 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.

La forma original de este sistema fue propuesto por Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida por el cuerpo de Ingenieros del Ejercito durante la segunda Guerra Mundial, hoy en día, es ampliamente usado por los ingenieros; el sistema unificado de clasificación se presenta en las tablas.

- Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50 % pasando por la malla N° 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo *G* o *S*. *G* significa Grava o suelo gravoso y *S* significa arena o suelo arenoso.
- Los suelos de grano fino con 50 % o mas pasando por la malla N° 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo *M*, que significa limo inorgánico, *C* para arcilla inorgánica u *O* para limos y arcillas orgánicas símbolo *Pt* se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos también son usados para la clasificación:

- *W*: Bien Graduado
- *P*: Mal Graduado
- *L*: Baja Plasticidad (Límite Líquido menor que 50)
- *H*: Alta Plasticidad (Límite Líquido mayor que 50)

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

- Porcentaje de grava, es decir, la fracción que pasa la malla de 76.2 mm y es retenida en la malla N° 4 (abertura de 4.75 mm).
- Porcentaje de arena, es decir, la fracción que pasa la malla N° 4 (abertura de 4.75 mm) y es retenida en la malla N° 200 (abertura de 0.075 mm).
- Porcentaje de limo y arcilla, es decir, la fracción de finos que pasa la malla N° 200 (abertura de 0.075 mm).
- Coeficiente de uniformidad *C_u* y Coeficiente de curvatura *C_c*.
- Límite Líquido e índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla N° 40.

Tabla 4.2 Clasificación de los suelos según la ASTM.

Descripción			Símbolo de grupo	Criterios de laboratorio			
				Finos (%)	Gradación	Plasticidad	Notas
Grano grueso (mas de 50% de tamaño mayor que la medida del tamiz Nº 200	Gravas mas de 50% de la fracción gruesa es retenida por el tamiz Nº4	Gravas bien escalonadas, gravas arenosas, con escasos finos o sin ellos	GW	0-5	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}} < 3$		símbolos duales si los finos van de 5 a 12%
		Gravas pobremente escalonadas, arenosas, con escasos finos o sin ellos	GP	0-5			
		Gravas sedimentarias, gravas arenosas arcillosas	GM	>12		Por debajo de la línea A IP<4	
		Gravas arcillosas, gravas arenosas arcillosas	GC	>12		Por encima de la línea A con IP>7	
	Arena mas de 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz Nº4	Arenas bien escalonadas, arenas con grava, con poco finos o si ellos	SW	0-5	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}} < 3$		símbolos duales si están sobre la línea A 4<IP<7
		Arenas pobremente escalonadas arenas con gravas, con pocos finos o sin ellos	SP	0-5			
		Arenas sedimentarias	SM	>12		Por debajo de la línea A IP<4	
		Arenas arcillosas	SC	>12		Por encima de la línea A con IP>7	
Grano fino mas de 50% de tamaño menor que la medida del tamiz Nº 200	Sedimentos y arcillas Limite Liquido Inferior a 50	Sedimentos Inorgánicos, arenas finas sedimentarias o arcillosas, con leve plasticidad	ML	Usar diagrama de plasticidad			
		Arcillas Inorgánicas, sedimentarias, arenosas de baja plasticidad	CL	Usar diagrama de plasticidad			
		Sedimentos orgánicos y arcillas sedimentarias orgánicas de baja plasticidad	OL	Usar diagrama de plasticidad			
	Sedimentos y arcillas Limite Liquido superior a 50	Sedimentos orgánicos de alta plasticidad	NH	Usar diagrama de plasticidad			
		Arcillas Inorgánicas de alta plasticidad	CH	Usar diagrama de plasticidad			
		Arcillas orgánicas de alta plasticidad	OH	Usar diagrama de plasticidad			
	Sucios altamente orgánicos	Turba y suelos altamente orgánicos	Pt				

4.4. LÍMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG.

Consistencia es el grado de firmeza y en los suelos coherentes varía desde un estado sólido (secos) hasta un estado líquido cuando el contenido de agua aumenta considerablemente.

Cuando existen minerales de arcilla en un suelo de grano fino, éste puede ser remodelado en presencia de alguna humedad sin desmoronarse; esta naturaleza cohesiva es debido al agua adsorbida que rodea las partículas de arcilla.

El físico sueco A. Atterberg estableció en 1946 desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variables.

Dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos, denominados sólido, Semisólido, plástico y líquido como se muestra en la figura.

Estos límites no son estrictamente absolutos, sino fronteras aproximadas para la clasificación de suelos cohesivos y resultan muy útiles en la mecánica de suelos para identificar las arcillas según su consistencia y comportamiento.

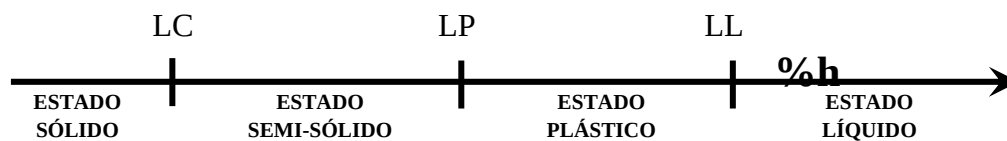


Fig 4.5 estado de plasticidad

Limite líquido (LL). Es el contenido de humedad en porcentaje donde el suelo pasa del estado líquido al estado plástico. Este ensayo consiste en colocar diferentes muestras de suelo con humedad variable, en el aparato de Casa Grande, que en 1932 concluyó que cada golpe en un dispositivo estándar para limite líquido corresponde a una resistencia cortante del suelo de aproximadamente de 1 gr/cm^2 . Por lo que el límite líquido de un suelo de grano fino da el contenido de agua para el cual la resistencia cortante del suelo es aproximadamente de 25 gr/cm^2 .

Límite plástico (LP). Se define como el contenido de humedad en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollitos de 3.2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. En el estado plástico el suelo es fácilmente moldeable, mientras que en el semisólido se deforma, agrietándose.

Los suelos que no permitan realizar esta prueba, no tienen límite plástico y se designan suelos no plásticos. Ésto ocurre con algunos limos y arenas.

Límite de contracción. Cuando la masa de suelo pierde gradualmente agua, ésta se contrae, con esta pérdida continua de agua se alcanza a una etapa de equilibrio, en la que más pérdida de agua no cambia el volumen; este punto donde el cambio de volumen del suelo cesa, se define como límite de contracción.

Índice de plasticidad (IP). El índice de plasticidad, se define como la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico y se expresa como sigue:

$$Ip = LL - LP \quad (\%)$$

Un índice de plasticidad bajo (Ej: 4%) con un pequeño incremento del contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la condición de líquido, por tanto es muy sensible a los cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto (Ej: 30%) indica que para que el suelo pase de un estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua.

En suelos no plásticos no es posible determinar el índice de plasticidad. El índice de plasticidad define el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico. Este valor permite determinar los parámetros de asentamiento de un suelo y su expansividad potencial.

Índice de liquidez. Es la consistencia relativa de un suelo cohesivo en estado natural.

$$IL = \frac{w - LP}{LL - LP}$$

El contenido de agua (w) in situ de una arcilla sensitiva es mayor que el límite líquido en tal caso. ($IL > 1$). En los suelos remoldeados se transforman en una forma viscosa que fluye como un líquido.

Suelos que están fuertemente consolidados, y tienen un contenido de agua natural menor que el límite plástico entonces el ($IL < 1$), e incluso para algunos de este tipo de suelo sus valores son negativos.

4.5. SELECCIÓN DE SUELOS DE ESTUDIO

Desde el instante mismo en que las propiedades físicas de los suelos se tornaron en un motivo de interés, se ha querido, con frecuencia correlacionar los resultados de simples ensayos de clasificación con las constantes del suelo necesarias para resolver los problemas de la práctica.

La selección de los suelos de estudio se realizara en laboratorio mediante los ensayos a realizar por medio de tablas y procesamiento en software.

4.6. ENSAYOS FÍSICO RESISTENTES

Resistencia de las arcillas a compresión simple

La cohesión permite a las arcillas resistir esfuerzos de corte, siendo posible fabricar probetas cilíndricas y medir su resistencia a compresión simple.

Es un ensayo fácil y bastante empleado. Pueden emplearse aparatos especialmente concebidos, para este uso, pueden utilizarse también otras como, por ejemplo, un aparato triaxial, una prensa CBR u otro que permita controlar las deformaciones para un esfuerzo aplicado (o viceversa) porque puede suceder que la rotura de la muestra no sea franca y solo el estudio de las curvas esfuerzo-deformación permite, entonces, determinar la resistencia. Indicamos también que se realiza el ensayo con una velocidad de deformación controlada de 0,5 a 2% de la altura por minuto durante el ensayo de 5 a 20 minutos.

Influencia del tiempo en la resistencia al corte de las arcillas

Se ha visto que el tiempo hace cambiar la resistencia de una arcilla desde su valor sin drenaje hasta su valor con drenaje.

Pero, además, existen unos efectos de fluencia que deben considerarse. Comenzando con la resistencia con drenaje, diremos que la resistencia de pico de las arcillas inalteradas parece depender poco del tiempo, con tal de que la duración del ensayo sea superior a un día en ensayos de compresión. En cambio, en ensayos de extensión la resistencia de las arcillas sobre consolidadas disminuye al aumentar el tiempo (Escario y Justo, 1970).

Respecto a la resistencia residual según Skempton y Hutchinson (1969) se ha observado una disminución comprendida entre un 0,5 y un 2% por cada ciclo logarítmico del tiempo. De Beer (1969) también ha observado disminuciones.

En ensayos sin drenaje se observa una disminución de la resistencia al aumentar el tiempo de rotura. En arcillas normalmente consolidadas esta disminución hay que achacarla principalmente al aumento de las presiones intersticiales producido al fluir la muestra.

En arcillas sobre consolidadas, la disminución de resistencia se debe a la migración de las presiones intersticiales desde los extremos de la muestra hacia la zona de rotura, situada en el centro donde son menores.

4.6.1. PROCTOR

En general, todo terraplén debe compactarse para que forme una masa resistente y poco compresible.

En la compactación de un suelo juega un papel muy importante la cantidad de agua que contiene.

Si compactamos muestras del mismo suelo en condiciones absolutamente idénticas, pero variando la humedad, obtenemos una curva en la que se encuentran representadas en abscisas las humedades y en ordenadas las densidades secas obtenidas. Como se

puede ver la curva presentaría un máximo que representaría la densidad máxima, que puede obtenerse con el procedimiento de compactación que se haya empleado y que corresponde a una humedad optima que es la que hay que dar al suelo para llegar a dicho resultado.

Al hablar de muestras compactadas, citar la diferencia entre su humedad de compactación y la optima (para una energía de compactación dada).

Así, al decir una muestra compactada al más 2% se quiere decir que su humedad de compactación es la óptima más 2%.

Si por el contrario, decimos que una muestra esta compactada al menos 2% queremos decir que su humedad de compactación es la óptima menos 2%.

Empleando compactaciones cada vez más enérgicas se obtiene una familia de curvas como las representadas de trazo continuo. Cuanto mayor es la compactación, mayores son las densidades alcanzadas y mas pequeña es la humedad optima.

Estos ensayos son realizables tanto en laboratorios especializados como en los laboratorios de obra. Tienen por objeto trazar las de compactación ASSHO (American Association of State Highwayss Officials).

La muestra estudiada se coloca en la estufa a una temperatura de 105 °C durante 24 horas (hasta que su peso sea constante). Se añade una cantidad de agua determinada, compactándose la muestra en un molde con la energía que proporciona una masa de peso conocido, a caer de una altura constante.

Después de la compactación se pesa el molde y se determina la humedad del material, lo que permite calcular el peso específico seco. El resultado del ensayo proporcionara un punto en la curva.

Vuelve a repetirse la misma operación varias veces, aumentando en cada una de ellas la humedad de la muestra, obteniéndose de este modo una serie de puntos con los cuales dibujamos la curva ASSTHO.

La finalidad del ensayo Proctor es determinar la cantidad óptima de agua de un suelo que permite la mejor compactación para una energía dada. Este hecho de que la compactación es proporcional a la densidad del terreno seco. La parte de una muestra de un suelo secado mediante estufa se compacta con una energía y una humedad fijas y se mide su densidad seca. Hay que realizar las mismas observaciones aumentando progresivamente la humedad y se dibujara finalmente una curva siendo las abscisas las humedades y las ordenadas las densidades secas correspondientes. Esta curva presenta un máximo para una cierta humedad que se llama por definición ÓPTIMO PROCTOR.

Proctor modificado

El molde es mas gran de: Tiene 6 pulgadas de diámetro exterior y 6 pulgadas de altura la compactación se realiza en cinco capas de 2.5 cm de espesor, utilizando un compactador de 10 libras cayendo desde una altura de 18 pulgadas.

Se dan 25 golpes por capa. El ensayo se hace sobre elementos del suelo inferiores a 20 mm. Si el suelo contiene elementos más gruesos, se reemplazan por un peso igual de elementos comprendidos entre 5 y 20mm.

El ensayo Proctor Normal corresponde a una energía de compactación media, como por ejemplo la que se alza en un terraplén por la circulación de vehículos de transporte y por el paso de una apisonadora. El ensayo Proctor Modificado corresponde a una energía de compactación más importante, como la de un asiento de calzado o de la capa constituyente de la calzada propiamente dicha.

4.6.2. ENSAYO C.B.R.:

Fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. E. Stanton y O. J. Porter, de departamento de carreteras del estado de California. Desde esa fecha, tanto en Europa como en América, el método CBR (California Bearing Ratio = Relación de Soporte California) se ha generalizado y es hoy en día, uno de los mas empleados.

Se establece en el una relación entre la resistencia a la penetración de un suelo, y su

capacidad de soporte como base de sustentación para pavimentos flexibles. Si bien este método es empírico, se basa en un sinnúmero de trabajos de investigación llevados a cabo tanto en los laboratorios de ensayo de materiales, como en el terreno, lo que permite considerarlo como uno de los mejores procedimientos prácticos sugeridos hasta hoy.

Este método que ha sido adoptado por el cuerpo de ingenieros del ejército estadounidense, así como por otros organismos técnicos y viales, ha experimentado varias modificaciones, pero en la actualidad se sigue, en líneas generales, el procedimiento sugerido por el U. S. Waterways Experiment Station.

Dado que el comportamiento de los suelos varia de acuerdo con su “grado de Alteración”, con su granulometría y sus características físicas, el método a seguir para determinar el CBR, será diferente en cada caso.

El ensayo de C.B.R. mide la resistencia al corte (esfuerzo cortante) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, la ASTM denomina a este ensayo, simplemente como “Relación de soporte” y esta normado con el número ASTM D 1883-73.

El ensayo de CBR es uno de los más importantes para el diseño de carreteras, así como el número de ellos que se deben realizar, tanto en el campo como en el laboratorio. A continuación se mencionará una de las fases del diseño para carreteras en las que interviene este ensayo:

Las muestras procedentes de las calicatas y los sondeos mecánicos se caracterizarán mediante ensayos de identificación (granulometría, límites de Atterberg, humedad natural), y ensayos químicos (sulfatos, sales solubles, materia orgánica).

Se realizará una identificación previa y se definirán grupos homogéneos entendiendo como tales los suelos contiguos a lo largo de la traza y que, según los ensayos anteriores pertenecen al mismo tipo.

Sobre muestras representativas de cada grupo homogéneo se determinarán la densidad máxima Proctor e índice CBR. Se seleccionará como CBR de proyecto de cada grupo homogéneo el que corresponda aun nivel de confianza del 95%, salvo en el caso en que

el número de ensayos sea inferior a 5, para el cual el CBR de proyecto será el menor de los obtenidos.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del Proyecto (PPTP) definirá el ensayo de compactación de referencia (Proctor Normal o Modificado) para la definición de la densidad a alcanzar en obra. A efectos de la clasificación de suelos y para la estimación de valores para el cálculo, el ensayo CBR se realizará con la humedad óptima del ensayo Proctor Normal y una densidad del 95% de la máxima Proctor Normal para suelos de inadecuados, marginales, tolerables o adecuados, y con la humedad óptima del ensayo Proctor Modificado y una densidad del 95% de la máxima Proctor Modificado para suelos seleccionados y estabilizados.

Objetivo del CBR:

- Conocer cual es la relación entre la penetración que se realiza a un suelo y la capacidad de soporte del mismo. Considerando como material a la arcilla.
- Para la presente practica la cual se denomina “*Ensayo de la Relación de Soporte de California (CBR)*” entre sus objetivos mas importantes podemos destacar lo siguiente:
- Como un principal objetivo podemos destacar la importancia que tiene esta práctica de laboratorio la cual nos instruye y nos ayuda a estudiar en forma práctica el ensayo del CBR en un suelo compactado.
- Otro de los objetivos es el de estudiar a un método para evaluar la cantidad relativa del suelo para subrasantes, subbase y base.

Existen diferentes tipos de realizar ensayos CBR, por lo cual se puede explicar uno de ellos, que pareció muy interesante:

Para los suelos del tipo A – 1; A – 2 – 4 y A – 2 – 6, la razón de soporte se calcula solo para 5mm de penetración (0.2 pulgadas).

Para suelos del tipo A – 4; A – 5; A – 6 Y A – 7, cuando la razón correspondiente a 5mm es mayor que a 2,5mm, confirmar el resultado, en caso de persistencia, la razón de soporte corresponderá a 5mm de penetración.

Para suelos del tipo A – 3; A – 2 – 5 Y A – 2 – 7, el procedimiento a aplicar queda al criterio del ingeniero.

Con el resultado del CBR se puede clasificar el suelo usando la tabla.

Tabla 4.3 Clasificación de suelo de acuerdo al C.B.R.

CBR	CLASIFICACIÓN
0 - 5	Subrasante muy mala
5 – 10	Subrasante mala
10 – 20	Subrasante regular a buena
20 – 30	Subrasante muy buena
30 – 50	Subbase buena
50 – 80	Base buena
80 - 100	Base muy buena

Clasificación del suelo de acuerdo al CBR

Cuando se requiere conocer los efectos de preconsolidación natural, estructura de suelo, cementación natural, estratificación, que son aspectos que no pueden producirse con muestras remoldadas de suelo ni con muestras supuestamente inalteradas que se ensayen en laboratorio, se recomienda efectuar el ensaye CBR in situ, siempre que el terreno natural esté en las condiciones más críticas en el momento de efectuar la prueba. El procedimiento que se sigue en esta prueba es similar al establecido en los ítems anteriores, con la diferencia que en este caso, la muestra no está confinada en un molde. El informe final del ensayo deberá incluir, además del CBR determinado, la curva de

presión – penetración, la humedad, peso específico y densidad natural del suelo ensayado, antecedentes que pueden obtenerse del suelo inmediatamente vecino al que afectó el ensaye del CBR.

4.7. SUELOS COHESIVOS, PLÁSTICOS Y EXPANSIVOS

Estos suelos pertenecen, en la clasificación unificada, a los siguientes grupos.

MH.- Limos orgánicos; suelos limosos y arenosos de granulometría fina, micácea y diatomácea; y limos elásticos.

CH.- Arcillas inorgánicas muy plásticas.

OH.- Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada.

El método que se sigue para determinar el CBR deberá seleccionarse cuidadosamente las humedades y densidades, pues en estos suelos expansivos no siempre la humedad óptima y densidad máxima son las más adecuadas. Muchas veces, el hinchamiento de ellos es menor cuando se los compacta a densidades y con humedades distintas a la máxima y optima respectivamente obtenidas en el laboratorio.

Por lo tanto el CBR que se seleccione para el diseño de una carretera a construirse sobre un suelo expansivo, será el correspondiente a la humedad y densidad bajo las cuales el suelo presenta menor hinchamiento.

Para facilitar la selección del CBR de diseño, es recomendable representar gráficamente los porcentajes de hinchamiento versus los contenidos de humedad en los diferentes estados de compactación. La comparación de las curvas que relacionan los hinchamientos, CBR y densidades, con las humedades de compactación, permitirá establecer los límites de humedad y densidad apropiados, facilitando así la selección del CBR.

4.8 PRUEBAS DE COMPACTACIÓN

Actualmente existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en el laboratorio unas condiciones dadas de compactación de campo. Todos ellos pensados para estudiar, además, los distintos factores que gobiernan la compactación de suelos.

Históricamente, el primer método, en el sentido de la técnica actual, es el debido a R. Proctor 1 y es conocido hoy en día como Prueba Proctor Estándar o A.A.S.H.O. (American Asociados of State Highway Officials) Estándar.

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

Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen del tipo de los materiales con los que se trabaje en este caso; con base en un experimento sencillo los materiales puramente friccionantes, como la arena, se compacta eficientemente por métodos vibratorios, en tanto que en los suelos plásticos el procedimiento de cargas estáticas resulta el mas ventajoso. En la práctica, estas características se reflejan en los equipos disponibles para el trabajo, tales como plataforma vibratoria, rodillos lisos, neumáticos o “pata de cabra”. En las ultimas épocas los equipos del campo han tenido gran desarrollo y hoy existen en gran variedad de sistemas o pesos, de manera de que el ingeniero tiene posibilidad de elegir entre muchos, los implementos adecuados a cada caso particular.

La eficiencia de cualquier equipo de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno, se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan en el laboratorio.

De entre todos los factores que influyen en la compactación obtenida en un caso dado, podría decirse que dos son los mas importantes: el contenido de agua del suelo, antes de incoares el proceso de compactación y la energía específica empleada en dichos procesos. Por energía específica se entiende la energía de compactación suministrada al suelo por mitad de volumen.

El establecimiento de una prueba simple de compactación en los laboratorios cubre, principalmente de dos finalidades. Por un lado disponer de muestras de suelo compactadas teóricamente con las condiciones de campo, a fin de investigar sus propiedades mecánicas para conseguir datos firmes de proyecto; por otro lado es necesario poder controlar el trabajo de campo, con vistas a tener seguridad.

4.9 ENSAYO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)

Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en construcción de carreteras. Durante la Segunda Guerra Mundial, el cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adopto este ensayo para utilizarlo en las construcciones de aeropuertos.

Para diferentes valores de CBR y cargas por rueda o por eje, se han determinado los respectivos espesores de pavimentos, en base a datos experimentales. Los diferentes organismos viales y técnicos, han elaborado curvas para la determinación de espesores de pavimentos flexibles, en función CBR.

de que el equipo usado esta trabajando efectivamente en las condiciones previstas en el proyecto.

Finalmente una vez iniciada la construcción, verificando la compactación lograda en el campo con muestras al azar tomadas del material compactado en la obra, se puede comprobar que en esta se están satisfaciendo los requerimientos del proyecto.

La prueba consiste en tres capas, dentro de un molde de dimensiones y forma específicas, por medio de golpes de un pisón, también especificado, que se dejan caer libremente desde una altura prefijada.

Con este procedimiento de compactación Proctor estudio la influencia que ejercía en el proceso el contenido inicial de aguas del suelo, encontrando que tal valor era de fundamental importancia en la compactación lograda. En efecto, observo que a contenido de humedad creciente, a partir de valores bajos, se obtienen mas altos pesos específicos seco y, por lo tanto, mejores compactaciones del suelo.

Es decir, Proctor puso de manifiesto que, para un suelo dado y usando el procedimiento descrito, existen una humedad inicial, llamada la “Optima” que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación.

Se debe tomar en cuenta que para la compactación por el método T-180 que de tiene que dar 56 golpes en 5 capas o por el método de T-99 se tiene que dar 25 golpes y 3 capas para poder obtener el volumen de el suelo compactado se utiliza el ensayo de Densidad en sitio.

Las investigaciones experimentales comprueban que en el primer caso se obtienen pesos específicos secos mayores que en el segundo, para un mismo suelo y a los mismos contenidos de agua; este efecto parece ser particularmente notable en suelos finos plásticos con contenido de agua inferior al óptimo.

A un mismo contenido de humedad se tienen entonces condiciones diferentes en los grupos de suelo; en el primer caso, en que el agua se agrego, la presión capilar entre los grupos será menor por el exceso de agua en comparación con el segundo caso, en que la evaporación hace que los meniscos se desarrollen más.

Por lo tanto, en el primer caso la ligazón entre los grupos será menor, haciendo que en una misma energía de compactación sea más eficiente para compactar al suelo en el segundo caso.

Las practicas recomendada a estos efectos es proceder en la prueba a partir de un suelo relativamente seco incorporando agua a distintas porciones del mismo en la proporción necesaria para alcanzar los contenidos de agua deseables, dejando cada porción 24 horas en reposo a fin de permitir la uniformizaron de la humedad.

Es común en la práctica de ciertos laboratorios el usar la misma muestra de suelo para la obtención de los puntos sucesivos de la curva de compactación: ello implica la continuada “recompactación” del mismo suelo.

Parece que en una explicación simple del efecto anterior reside en la formación volumétrica del tipo plástico producida por las sucesivas compactaciones.

Como en el campo el suelo no sufre una recompactación, la práctica de laboratorio debe ser, consecuente, el usar muestras de suelo diferentes para la obtención de cada punto de la curva de compactación.

El ensayo de CBR (la ASTM denominada el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un numero de la relación de soporte, pero de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo.

De paso, es interesante comentar que el experimento puede hacerse en el terreno o en el suelo compactado, pero este aspecto se encuentra fuera del objetivo del presente manual de laboratorio.

El California Bearing Ratio (denominado de aquí en adelante como CBR). Este se expresa como un porcentaje del esfuerzo requerido para hacer penetrar un pistón en el suelo que se ensaya, dividiendo por el esfuerzo requerido para hacer penetrar el mismo pistón hasta la misma profundidad en una muestra patrón de piedra triturada.

$$\text{C.B.R.} = \frac{\boxed{\text{Esfuerzo en el suelo ensayado}}}{\boxed{\text{Esfuerzo en el patrón g}}} \times 100$$

La relación C.B.R. generalmente se determina para 0.1" y 0.2" de penetración o sea para un esfuerzo de 1000 1500 libras por pulgada cuadradas en el patrón, respectivamente. De estos dos valores se usa el que sea mayor.

Con el fin de duplicar en el laboratorio la condición más crítica que se presenta en el terreno, las muestras para el ensayo del C.B.R. se sumergen en agua hasta obtener su saturación.

Los ensayos de C.B.R. se pueden efectuar sobre muestras compactadas en el laboratorio, sobre muestras inalterables obtenidas en el terreno y sobre suelo en sitio.

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

Cuadro 4.1 Valores de carga unitaria

Penetración		Carga Unitaria Patrón	
mm	pulg.	Mpa	psi
2.5	0.10	6.9	1.000
50	0.20	10.3	1.500
75	0.30	13.0	1.900
100	0.40	16.0	2.300
127	0.50	18.0	2.600

El número C.B.R. usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.5 mm. Sin embargo, si el valor de C.B.R. a una penetración de 5.0 mm es mayor, el ensayo debería repetirse (ordinariamente). Si un segundo ensayo produce nuevamente un valor de C.B.R. mayor de 5.0mm de penetración, dicho valor debe asentarse como valor final del ensayo.

Los ensayos del C.B.R. se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación estándar (o modificación). Continuación utilizando los métodos 2 ó 4 de las normas ASTM D698-70 ó D1557-70 (para el molde de 15.2 cm. de diámetro) se debe compactar las muestras utilizando las siguientes energías de compactación:

A menudo se compactan dos moldes de suelo, uno para penetración inmediata y otro para penetración después de dejarlo saturado por un periodo de 96 horas. El segundo espécimen es saturado durante 96 horas con una sobre carga aproximadamente igual al peso del pavimento que se utilizara en el campo pero en ningún caso el peso de la sobre carga será menor de 4.5 kg. Es necesario durante este periodo tomar registros de expansión para instantes escogidos arbitrariamente y al final del periodo de saturación se hace la penetración para obtener el valor de C.B.R. para el suelo en condiciones de saturación completa.

5.1 UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

Para el presente trabajo se realizó el estudio en la Ciudad de BERMEJO provincia Arce del departamento de Tarija.

Las muestras de suelo son dos las cuales se encuentran en la zona Urbana a de la ciudad de Bermejo, como lo es la zona Este (Barrio las Palmera) y la Oeste (Barrio el lapacho), Así también se ha extraído la VINAZA de Industrias Agrícolas de Bermejo.

Las muestras de suelo se escogieron en función de su plasticidad esto con el fin de poder saber que sucede con el suelo cuando se aplica la vinaza en un suelo plástico y a otro menos plástico.

5.2 REALIZACIÓN DEL MUESTREO BARRIO EL LAPACHO

Para la selección de la muestra, se tuvo en cuenta que fuera del tipo arcilloso y cumpla con las características de ser un suelo cohesivo, la profundidad de excavación fue de 80 cm debajo de la superficie.

5.3. CARACTERISTICAS FISICAS DEL MATERIAL

El material es de color rojizo claro en estado seco,
rojo oscuro cuando esta húmedo.

Textura uniformé de baja plasticidad

Suelo Fino: Limo-Arcilloso con poca plasticidad.



Fig. 5.1 Muestra Barrio Lapacho

5.4 UBICACIÓN:

El lugar de extracción de la muestra se encuentra en el barrio “LAPACHO” limita al este con el Barrio el 1 de Mayo al oeste con el Barrio San José y al Sur con el Barrio el Lapacho.

La procedencia de la muestra se extrajo de la Calle Final Argentina entre Narciso Campero y Calle los Cañeros.

Fig. 5.2 Ubicación Barrio Lapacho



5.5. REALIZACIÓN DEL MUESTREO BARRIO LAS PALMERAS

Para la selección de la muestra, se tuvo en cuenta que fuera del tipo arcilloso y cumpla con las características de ser un suelo cohesivo, la profundidad de excavación fue de 80 cm.

5.6. CARACTERISTICAS FISICAS DEL SUELO

El material es de color amarillo claro en estado seco y un Amarillo Marfil En estado húmedo.

Es de textura uniforme con alto contenido de arcilla, es un suelo fino: Limo-Arcilloso



Fig. 5.3 Muestra Barrio Palmeras

5.7 UBICACIÓN:

el lugar de Extracción de la muestra se encuentra en el barrio las “PALMERAS” limita al Este con la comunidad de porcelana, al oeste con el barrio azucarero al norte con la comunidad de porcelana y al Sur con la carretera al Aeropuerto de Bermejo,

La muestra se extrajo de la Avenida Circunvalación entre la calle “FICUS” y la calle los “CEIBOS” es la ultima calle asía el este de Bermejo.

Fig. 5.4 Ubicación Barrio Palmeras



5.8 SITIO DE PRODUCCION DE LA VINAZA DE CAÑA DE AZUCAR

La vinaza de caña de azúcar es producida en el Ingenio Azucarero de bermejo (I.A.B.S.A.)



Fig. 5.5 Ubicación Ingenio Azucarero



Fig. 5.6 Destilería Ingenio Azucarero

La fabrica se encuentra en la carretera bermejo- San Antonio a 4 Km de la Ciudad de Bermejo.

5.9 PROCEDIMIENTO PARA SU EXTRACCIÓN.

Para poder extraer la vinaza se debe tomar en cuenta la temperatura a la cual es producida $T = 115^{\circ}\text{C}$ y es necesario tener en cuenta el recipiente en la cual será depositada, esto para evitar la desintegración de dicho recipiente.

Después de extraída se debe enfriar para su posterior utilización con fines de estabilización.



Fig. 5.7 Destilería producción Alcohol

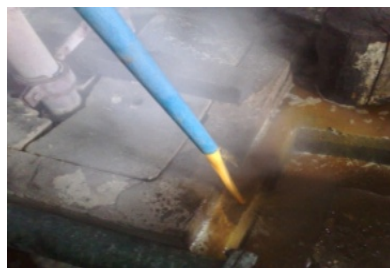


Fig. 5.8 Recolección Vinaza

5.10. UBICACIÓN SATELITAL DE LAS MUESTRAS EN ESTUDIO.



Fig. 5.9 Ubicación Satelital

5.11. DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

5.11.1. RESUMEN DEL EXPERIMENTO.

El primer paso es hacer un reconocimiento visual y manual, para luego determinar qué tipos de minerales están contenidos en el suelo.

Segundo.- Una vez obtenida las muestras se procederá a su clasificación de los suelos en estado natural, para esto se realizara el ensayo de los Limites de Atterberg, para conocer los limites liquido y plástico y por consiguiente hacer la resta entre estos dos limites para obtener el Índice de Plasticidad.

Tercero.- Se realizara su granulometría para saber el tamaño de las partículas que presentan los suelos en estudio.

Una vez obtenido los resultados de límites de atterberg y de su granulometría se procederá a su clasificación mediante los métodos anteriormente descritos (AASSTHO, SUCS).

Cuarto.- Se realizara el ensayo de compactación para poder obtener la Humedad Optima y su Densidad Máxima, esto para poder realizar el ensayo del C.B.R.

Quinto.- Con esta Humedad Optima encontrada con la compactación también se hará el ensayo de compresión simple.

El procedimiento para la aplicación de la vinaza será el mismo con la diferencia de que en vez de adicionar agua, le adicionaremos vinaza.

Primero se procederá a secar el suelo al horno y poderle quitar el agua en su totalidad, esto para encontrar la humedad optima del mismo suelo pero con Vinaza, a este procedimiento se lo llamara 100 % de vinaza.

Los porcentajes que se utilizaran para los ensayos de límites de atterberg, CBR y Compresión Simple serán del 0 %, 25 %, 50 %. 75 % 100 % de vinaza con relación a su Humedad Optima.

Entiéndase a 0% de Vinaza al suelo en estado natural.

5.12 CARATERISTICAS DE LOS MATRIALES ESTUDIADOS: EL SUELO

5.12.1 EL SUELO BARRIO EL LAPACHO

El suelo en estudio se obtuvo de un muestreo alterado e inalterado a una profundidad de 80 cm para evitar la extracción de materia orgánica.

Cuadro.5.1 Descripción suelo Barrio Lapacho

Localización	Barrio EL LAPACHO
Profundidad de muestra	0.80 m
Descripción de la muestra	Arcilla color rojo claro
Tipo de muestra	Alterado
ph	6.8

5.12.2. EL SUELO BARRIO PALMERAS

De la misma forma que el anterior suelo se obtuvo esta muestra.

Cuadro.5.2 Descripción suelo Barrio las Palmeras

Localización	Barrio LAS PALMERAS
Profundidad de muestra	0.80 m
Descripción de la muestra	Arcilla color amarilla clara
Tipo de muestra	Alterado
ph	6.6

5.13. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL UTILIZADO: LA VINAZA DE CAÑA DE AZÚCAR.

5.13.1. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA VINAZA

LA VINAZA, se procedió a analizarlo en la
Universidad Autónoma Juan Misael Saracho,
En la Facultad de Ciencias y Tecnología
En el centro de Análisis, Investigación y Desarrollo
“ C.E.A.N.I.D.”



Fig. 5.10 Vinaza de caña

Laboratorio Oficial del ministerio de salud y Previsión social

Cuadro.5.3 Análisis Químico de la vinaza

Parámetro	Método	Unidad	Muestra 900 FQ 812
pH (26.6 °C)	SM 4500-H-B		5.02
Sales Totales	SM 2540 – C	Mg / l	76980
Grado de Azúcar Sólidos Solubles (26 °C)	NB 383 – 80	° Brix	8.3
Materia Orgánica	NB 075 - 74	%	4.86

5.14 RESUMEN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.

5.14.1 BARRIO EL LAPACHO

5.14.1.1 0 % de VINAZA

DESCRIPCIÓN

Se tomara como 0 % de vinaza al suelo en estado natural.

CLACIFICACIÓN DEL SUELO

GRANULOMETRIA METODO DEL LAVADO

Cuadro.5.4 Granulometría Barrio Lapacho

<i>Barrio El Lapacho</i>	
<i>Tamiz N°</i>	<i>% que pasa del total</i>
<i>10</i>	<i>100</i>
<i>40</i>	<i>99.91</i>
<i>200</i>	<i>74.34</i>

Para este ensayo se lo realizo por el método del lavado esto por ser a simple vista un material fino, se dejo 500 gramos en saturación por un periodo de 24 horas, seguidamente se realizo el método de lavado, colocando la muestra sobre el tamiz 200 y adicionarle agua y lavar la muestra, el procedimiento termina hasta que el agua no contenga materiales finos en suspensión dicho de otra forma tenga su color natural.

HIDROMETRO

Cuadro.5.5 Hidrómetro b/ Lapacho

BARRIO EL LAPACHO	
Pasa Tamiz 200 =	100
(%) Limo Parcial=	68.40
(%) Arcilla Parcial =	31.60

Para este ensayo se usa 60 gramos de suelo que pasa el Tamiz 200 y se lo coloca en una probeta de 1000 ml. Y con el hidrómetro se toma diferentes lecturas en un determinado tiempo hasta que se lea la misma lectura en el primer día y después se vendrá a lecturar en diferentes periodos hasta que el agua tenga su color natural.

LIMITES DE ATTERBERG.

Cuadro.5.6 Limites Barrio Lapacho

BARRIO EL LAPACHO	
L.L. (%) =	28.32
L.P. (%) =	22.65
I. P. (%) =	5.65

Para este ensayo se toma la una cantidad que pase el tamiz # 40 y se le adiciona agua a diferentes golpes, uno en la parte superior entre 25 a 30 golpes otro 20 y 25 y otro entre 15 y 20 esto para hacer una regresión por que el Limite está ubicado a 25 golpes.

Para el Limite plástico, se hacen rollitos de un diámetro de 3 mm hasta que presentas fracturas en el suelo.

Estas muestras se lo colocan al horno y se determina la cantidad de humedad que presenta el suelo.

CLACIFICACIÓN.

Cuadro.5.7 Clasificación Barrio Lapacho

Barrio El Lapacho	
UNIFICADA SUCS	AASHTO
CL - ML	A-4 (8)

Según SUCS “CL-ML” y según AASHTO A – 4 (8) Son suelos limosos sin plasticidad o poco plástico. Suelos predominados por limo con solo moderadas cantidades de material grueso y pequeñas cantidades de arcilla pegajosa coloidal.

COMPACTACIÓN

Cuadro.5.8 Compactación b/ Lapacho

0 % VINAZA	100 % VINAZA
Humedad Optima = 10.7 %	Humedad Optima = 11.63

Este ensayo tiene la finalidad de hallar la humedad óptima y su densidad máxima, se realiza el procedimiento que se describió en el capítulo 4, se hallan 5 puntos a diferentes humedades.

El procedimiento es el mismo para cada punto a diferentes humedades, este procedimiento finaliza hasta que el peso sea menor al último punto encontrado.

Los procedimientos para todos los ensayos están descritos en el capítulo 4 de aquí en adelante se realiza el resumen de los resultados obtenidos.

ENSAYO DE VALOR SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

Cuadro.5.9 CBR b/ lapacho

Barrio El Lapacho	
0 % Vinaza	% EXPANSION
4	2.1

COMPRESION SIMPLE

Cuadro.5.10 Compresión simple b/ lapacho

Barrio El Lapacho	
Humedad (%)	Resistencia a Compresión Simple
7.5	8.1

1.14.1.2 100 % de VINAZA

DESCRIPCION

SE DENOMINA 100 % VINAZA cuando el suelo no presenta humedad es decir que el suelo esta 100 % seco, y para los ensayos en vez de adicionar agua se adicionara Vinaza.

Limites de Atterberg	Limite Liquido (%)	26.42
	Limite Plástico (%)	17.82
	Índice de plasticidad (%)	8.6
Compactación	Humedad Óptima (%)	11.64
	Densidad Máxima(gr/cm ³)	2.09
C.B.R.	95 %	7.8
Compresión Simple	% humedad	7.6
	Resistencia a la compresión	12.3
pH	Vinaza	5.35
pH	Suelo - Vinaza	4.8

Cuadro.5.11 Resultados 100 % Vinaza b/ Lapacho

5.14.1.3 75 % de VINAZA

Limites de Atterberg	Limite Liquido (%)	27.02
	Limite Plástico (%)	19.75
	Índice de plasticidad (%)	7.27
Compactación	Humedad Óptima (%)	11.64
	Densidad Máxima (gr/cm3)	2.09
C.B.R.	95 %	6.4
Compresión Simple	% humedad	7.1
	Resistencia a la compresión	11.78
pH	Vinaza	5.35
pH	Suelo - Vinaza	4.75

Cuadro.5.11 Resultados 75 % Vinaza b/ Lapacho

5.14.1.4. 50 % de VINAZA

Limites de Atterberg	Limite Liquido (%)	27.45
	Limite Plástico(%)	20.72
	Índice de plasticidad (%)	6.73
Compactación	Humedad Optima(%)	11.64
	Densidad Máxima(gr7cm3)	2.09
C.B.R.	95 %	5.7
Compresión Simple	% humedad	6.8
	Resistencia a la compresión	11.2
pH	Vinaza	5.35
pH	Suelo - Vinaza	4.7

Cuadro.5.12 Resultado 50 % de Vinaza b/Lapacho

5.14.1.4 25 % de VINAZA

Limites de Atterberg	Limite Liquido (%)	28.28
	Limite Plástico (%)	22.09
	Índice de plasticidad (%)	6.18
Compactación	Humedad Óptima (%)	11.64
	Densidad Máxima(gr/cm ³)	2.09
C.B.R.	95 %	5.5
Compresión Simple	% humedad	5.7
	Resistencia a la compresión	11.2
pH	Vinaza	5.35
pH	Suelo - Vinaza	4.8

Cuadro.5.13 Resultado 25 % Vinaza

5.14.2 BARRIO LAS PALMERAS

5.14.2.1 0 % de VINAZA

DESCRIPCIÓN

Se tomara como 0 % de vinaza al suelo en estado natural.

CLACIFICACIÓN DEL SUELO

GRANULOMETRIA METODO DEL LAVADO

Cuadro.5.14 Clasificación b/ Palmeras

<i>Barrio LAS PALMERAS</i>	
<i>Tamiz N°</i>	<i>% que pasa del total</i>
<i>10</i>	<i>100</i>
<i>40</i>	<i>99.94</i>
<i>200</i>	<i>80.72</i>

HIDROMETRO

Cuadro.5.15 Hidrómetro b/Palmeras

<i>Barrio El Lapacho</i>	
Pasa Tamiz 200 =	100
(%) Limo Parcial=	29.8
(%) Arcilla Parcial =	70.20

LIMITE DE ATTERBERG.

Cuadro.5.16 Límites de Atterberg b/ Palmeras

<i>Barrio El Lapacho</i>	
L.L. (%) =	34.55
L.P. (%) =	18.19
I. P. (%) =	16.35

CLASIFICACIÓN.

Cuadro.5.17 Clasificación del suelo b/ Palmeras

Barrio Las Palmeras	
UNIFICADA SUCS	AASHTO
CL	A-6(11)

Como puede apreciarse en ambas clasificaciones la arcilla se integra en una clase correspondiente:

Según SUCS “CL” y Según AASHTO A-6(11). Arcilla plástica contiene pequeños porcentajes de limo y arena fina cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla, de un aspecto típico del material, que tiene coloración amarillenta en seco y coloración un tanto más oscura en café cuando se encuentra con presencia de agua.

Tienen buena capacidad soportante cuando están compactados a la densidad máxima, pero pierden capacidad soportante cuando absorben humedad.

COMPACTACION

Cuadro.5.18 Compactación B/ Palmeras

0 % VINAZA	100 % VINAZA
Humedad Optima = 12.08 %	Humedad Optima = 11.6

ENSAYO DE VALOR SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

Cuadro.5.19 C.B.R. al 95 %

Barrio palmeras	
0 % Vinaza	% EXPANSION
4.1	1.4

COMPRESION SIMPLE

Cuadro.5.20 Compresión Simple Palmeras

Barrio las Palmeras	
Humedad (%)	Resistencia a Compresión Simple
8.4	7.7

5.14.2.2. 100 % de VINAZA

DESCRIPCION

SE DENOMINA 100 % VINAZA cuando el suelo no presenta humedad es decir que el suelo esta 100 % seco, y para los ensayos en vez de adicionar agua se adicionara Vinaza.

Cuadro.5.21 Resultados 100 % Vinaza

Limites de Atterberg	Limite Liquido (%)	20.33
	Limite Plástico (%)	20.06
	Índice de plasticidad (%)	0.26
Compactación	Humedad Óptima (%)	11.62
	Densidad Máxima(gr7cm3)	1.7
C.B.R.	95 %	26.6
Compresión Simple	% humedad	10.1
	Resistencia a la compresión	10.1
pH	Vinaza	5.35
pH	Suelo - Vinaza	5.6

5.14.2.3 75 % de VINAZA

Limites de Atterberg	Limite Liquido (%)	21.53
	Limite Plástico (%)	16.89
	Índice de plasticidad (%)	4.64
Compactación	Humedad Óptima (%)	11.64
	Densidad Máxima(gr7cm3)	2.09
C.B.R.	95 %	18.3
Compresión Simple	% humedad	8.5
	Resistencia a la compresión	9.0
pH	Vinaza	5.35
pH	Suelo - Vinaza	5.72

Cuadro.5.22 Resultados 75 % Vinaza

5.14.2.4 50 % DE VINAZA

Limites de Atterberg	Limite Liquido (%)	26.05
	Limite Plástico (%)	15.87
	Índice de plasticidad (%)	10.18
Compactación	Humedad Óptima (%)	11.64
	Densidad Máxima(gr7cm3)	2.09
C.B.R.	95 %	12.2
Compresión Simple	% humedad	8.2
	Resistencia a la compresión	8.3
pH	Vinaza	5.35
pH	Suelo - Vinaza	5.9

Cuadro.5.23 Resultados 50 % Vinaza

4.14.2.5 25 % DE VINAZA

Cuadro.5.24 Resultados 25 % Vinaza.

Limites de Atterberg	Limite Liquido (%)	29.35
	Limite Plástico (%)	15.59
	Índice de plasticidad (%)	13.75
Compactación	Humedad Óptima (%)	11.64
	Densidad Máxima(gr/cm ³)	2.09
C.B.R.	95 %	7.6
Compresión Simple	% humedad	5.7
	Resistencia a la compresión	8.8
pH	Vinaza	5.35
pH	Suelo - Vinaza	6

5.15. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS REFERENCIALES

El estudio de costos contempla básicamente la elaboración del precio referencial, los cuales corresponden a la estabilización con métodos de construcción optimizados y adecuados a la maquinaria con la que se cuenta en nuestro medio para la aplicación.

Se emplean equipos comunes de construcción de una subrasante, como ser: motoniveladora, camión aguatero y compactadores, etc.

Para realizar el cálculo se hizo un análisis detallado de los precios unitarios, tomando en cuenta los costos horarios y rendimiento de operación de la maquinaria que se empleará en cada técnica de estabilización asimismo en los insumos, materiales, mano de obra y demás gastos que demanda la obra o actividad.

A continuación se hace una descripción de los componentes del precio unitario de ésta actividad.

5.15.1. COSTOS DIRECTOS

a).- MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Se considera para la estabilización un solo material fundamental para lograr la tarea o el objetivo propuesto como son: las Vinaza de caña de azúcar el costo será mínimo (costo transporte desde la fabrica a la obra)

b).- MANO DE OBRA

Comprende el haber básico del trabajador, el pago de beneficios sociales, el pago de impuestos y el costo horario de la mano de obra.

Los haberes o salarios mensuales se consideraron de acuerdo a los establecidos por la CADECO pero su variación está sujeta a la ley de la libre oferta y demanda. Asimismo en el detalle de los precios unitarios no se considera al operador del equipo más un ayudante o peón dentro de los costos horarios de operación de la maquinaria, por lo que estos son considerados recién en los gastos de la mano de obra dentro del análisis.

c).- MAQUINARIA Y EQUIPO

Contempla, la productividad, costos de propiedad, vida útil, amortización e intereses, costos de operación, reparación y repuestos, en fin esto se resume en lo que son los costos horarios de operación los que afectados por el rendimiento de la maquinaria, nos dará el costo unitario de la maquinaria.

5.15.2. COSTOS INDIRECTOS

Por una parte están los gastos generales, que pueden estimarse en función de los costos unitarios y como el 15% de costo directo.

Ahora como en toda obra se debe obtener utilidades las cuales también se pueden estimar a partir de los costos directos y no pueden ser mayores al 10% de éstos, y en muchas veces es menor que el 10%.

5.15.3. PRECIOS UNITARIOS DE LA ESTABILIZACIÓN

El detalle de tales planillas se muestran en el anexo 3 y un resumen de los resultados obtenidos se presenta en el cuadro 5.25 En el mencionado cuadro.

ITEM O ACTIVIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO UNITARIO
	\$us/m ³	Bs./m ³
Estabilización vinaza	9.21	64.854

Cuadro 5.25.: Precios unitarios para la estabilización con Vinaza

6.1 CONCLUSIONES.

6.1.1 DEL SUELO

- De lo analizado podemos afirmar que el suelo del barrio lapacho de la ciudad de bermejo es un suelo según su clasificación por el método SUCS “CL – ML” y según AASHTO “A – 4 (8)” lo cual nos indica que es limoso con poca plasticidad, es un suelo predominado por limo con solo moderadas cantidades de arcilla pegajosa coloidal, con una capacidad de soporte de 4 no siendo apta para sub rasante ya que es pobre.
- Del Análisis químico podemos afirmar que el suelo tiene un pH 6.8 (Cercano al neutro)
- De lo analizado podemos afirmar que el suelo del barrio las PALMERAS es un suelo según su clasificación por el método SUCS “CL” y Según AASHTO A-6(11). Arcilla plástica que contiene pequeños porcentajes de limo y arena fina cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla, de un aspecto típico del material, que tiene coloración amarillenta en seco y coloración un tanto más oscura cuando se encuentra con presencia de agua, con una capacidad de soporte 4.1%
- Del Análisis químico podemos afirmar que el suelo tiene un pH 6.6(Cercano al neutro)
- Tienen buena capacidad soportante cuando están compactados a la densidad máxima, pero pierden capacidad soportante cuando absorben humedad.

6.1.2 DE LA VINAZA.

- Viene a ser un liquido, producto de un desecho del procesamiento de la caña de azúcar al obtener el Alcohol etílico, la misma que podemos obtenerlo en los centros de producción de la región.
- El PH de la Vinaza muestra un valor de 5.6, es decir es una sustancia acida, de alto contenido contaminante, que sin embargo a nivel mundial se encuentra en procesamiento una serie de técnicas con buenos resultados para su uso dentro del campo agropecuario.

- Las características físico químicas de la vinaza usada es propia de la caña de azúcar de la región, no siendo esta la misma para otros lugares.
- El uso de la vinaza de caña de azúcar, permitiría generar un valor agregado a este producto que en la actualidad simplemente se desecha al río TARIJA.

6.1.3 DE LA ESTABILIZACION DE SUELOS COHESIVOS CON VINAZA DE CAÑA DE AZUCAR.

6.1.3.1 BARRIÓ EL LAPACHO

- De los resultados obtenidos podemos afirmar que técnicamente si es procedente la estabilización mejorando en más de 195 % la capacidad de soporte del suelo natural al reemplazar el agua de compactación por vinaza de caña de azúcar. Habiéndose demostrado que este valor aumenta de 4.0% hasta un 7.8 %.
- Otra propiedad que se pudo notar es el aumento del índice de plasticidad de un 5.65 % a un 8.6 %.
- La variación de la densidad máxima es mínima, pero la humedad optima varia de 10.7 % para un suelo con 0 % de Vinaza (suelo Natural) a un 11.64 % con 100 % de Vinaza.

6.1.3.2. BARRIO LAS PALMERAS

- De los resultados obtenidos podemos afirmar que técnicamente si es procedente la estabilización mejorando en más de 648.7 % la capacidad de soporte del suelo natural al reemplazar el agua de compactación por vinaza de caña de azúcar. Habiéndose demostrado que este valor aumenta de 4.1% hasta un 26.6 %.
- Otra propiedad que se pudo notar es el disminución del índice de plasticidad del índice de plasticidad de un 16.35 a un 0.26 %
- De igual manera la densidad no varía, pero la humedad optima varia de 12.08 % para un suelo con 0 % de Vinaza (Suelo Natural) a un 11.63 % con 100 % de vinaza

Los resultados obtenidos, no constituyen resultados aplicativos a otras zonas, salvo que se tenga las mismas características de suelo y vinaza, pero si sirven de modelo para poder llevar un proceso de estabilización con los insumos utilizados.

La aplicación de la vinaza en las condiciones mostradas, resultaría técnicamente viable si se usa capas superiores a la sub rasante estabilizada, de tal forma que esta no esté expuesta y se tome las medidas mitigatorias respectivas.

6.1.3.3. COSTOS.

- El costo para un metro cubico estabilizado es de 64.50 bs. Esto se debe al valor del material estabilizante que es la vinaza el cual tiene un costo solo de transporte a la obra.

6.2 RECOMENDACIONES.

- Los resultados obtenidos, son en base a una sola muestra de suelo, del lugar, el mismo que sería necesario tener mayores puntos de muestreo a fin de tener una caracterización más exacta del suelo en estudio.
- La Vinaza usada, como se ha podido demostrar es un liquido acido, razón por la cual sería importante fijar como una línea de investigación futura, un análisis detallado de las medidas mitigatorias ambientales, a fin de poder plantear condiciones de uso como estabilizante.
- Es importante también fijar como una línea de investigación, la factibilidad del uso de la vinaza, teniendo en cuenta los volúmenes de producción y las cantidades requeridas con fines de estabilización, a fin de garantizar disponibilidad de la misma.
- El presente trabajo de investigación pretende convertirse en un lineamiento referencial para trabajos futuros al respecto, ya que es de suma importancia tener pleno conocimiento de las características particulares del suelo y de la vinaza usada.
- Una última recomendación que se debe tomar muy en cuenta es que la producción de este elemento Vinaza solo se obtiene cuando empieza la molienda de caña de azúcar siendo (JULIO - DICIEMBRE).