

*Empleo de la cal en el mejoramiento de
suelos arcillosos*

Introducción

El tema desarrollado trata de introducirnos al comportamiento físico-químico de los suelos arcillosos al contacto con el agua, su inestabilidad (expansion y contraccion) y su mejoría al ser adicionada la cal. El proceso por el cual se mejora el suelo para que pueda alcanzar los requisitos fijados, tales que, satisfagan el objetivo de una obra con calidad se le llama "ESTABILIZACION DE SUELOS" como lo son: la compactación, drenaje, preconsolidación, protección contra la erosión, infiltración de humedad, etc.. Los tipos de estabilización mencionados se pueden trabajar por medios mecánicos, eléctricos, drenaje, cambios de temperatura o adición de agentes estabilizantes.

El uso de cualquiera de los métodos anteriores depende de los diferentes tipos de suelos y que cumplan con las necesidades, con gran seguridad, comportamiento adecuado en condiciones normales o esperadas, además de satisfacer otros requisitos importantes el cual es uno de los factores principales de elección, el mantener el costo dentro de los límites económicos.

Este tema comprende de cuatro capítulos en los cuales desarrollamos algunos aspectos importantes para una mejor comprensión, basandose específicamente en investigación de laboratorio. La primera parte comprende los principales objetivos de la estabilización de suelos arcillosos con cal, describiendose además algunos de los métodos y aditivos para la estabilización como lo son la sal y cloruro de calcio para la retención de la humedad, así como la cal, aditivo que empleamos en la elaboración de nuestro trabajo. La adición de la cal es uno de los tres métodos más prácticos en la estabilización de suelos al igual que el cemento portland y los productos asfálticos.

El suelo contiene propiedades potenciales muy importantes que afectan su comportamiento, entre la principales propiedades descritas en este trabajo son la estabilidad volumétrica, resistencia y la permeabilidad entre otras. Encontramos también una reseña histórica del suelo, donde narra que las cimentaciones sólo se edificaban sobre bases sólidas (Tiempo de los romanos); después al escasear las bases sólidas, utilizaron o emprendieron la ingeniería de cimentaciones (Edad Media); a partir del período anterior se desarrollo la ingeniería de cimentaciones en el tema "La humedad", considerando que es una de los enemigos del ingeniero (Período colonial) y los siglos Americanos donde se emprendían las arcillas bajo las cimentaciones y las propuestas de Atterberg, en la clasificación de los suelos.

En la segunda parte se estudia a las arcillas a nivel estructural, tanto física como químicamente. Las arcillas tienen formas o modelos que los caracterizan, conocidos como modelos laminares, como lo son la caolinita, montmorilonita y la illita, las cuales manifiestan un comportamiento en presencia del agua que en base al grado de alteración se pueden identificar requiriendo para ello un grado mayor o menor de mejoramiento teniendo a si diferentes tipos de estabilizantes y resultados. Se describe ese grado de alteración, como lo es el efecto del agua sobre la arcilla, como y porque se comporta de esas formas las arcillas y su identificación en sus minerales arcillosos. Al igual que el efecto del agua se desarrolla el efecto de la cal sobre las arcillas y los objetivos en el empleo de algunos tipos de estabilizantes.

Por último se desarrolla de manera breve el procedimiento constructivo en general de

la estabilización y el procedimiento en carreteras. La tercera parte engloba la parte principal de la investigación que la estabilización de una arcilla con cal hidratada contemplando las pruebas del laboratorio relativamente sencillas como lo es la compresión simple y los límites de Atterberg principalmente y su identificación del suelo respectivamente. Se llevaron a cabo las pruebas necesarias para obtener el porcentaje de cal óptimo, adicionando a las muestras de arcilla los contenidos de cal de 1,2,3,4,5,6 y 7 % en peso, tomando en cuenta el estado natural de la muestra, comparando gráficamente los resultados, observando así lo explicado en los capítulos 1 y 2. Se desarrollan aspectos generales, y una detallada descripción de la interacción cal-arcilla, lo cual es necesario tener en conocimiento para en los resultados del laboratorio tener una interpretación adecuada ya que el grado de mejoramiento se optimiza para cada tipo de suelo en el laboratorio.

Los resultados obtenidos fueron visibles y favorables para la realización de un trabajo sobre arcillas tratadas con cal hidratada, por ser para nosotros un método práctico, seguro, permanente y algunas ventajas como la economía.

Después del estudio realizado, utilizamos dos métodos de diseño que relacionaban los parámetros fundamentales en las arcillas, como lo es la plasticidad calificada en los límites de Atterberg, aportándonos así diseños seguros y económicos. Los diseños presentados en el último capítulo son el diseño de pavimentos flexibles y el de la losa de cimentación sobre suelos expansivos. En el diseño de cimentaciones se presenta un pequeño presupuesto, tratando de evaluar las diferencias del diseño de una losa sobre suelo expansivo y una losa sobre suelo arcilloso tratado con cal. El diseño de pavimentos se muestran las diferencias al obtener los espesores de las capas del diseño, por lo que la conclusión es obvia.

Objetivos del trabajo:

Con mucha frecuencia los suelos disponibles para construcción, no pueden llenar los requisitos de resistencia e incompresibilidad, para su uso en terraplenes o subrasantes.

Existen muchos suelos que en sus estado natural no son adecuados para la construcción, por no reunir los requisitos especificados. En estos casos el ingeniero deberá tomar una de las tres decisiones siguientes:

- 1.- Aceptar el material tal y como está, y efectuar el diseño de acuerdo con las restricciones impuestas por la calidad del material.
- 2.- Remover y desechar el suelo del lugar, y sustituirlo por un suelo de características adecuadas.
- 3.- Alterar o cambiar las propiedades del material existente de tal manera que se obtenga un material que reúna en mejor forma los requisitos impuestos, o cuando menos que la calidad obtenida sea adecuada.

El proceso por el cual se mejora el suelo para que pueda alcanzar los requisitos fijados se llama estabilización. En su más amplio sentido, la estabilización incluye la compactación, el drenaje, la preconsolidación, y la protección de la superficie contra la erosión y la infiltración de la humedad. Sin embargo, al término estabilización se le va restringiendo gradualmente su alcance a un sólo aspecto del mejoramiento del suelo, la modificación del propio material del suelo.

Las propiedades de un suelo se pueden alterar de muchas formas como puede ser: por medios mecánicos, drenaje, medios eléctricos, cambios de temperatura o adición de agentes estabilizantes.

Debe tenerse siempre muy presente que debido a la gran variabilidad de los suelos, cada método resulta aplicable solamente a un número limitado de ellos. Por esta variabilidad que puede existir en unos cuantos metros, el método de estabilización utilizado puede no ser muy efectivo, por lo cual debe tenerse una clara apreciación de la propiedad o propiedades que deseen mejorarse, para así tomar la decisión correcta acerca del método de estabilización conveniente.

El modo de modificar y grado de modificación necesarios dependen del carácter del suelo y de sus deficiencias. En la mayoría de los casos se necesitan aumentar su resistencia.

El uso de la estabilización, no debe pensarse solamente como una medida correctiva sino también, como una medida preventiva o de seguridad contra condiciones adversas que se desarrollen durante la construcción o durante la vida de la estructura.

Los tres métodos mas comunes de estabilización en la práctica son: La adición de cemento, la adición de cal y la adición de productos asfálticos. Existen otros métodos especiales pero de aplicación restringida, ya sea por razones económicas o de orden práctico.

El desarrollo de éste trabajo está dedicado, para la investigación de los porcentajes de cal hidratada adecuados que deberán usarse para obtener las modificaciones óptimas de las propiedades de suelos finos, principalmente arcillas; por medio de estudios previos de mecánica de suelos. Así, cómo el efecto de la cal sobre dichos suelos. Los beneficios del empleo de cal hidratada como estabilizador en la construcción de caminos, carreteras, estacionamientos, bases para losas de cimentación, se podran comparar por medio de diseños con suelo natural y tratado. Así, como los beneficios económicos que esto trae.

Los principales materiales, métodos y sus aplicaciones típicas para estabilizaciones.

ADITIVOS PARA RETENER LA HUMEDAD:

La humedad en el suelo proporciona alguna cohesión en las arenas y limos por la tensión capilar y evita el polvo en todos los materiales. Evita la retracción y el agrietamiento en los suelos cohesivos y, por lo tanto reduce la desintegración que se produce a la primera lluvia que siga a un período de seca. Un ejemplo de este aditivo es la sal y el cloruro de calcio.

ADITIVOS RESISTENTES A LA HUMEDAD:

Ayuda a mantener el agua fuera del contacto con las partículas del suelo y evitan el ablandamiento, la expansión por recubrimiento de granos o adsorción preferente. Los más comúnmente usados son el $FR_{3,0,5}$ o Asfalto rebajado $FM_{30,5}$.

CEMENTACION:

Una gran variedad de agentes cementantes se emplean para cementar o ligar, éste método es el más exitoso usado en la estabilización.

Los beneficios son: el aumento de la resistencia por cohesión, reducción en la permeabilidad y cuando el agente cementante es relativamente rígido, puede aumentarse el módulo de elasticidad y disminuir la compresibilidad del suelo.

CEMENTACION CON ASFALTO:

La estabilización asfáltica tiene mayor uso en suelos arenosos, con poca o ninguna arcilla, como son las clases de arenas bien graduadas (SW), arenas mal graduadas (SP) y arenas limosas (SM), por lo que éstas se usan con frecuencia. Asfaltos rebajados $FR1$, $FR3$, FMI , $FM3$ y emulsiones asfálticas.

CEMENTACION QUÍMICA:

Consiste en unir las partículas del suelo con un agente cementante, que se produce con una reacción química dentro del suelo. La reacción química con las partículas del suelo: El ácido fosfórico actúa sobre los minerales arcillosos para formar fosfatos de aluminio. Los ácidos pueden reaccionar con los carbonatos, silicatos disolviéndolos y luego se precipitan y actúan como ligantes entre los granos del suelo.

CONGELACION:

Es equivalente a cementar con hielo. Se introducen en el suelo tubos coaxiales y por el tubo central se hace pasar un refrigerante a -18°C , que sale por el tubo exterior y enfria el suelo.

ESTABILIZACION MECANICA:

Es el mejoramiento del suelo por el cambio de graduación. Consiste generalmente en mezclar dos o más suelos naturales para obtener un material compuesto que sea superior a cualquiera de sus componentes, pero también incluye la adición de roca triturada o escoria o la tamización del suelo, para remover partículas de cierto tamaño. Se considera que está constituido por dos componentes el árido, que son las partículas más gruesas como el tamiz No 40 o el No 200 y el ligante. El árido proporciona la fricción interna y la incompresibilidad que son partículas fuertes y angulosas bien graduadas. El ligante proporciona la cohesión y la impermeabilidad; debe tener suficiente plasticidad para producir gran cohesión. Ejemplos los suelos arcillosos, (CL).

Las cantidades de áridos y desligantes determinan las propiedades del suelo estabilizado y compactado. 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 proyecto de una mezcla mecánicamente estabilizada es la determinación de la proporción que dará la ligación óptima.

ALTERACION FISICO-QUIMICA:

Consiste en cambiar las propiedades de los granos del suelo, principalmente de los minerales arcillosos y de su agua adsorbida. El cambio de iones o cambio de base, es el cambio de los cationes en la película de agua adsorbida. La plasticidad de las arcillas tiende a disminuir con el aumento de la valencia de los cationes con la adición en concentración suficiente de productos químicos con cationes de alta valencia, el suelo es forzado a cambiar, con el resultado de una disminución en la plasticidad. La cal y el cloruro de calcio suministran iones de calcio, con valencia dos, lo cual produce un mejoramiento significativo en las arcillas muy plásticas que tienen cationes de sodio o potasio.

La estabilización electroquímica implica un cambio de base producido por una corriente eléctrica. Los cationes de aluminio se desprenden de un electrodo positivo de aluminio y emigran en el suelo hacia el electrodo negativo, y en el curso de su movimiento se efectúa el cambio de base.

Los agentes dispersantes como el silicato de sodio y el polifosfato de sodio, aumentan la repulsión en las capas de agua adsorbida de la arcilla y hacen que el suelo adquiera una estructura dispersa u orientada. El límite líquido y el índice de plasticidad y la permeabilidad se reduce y se aumenta el peso específico máximo del suelo compactado. El procedimiento es poco costoso, la coagulación o conglomeración química produce un efecto opuesto al de la

dispersión, produciendo los efectos contrarios al de agentes dispersantes.

Alteración térmica Es la aplicación de un calor intenso para desecar el suelo y hasta producir una limitada fusión y cierta bitrificación, quedando permanentemente estabilizada la masa.

SUELO - CEMENTO:

Se ha utilizado como una norma general, el utilizar cementos portland para las arenas, que son suelos friccionantes no cohesivos y cal para las arcillas que son suelos cohesivos, inestables en presencia de agua.

Se emplea cemento portland para formar una mezcla como concreto en lugares áridos. Este tipo de estabilización ha tenido mucho éxito en la construcción de pavimentos debajo costo para tránsito ligero y como capas rígidas de base para tránsito pesado.

El objetivo es obtener la durabilidad y resistencias requeridas, donde la durabilidad es el factor que regula la cantidad mínima de cemento.

ESTABILIZACION CON CAL:

Este método se utiliza para estabilizar suelos finos en especial arcillas. Este aditivo, la cal, es efectivo con suelos de asentamiento de arcilla y agregados con los cuales reacciona tanto química como físicamente para producir material de calidad. La reacción química de cal con suelos arcillosos tienen dos aspectos: el primero que aglomera las partículas finas de arcilla en partículas gruesas desmenuzables, a través de un fenómeno llamado intercambio de base. Segundo, produce una definitiva cementación o acción de endurecimiento, en la cual la cal reacciona químicamente con la sílice disponible con alguna alúmina en el suelo raso formando silicato de calcio y aluminatos.

Una parte importante de los suelos con los que el ingeniero tiene que trabajar, corresponde a las arcillas, las cuales frecuentemente requieren de su estabilización con el objeto de incrementar su resistencia y disminuir su sensibilidad a cambios volumétricos debidos a cambios en el contenido de agua. El tratamiento de suelos arcillosos mediante la cal puede lograr estos objetivos obteniéndose varios efectos

Los productos obtenidos son permanentes, la resistencia impartida a la capa estabilizada ayuda a promover la durabilidad y una mayor vida a la obra.

Antes del advenimiento de la estabilización con cal, grandes masas de lodo carecían de valor en la pavimentación, generalmente eran extraídas y desperdiciadas. Hoy en día, con la cal, estos suelos altamente plásticos han sido mejorados y utilizados como sub bases requiriendo un abastecimiento limitado de agregados.

La capa estabilizadora de cal forma una barrera estabilizadora de cal, la cual impide su paso por gravedad de la parte de arriba, y de humedad capilar de abajo.

Propiedades potenciales de mejoramiento.

Para el proyecto de cualquier obra de ingeniería, es necesario conocer las propiedades de los materiales a utilizar en nuestro caso; el suelo, uno de los aspectos significativos de su comportamiento es la importancia de la fase de agua y el movimiento del agua a través del suelo.

Entre las principales propiedades del suelo que pueden interesar a un ingeniero podemos contar con las siguientes.

- 1.- Estabilidad volumétrica.
- 2.- Resistencia mecánica.
- 3.- Permeabilidad.
- 4.- Durabilidad.
- 5.- Compresibilidad.

Generalmente el terreno o zona a desarrollar, no suele ser ideal desde el punto de vista de la ingeniería de los suelos por sus propiedades inadecuadas. Existiendo tratamientos que pueden alterar las propiedades del suelo simultáneamente como puede ser: por medios mecánicos, drenaje, medios eléctricos, cambios de temperatura o adición de agentes estabilizantes, aunque aplicable a un número limitado de ellos.

La mejora del terreno se suele denominar frecuentemente estabilización que en su sentido más amplio, es la modificación de cualquiera de sus propiedades del suelo para mejorar su comportamiento ingenieril.

El modo de modificar y el grado de modificación necesarios dependen del carácter del suelo y de sus deficiencias. En la mayoría de los casos necesitan aumentar su resistencia como es el caso de subrasante de carreteras. La reducción de la compresibilidad se puede lograr llenando los poros, cementando los granos con un material rígido o cambiando las fuerzas del agua adsorbida por el mineral de una arcilla como es el caso de la cimentación de una estructura. La permeabilidad se puede reducir llenando los poros con un material impermeable o modificando la estructura del mineral de arcilla y de agua adsorbida para impedir la floculación como es el caso de la cimentación de presa; Se puede aumentar la permeabilidad quitando los granos finos creando una estructura conglomerada.

Si un suelo no es cohesivo, esto se puede lograr por confinamiento o dándole cohesión por medio de un cementador o ligante. Si es suelo cohesivo se puede aumentar la resistencia haciendo el suelo resistente a la humedad, alterando la película de agua adsorbida, aumentando la cohesión con un agente cementador y aumentando la fricción interna. La inmunidad a la retracción y a la expansión se puede lograr cementando, modificando la capacidad del mineral arcilloso para la adsorción de agua y haciendo un suelo resistente a los cambios de humedad. La mejora del terreno puede ser una solución provisional o permanente para mejorar el comportamiento final de la estructura.

Estabilidad volumétrica.

Muchos suelos se expanden y se contraen con los cambios de humedad los cuales se pueden presentar en forma rápida o acompañando a las variaciones estacionales. Si las presiones de expansión que se desarrollen debido a un incremento en la humedad no se controlan en la misma forma, éstas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, fracturar muros, romper tubos de drenaje, etc.. Por lo que es necesario detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado para evitar lo anterior descrito.

Contracción e hinchazón de la arcilla.

Contracción: Cuando una masa de tierra se seca hay un movimiento ascendente del agua. las etapas consecutivas de tal proceso se explican a continuación:

La masa de tierra se representa esquemáticamente como las paredes de los tubos (poros) llenos de agua, además éstas paredes están atravesadas por poros de diámetros menores por cuya razón pueden contraerse si se comprimen.

Al principio la masa de tierra se supone cubierta de agua. En éste momento la tensión superficial actúa sobre la superficie del agua y no tiene ninguna influencia sobre la masa de tierra. Debido a la acción de los agentes atmosféricos comienza la evaporación y luego de un cierto tiempo, el nivel de agua se iguala a la superficie de la tierra. Los meniscos son horizontales y aún no poseen fuerza ascendente, los pequeños poros atraviezan la masa de tierra, están todavía llenos de agua. El subsiguiente secado de la tierra puede dividirse en dos períodos que llamaremos primero y segundo.

Primer período: Por la succión de los agentes atmosféricos, los meniscos adquieren forma cóncava para reducir a un mínimo la superficie expuesta a causa de la curvatura, se desarrolla una tensión superficial oblicua. La componente vertical de ésta fuerza dirigida hacia arriba está equilibrada por la reacción vertical de apoyo dirigida hacia abajo. Esta última comprime las paredes y provoca la salida de agua de los pequeños poros, por lo cual, éstos últimos disminuyen de espesor y la pared se contrae. Al mismo tiempo la componente horizontal de la tensión superficial es equilibrada por la reacción horizontal de apoyo, la cual tiende acercar las paredes, pero los poros grandes, verticales todavía no se contraen. La cantidad de agua evaporada en el menisco es exactamente igual a la cantidad de humedad eliminada de los poros. El primer período de secado termina con la contracción vertical de la masa, la cual permanece saturada.

Segundo período: Sólo al final del primer período del proceso de secado, el menisco queda completamente desarrollado y ejerce todo su poder ascendente. El correspondiente esfuerzo de compresión no es suficiente para poder provocar una posterior deformación vertical de paredes y la contracción vertical cesa. El menisco se desplaza hacia abajo y los extremos de los pequeños poros quedan al descubierto. El esfuerzo de compresión que ejercen éstos pequeños poros mucho mayor que el ejercido por los poros mayores.

Al no ser ya posible la contracción vertical, la masa se contrae horizontalmente y se agrieta. La profundidad de las grietas puede ser insignificante, pero en algunos casos llega a decímetros, y hasta metros, según la resistencia del material a la tracción.

Durante el proceso de la retracción, los poros se hacen más pequeños y la tensión capilar potencial máxima aumenta.

Durante el proceso de secamiento y retracción la relación de vacíos disminuye y con ella ambas, la máxima tensión capilar y la resistencia a la compresión aumenta, aunque en diferentes proporciones. El suelo permanece saturado por que la pérdida de agua produce una reducción igual a relación de vacíos; sin embargo se llega a una relación de vacíos en que la máxima tensión capilar es igual a resistencia a la compresión. Si se continua secando el suelo no se reducirá más la relación de vacíos por que la resistencia a compresión es superior a la tensión capilar. En este punto, que se conoce como límite de retracción, cesa prácticamente la reducción de la relación de vacíos.

Hinchazón. El mecanismo más complicado que en el caso de la retracción y es causado por diferentes fenómenos: La recuperación elástica del grano del suelo, la atracción del agua por los minerales arcillosos, la repulsión eléctrica de las partículas de arcilla y de sus cationes adsorbidos de unos a otros y la expansión del aire atrapado en los poros del suelo. En los suelos que han sido precomprimidos por carga o retracción, probablemente contribuyen todos éstos fenómenos. En los suelos que nunca han sido precomprimidos los factores más importantes son probablemente, la atracción del agua por los minerales arcillosos y la repulsión eléctrica de las partículas de arcilla rodeadas por el agua.

La humedad en los suelos se puede presentar en dos formas: como la película de agua adsorbida que recubre los granos y como el agua libre que ocupa total o parcialmente los poros vacíos entre los granos.

Si el agua ocupa la totalidad de los poros, el suelo está saturado y se dice que la humedad tiene continuidad; si el agua ocupa parcialmente los poros la humedad es discontinua y forma cuñas de agua entre los granos adyacentes y una película de humedad al rededor de ellos.

Si hay afluencia de agua exterior, llenará fácilmente los poros de una masa de tierra que se estaba secando. En éste caso la tensión superficial se desplazará hacia la superficie libre del agua; las partículas de arcilla quedarán liberadas de tensión superficial y, por lo tanto, de compresión y se producirá la expansión de las mismas; la arcilla, colocada bajo agua se hincha y si no está confinada la masa se desintegra.

Actualmente las soluciones para evitar cambios volumétricos en suelos expansivos consiste en introducir humedad al suelo en forma periódica, aplicar cargas que equilibren la presión de expansión, utilizar membranas impermeables y apoyar la estructura a profundidades tales que no se registre variación estacional en la humedad. Otro medio podría consistir en modificar a la arcilla expansiva transformándola en una masa rígida o granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir. La presión expansiva interna de la arcilla, lo cual puede lograrse por medios químicos o térmicos. En éstos casos cuando la capa a estabilizar sea pequeña deberá tenerse en cuenta que el suelo subyacente es aún susceptible de expandirse, pero tales movimientos podrían tolerarse siempre y cuando la capa estabilizada se mueva en forma uniforme. Un medio más podría consistir en hacer que el agua se mueva más lentamente dentro de la masa expansiva mediante el sellado de sus poros o grietas.

Ultimamente se ha estado tratando de transformar a capas potentes de arcilla en una

masa rígida mediante la inyección de productos químicos, pero se ha tenido el problema de que dichos productos penetran poco a la masa arcillosa. Algunas veces se puede aumentar la impermeabilidad de un suelo y por ende reducir la velocidad de los cambios volumétricos en suelos expansivos compactándolos a pesos volumétricos altos, pero debe tenerse presente que la humedad de compactación juega también un papel muy importante en el fenómeno de los cambios volumétricos, pues si bien es cierto que una arcilla altamente densificada ofrece una alta impermeabilización.

Resistencia.

La resistencia a la deformación de un suelo o capacidad de carga o esfuerzo cortante de los suelos.

Esta propiedad potencial de mejoramiento es un problema de los suelos puede decirse que constituye uno de los puntos fundamentales de la mecánica de suelos.

La resistencia de los suelos es en general mas baja cuando estos se encuentran húmedos, la resistencia de los suelos cohesivos es de mucho más difícil determinación que los suelos friccionantes, pues en los primeros la estructura del suelo no puede adaptarse con suficiente flexibilidad a cualesquiera nuevas condiciones de esfuerzo que pueda presentarse; esto es debido, sobretodo, a la relativamente baja permeabilidad de estos suelos respecto a las arenas; ahora, el agua requiere períodos importantes de tiempo para movilizarse dentro de la masa de suelo. El análisis se hace más complejo al tomar en cuenta que las cantidades de agua movilizadas son ahora también mucho más importantes que en el caso de las arenas, por la compresibilidad relativamente grande, característica de los suelos cohesivos.

Los suelos arcillosos al secarse alcanzan grandes resistencias, teniéndose inclusive la condición más alta de resistencia cuando se calientan a temperaturas más elevadas como sucede en la fabricación de ladrillos y tabiques; a veces, la resistencia de un suelo es menos importantes que su deformabilidad bajo carga. En otras ocasiones se han presentado disminuciones considerables en la resistencia de un suelo arcilloso debido, por ejemplo a la disolución de cristales que conferían a la arcilla su resistencia, como sucede a algunas arcillas sensitivas donde se altera el equilibrio físico-químico en ellas.

De lo anterior se concluye que el estudiar los efectos de una estabilización, debe tenerse presente el fin que se busca, ya que si el suelo estabilizado permanecerá húmedo en las condiciones de trabajo, entonces la determinación de la resistencia bajo éstas circunstancias sería la adecuada, sin embargo si el suelo permanecerá seco y agrietado probablemente sea más efectivo efectuar pruebas con cargas repetidas para estudiar efectos de disgregación y pulverización.

Resulta muy difícil tratar de incrementar la resistencia de un suelo mediante la adición de agentes estabilizantes como los de materia orgánica del orden del 10 %. El incremento del peso volumétrico de un suelo orgánico mediante compactación se ha considerado, como un

incremento en la resistencia, pero existen algunas excepciones como por ejemplo: cuando se crean presiones de poro en exceso de la hidrostática.

Resulta un tanto evidente que los procedimientos que sirvan para mantener a un suelo sin que se produzcan cambios volumétricos son también adecuados para mantener la resistencia en el suelo, como lo es la adición de agentes que transformen a un suelo fino en una masa rígida o granular. Estos agentes pueden ser químicos o térmicos teniendo entre los primeros al cemento portland y cal como las más comunes.

Debe sin embargo, tenerse muy presente que en general el agua ablanda a suelos cohesivos, razón que obliga a que cuando se quiera tener una resistencia que permanezca con el tiempo en suelos arcillosos, se propicie el adecuado drenaje.

Algunas veces se requiere incrementar la resistencia a la deformación de un suelo o bien incrementar su capacidad de carga en forma temporal y se acude a procedimientos de electro-ósmosis.

La resistencia estructural de la arcilla depende de sus condiciones ambientales, el factor básico que gobierna la estabilidad química de los minerales de arcilla es el valor del potencial de hidrógeno (ph) que su carga intersticial. Así cualquier cambio que reduzca aquel, aumenta la velocidad de desintegración de los minerales y viceversa.

Otro factor que modifica la compresibilidad y la resistencia al esfuerzo cortante de las arcillas, es el de la precipitación de agentes cementantes químicamente estables, constituidos apartir de ciertos agentes químicos solubles, tales como materia orgánica, carbonatos, yeso, aluminio y compuestos de hierro que bajo ciertas condiciones dan lugar a los primeros; éstos cementantes poseen considerable resistencia. El efecto de ésta precipitación de cementantes ésta limitada a esforzar las ligas estructurales de arcilla, sin afectar a la arcilla misma.

Permeabilidad

Se dice que un material es permeable cuando contiene huecos o intersticios continuos. Todos los suelos y todas las rocas satisfacen ésta condición. Sin embargo, hay grandes diferencias en el grado de permeabilidad de los diferentes materiales terrosos. La cantidad de agua que pasa a través de una roca densa puede ser tan pequeña que se acumule en la cara expuesta; sin embargo, el paso del agua a través de éste material puede producir presiones de infiltración entre los granos minerales, que pueden ser tan grandes como las que se ejercen en los materiales más permeables, que estén bajo efecto de una carga hidráulica.

En los suelos la permeabilidad se plantea, en dos problemas básicos generalmente: La relación con la disipación de las presiones de poro y el flujo del agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos de terracerías y el flujo del agua puede originar tubificaciones y arrastres.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a características del agua circulante. Los principales factores son:

- 1.- La relación de vacíos de el suelo.
- 2.- La temperatura del agua.
- 3.- La estructura y estratificación del suelo.
- 4.- La existencia de agujeros, fisuras, etc., en el suelo.
- 5.- Grado de saturación .

El flujo del agua a través de medios porosos, está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Henry Darcy en 1856, el cual, investigó las características del flujo del agua a través de filtros, formados precisamente por materiales féreos.

En los suelos que tengan cohesión el efecto del tamaño de los granos es aún mas pronunciado, porque parte de la humedad del suelo que rodea las partículas finas de arcilla esta movilizada en las capas adsorbidas. La relación de vacíos es un factor en la mayoría de los suelos y la permeabilidad es aproximadamente proporcional a e^2 . La forma de los granos y la graduación son también importantes especialmente en los suelos más gruesos, pero se dificulta expresar sus efectos cuantitativamente. El grado de saturación es un factor principal, porque el aire en los poros reduce el área de la sección transversal y hasta que pueda llegar a obstruir completamente algunos poros. Los minerales arcillosos influyen grandemente en la permeabilidad de los suelos, porque aparte del agua adsorbida están fuertemente adheridas a la superficie de la arcilla, que no se puede mover de una partícula a otra sin gradientes muy altos. Por lo tanto la permeabilidad de una arcilla homogénea es corrientemente mucho menor que lo que sugieren independientemente el tamaño de los granos o la relación de vacíos. Además, la permeabilidad es prácticamente cero para gradientes bajos, pero aumenta conforme aumenta el gradiente.

En estudios realizados sobre la permeabilidad de arcillas se obtuvieron resultados en los que se denotó que la permeabilidad era mínima cuanto más cerca de la humedad óptima se encontraba el espécimen, mientras que por arriba de dicha humedad, se presenta un ligero incremento en la permeabilidad, mientras que por debajo de ésta disminuye. El ligero incremento de permeabilidad se debe a que al compactar al suelo, el agua de compactación llena espacios que ocupan las partículas cuando nos encontramos en el lado seco y esto hace que el suelo aunque se encuentre orientado, presente una mayor permeabilidad que cuando se le compactó con la humedad cercana a la óptima. Al incrementar la energía de compactación se obtuvo una permeabilidad todavía menor debido a que se tiene una mejor orientación de las partículas, a la vez que se cerraba más la estructura.

Si se compacta un suelo con humedades muy baja o prácticamente en seco, se obtendrá finalmente una alta permeabilidad en el suelo debido a los grumos que no se disgregan, resistiendo al esfuerzo de compactación y permitiendo con ello que se formen una gran cantidad de vacíos intersticiales. Mientras más alta sea la humedad de compactación se producirán menores permeabilidades en el suelo compactado ya que este tiene mayores oportunidades de deformarse, eliminándose así grandes vacíos.

Se puede reducir la permeabilidad de un suelo mediante la inyección de lechadas: sin embargo, debido a que éstos productos, no sellan perfectamente a los poros finos, solamente

se logra disminuir el gasto y la velocidad del flujo sin lograr una impermeabilidad adecuada de algunos defloculantes como el polifosfato, pueden sellar perfectamente a un suelo. En la actualidad se cuenta también con algunos aditivos líquidos y emulsiones que al penetrar en el suelo se adhieren a las paredes de los conductos capilares haciendo que el suelo sea parcialmente hidrofóbico pero hay que tener en cuenta que los productos "hidrofobos" generalmente hacen que la cohesión del suelo, se reduzca parcial o totalmente

El control del movimiento de la humedad en un suelo establece una interesante paradoja, la cual consiste, en que ciertas circunstancias una zona arenosa altamente permeable puede funcionar como una zona completamente impermeable, si subyace a una arcilla ya que destruye los efectos de succión en esta.

Los métodos de estabilización para modificar la permeabilidad de un suelo, no necesariamente mejoran su estabilidad volumétrica o resistencia mecánica, y en algunos casos pueden inclusive resultar contraproducentes en éstos aspectos.

Durabilidad

Al igual que con todos los materiales de construcción, una condición muy deseable en los suelos estabilizados es la durabilidad definida como la resistencia a los procesos de intemperización, erosión y abrasión. La durabilidad en caminos está relacionada con las capas superficiales de los pavimentos en la formación de baches o disgregaciones, erosiones en los taludes, cortes y cambios en la textura de los agregados en las carpetas. Ocasionalmente, sin embargo, se presentan erosiones profundas internas en los terraplenes o cortes debido no sólo a una baja durabilidad si no también a una alta permeabilidad. Desde luego que una baja durabilidad tiene una alta repercusión en el costo de mantenimiento, más que en fallas estructurales por consideración. En los suelos estabilizados la durabilidad baja se debe en general a un diseño deficiente que puede tener su origen en la elección de un estabilizante inadecuado, por ejemplo, cuando se aplica la cal hidratada con algún tipo de arcilla con la cual no reacciona favorablemente; también puede deberse a una cantidad insuficiente de estabilizante o a una resistencia inadecuada contra los ataques del agua o agentes químicos, por ejemplo, los suelos arcillosos estabilizados con cemento en zonas salinas.

Actualmente, una deficiencia importante en los estudios de las estabilizaciones es la carencia de pruebas adecuadas para estudiar la durabilidad. Las pruebas de intemperismo a veces no son adecuadas para el estudio de agregados para pavimentos por no reproducirse en forma eficiente a que estarán sujetos. En las pruebas con aplicación con efectos cíclicos, no se tiene aún, una correlación precisa entre el tránsito y las pruebas en que se somete a los especímenes a efectos de secado y humedecimiento que son más bien orden cualitativo que cuantitativo. La durabilidad es pues uno de los efectos más buenos de cuantificar y la reacción común ha sido la de sobrediseñar, lo cual a veces puede no ser correcto. La resistencia a los efectos de tránsito puede mejorarse mucho mediante la estabilización, pero existen problemas

como por ejemplo la formación de polvo suelto en caminos revestidos, en donde es difícil tener una solución económica. En zonas en donde se quiere evitar la formación de polvo que fácilmente se levanten con la acción del viento como lo es el caso del área que circunda a las aeropistas se aplican soluciones temporales mediante riegos asfálticos o de hules, sales o cloruro de calcio. Algunas otras veces se puede lograr estabilizaciones más permanentes como podría ser la aplicación de riegos de sello o bien el incremento de vegetación.

Compresibilidad

Los cambios en volumen o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades ingenieriles de los suelos, pues se modifica la permeabilidad, se alterarán las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del esfuerzo cortante y se provocan desplazamientos.

La compresión de un estrato de suelo no ocurre bruscamente; al contrario, a menudo es tan lenta que cuesta trabajo creer que se está produciendo un asentamiento. Edificios en Chicago se han estado asentando por 50 años y la torre inclinada de Pisa (1174), todavía se está moviendo.

El asentamiento empieza rápidamente a medida que pasa el tiempo.

La compresibilidad de un suelo puede presentar variaciones importantes dependiendo de algunos factores tales como la relación de la carga aplicada respecto a la que el suelo soportaba anteriormente, tiempo de aplicación de la carga una vez que se ha disipado la presión de poro en exceso de la hidrostática, naturaleza química del líquido intersticial, aunados éstos factores a los originados por el muestreo, sensibilidad del suelo y aún la forma de ejecutar las pruebas que se utilizan para estudiar la consolidación.

Al observar los depósitos de materiales muy suaves situados en el fondo de una masa de agua, por ejemplo, un lago se nota que el suelo reduce su volumen conforme pasa el tiempo y aumentan las cargas por sedimentación sucesiva. A un proceso de disminución de volumen, que tenga lugar en un lapso, provocado por un aumento de las cargas sobre el suelo, se llama proceso de consolidación.

Es un tanto obvio que al remoldear el suelo se modifica su compresibilidad, por lo que ésta característica se puede modificar mediante procedimientos de compactación, y la humedad de compactación es de gran importancia en la compresibilidad de suelos compactados.

Las características de la consolidación de los estratos de arcilla pueden investigarse cuantitativamente con aproximación razonable, realizando la prueba de consolidación unidimensional sobre especímenes representativos del suelo, extraídos en forma tan inalterada como sea posible. Se puede así calcular a la magnitud y la velocidad de los asentamientos

probables debidos a las cargas aplicadas. La prueba es la de consolidación unidimensional, y una vez aplicados los incrementos de carga se tienen valores para constituir una gráfica en cuyas abscisas se ponen los valores de la presión actuante, en escala natural o logarítmica y en cuyas ordenadas se anotan los correspondientes de la relación de vacíos en escala logarítmica éstas curvas se llaman de compresibilidad y de ellas se obtienen una en cada prueba de consolidación.

La compresión del suelo no es un proceso elástico reversible; el suelo una vez comprimido tiende a permanecer así, aunque los esfuerzos que produjeron la compresión hayan desaparecido.

La pendiente de la curva es una medida de la compresibilidad del suelo o de la deformación relativa. Cuando se representa en la forma de esfuerzo-deformación se le denomina coeficiente de compresibilidad volumétrica, m_v , porque si no se produce movimiento lateral, la deformación vertical es igual a la deformación.

Por otra parte es posible tener una liga entre el cambio de la relación de vacíos y el cambio de volumen de un elemento de suelo sujeto a prueba; nótese que puesto que área del elemento es unitaria, el cambio de volumen del elemento resulta medido por el cambio de altura.

Se define ahora el coeficiente de compresibilidad, valor que depende de la presión actuante sobre el suelo. Mide la razón de la relación de vacíos con la presión; un coeficiente alto caracteriza un suelo muy compresible mientras que uno bajo es propio de un suelo no susceptible de grandes cambios de volumen, cuando aumenta la presión.

RESEÑA HISTORICA

A través del tiempo, se fueron conociendo los diferentes tipos de suelos y cómo eran afectados con la humedad. De aquí surge la necesidad de contrarrestar los efectos que el agua causaba. Así, por dicha necesidad se han llevado a cabo estudios y se ha encontrado que el mejoramiento de las propiedades ayuda al desarrollo ingenieril sobre los suelos.

El suelo, el material natural de construcción más abundante, ha sido usado por el hombre para los trabajos de la ingeniería desde el principio de la historia.

Los conceptos básicos de mejoramiento, compactación de suelos, cementación, reforzamiento, drenaje, en seco y por temperatura fueron desarrollados desde hace cientos miles de años y permanecen sin modificación. Con el advenimiento de las máquinas siglo XIX, resulta un gran crecimiento en la calidad y cantidad de trabajo a diferencia del que estaba hecho.

El desarrollo de métodos vibratorios para mejoramiento de suelos de bajas cohesiones son tan buenos como una variedad de métodos: Inyección y lechada que se han adicionado a las técnicas aprovechables. Este reporte se concentra en varios tipos de problemas de suelos y varios métodos para su mejoramiento.

Las referencias han sido seleccionadas para proveer más información detallada, casos históricos y orígenes.

Las primeras civilizaciones fueron caracterizadas por el esfuerzo constante del hombre para mejorar el ambiente en el cual vivía. Este fue el resultado del esfuerzo: La construcción de muchos trabajos públicos y privados, los cuales fueron colocados sobre suelos o materiales terrosos. Como las cargas se incrementaron los materiales de cimentación cobraron más importancia; la importancia de la humedad del suelo ha sido más patentizada que las primeras construcciones. Ahora el control de la humedad es una práctica estándar en la ingeniería geotécnica y forma parte central de muchos tipos de métodos de estabilizaciones de suelos.

Las civilizaciones antiguas utilizaron suelos en las construcciones de cementerios que consistían en montones de tierra; estructuras para cultos religiosos; construcciones de viviendas; canales y zanjas para el transporte de agua, veredas y caminos para viajes y comercio; fortificaciones para defensa. Muchos de esos usos requirieron el control de la humedad del suelo en alguna manera y también la compactación del suelo. El progreso dependió de simples pruebas y errores cometidos. Los conocimientos fueron pasados de generación en generación.

El Dschou-Li, un libro sobre las costumbres de la dinastía China, escrita hace 3000 años antes de cristo, contienen instrucciones sobre la construcción de caminos y puentes. Las instrucciones son dadas para la provisión de drenaje de aguas superficiales sobre los caminos de recorrido. El camino más viejo en el mundo "El Royal Road" requirió superficies duras capaces de soportar cargas concentradas.

TIEMPO DE LOS ROMANOS.

En la época del imperio romano, ellos extendieron su poder, los ingenieros construyeron

estructuras pesadas requiriendo de gran cuidado del diseño de cimentaciones y terraplenes. Los conocimientos empíricos y habilidades estaban remarcadas considerando que los ingenieros estaban basados en mayor parte, por su experiencia .

En una discusión, en el libro dos, de sus diez libros de arquitectura Vitruvius escribe :La extensa variedad de propiedades del suelo, la importancia de la fase del agua en los suelos, también fue reconocida y con mucho énfasis en las áreas pantanosas. En el libro octavo, referente a cimentaciones para muros de defensa, templos, y otras estructuras masivas, Vitruvius recomienda que las cimentaciones de éstos trabajos sean excavadas en un sitio sólido si puede encontrarse, una base sólida. Si no puede ser encontrada una cimentación sólida y el sitio es blando, exactamente abajo y pantanoso, entonces debe excavarse y aclararse y reconstruirse con pilas y serán trabajadas al mismo tiempo por medio de maquinaria y los espacios entre ellas serán rellenos.

Los mismos problemas de la ingeniería geotécnica de hoy son los mismos que los de la romana.

EDAD MEDIA

Con la caída del imperio romano, se llegó a una desorganización y decaimiento de la ingeniería. La comunicación y el comercio decayeron a un muy bajo nivel, resultando la deteriorización de caminos, puentes y diques, la facilidad de drenajes y por tres siglos muchos viajes fueron a pie y cabalgando. Las únicas estructuras de ingeniería construidas fueron fortificaciones y edificios religiosos.

Las fortificaciones trabajos de defensa, impusieron cargas pesadas sobre los suelos cimentados, y ambas, La fuerza ala cimentación y el asentamiento fueron de gran importancia para los ingenieros. Muchos de esas ciudades amuralladas y castillos, son presentados en existencia en buenas condiciones.

Las estructuras religiosas consistían de grandes catedrales y torres de campanas, las catedrales masivas tenían una carga grande estructural sobre áreas grandes, y los campanarios tenían grandes cargas sobre áreas pequeñas. Ellas estaban adyacentes una a la otra. El resultado fueron los grandes asentamientos diferenciales el cual resultó que se inclinaron las torres de los campanarios de las catedrales. Los asentamientos de las catedrales fueron muy grandes a través de los siglos, y a veces se excedió a 5 pies. Uno de los pocos ejemplos son: Los campanarios de san jorge en Zaragoza y por supuesto la torre de pisa.

En el siglo XVI, los individualistas tales como Miguel ángel, Bramante, y Leonardo Da vinci, estaban activos en construcción de fortificaciones, puentes, trabajos de irrigación y puertos. Ellos y otros ingenieros de éste período fueron guiados más por conocimientos y experiencia a través de los siglos, que por consideración de leyes científicas y físicas.

Los siglos XVII pueden ser considerados como período transitivo en la ingeniería de cimentaciones.

PERIODO COLONIAL

Durante este tiempo la ciencia de la ingeniería de cimentaciones fue lenta en Europa; Francia emprendió un programa de trabajo público extenso empezando en 1661 el cual incluyó

• la construcción de carreteras y canales.

La construcción de un sistema de fortificación para las orillas de Francia, fue empezado en 1667 bajo las ordenes del Ing. Marquis Sebastian Leprestre de Vauban. Las reglas de Vauban para la medición de muros de contención de los más delgados fueron muy completas que se llevo a creer, que estaban basados sobre una teoría de presión de la tierra. El trabajo de Vauban reconoció la importancia del agua en el suelo y se provisionó para subdrenaje. El uso del drenaje superficial y subterráneo fue muy común en trabajos de ingeniería durante este período.

La primera escuela de ingeniería en Europa fue la Ecole Desponts Et Chawsses establecida en París EN 1747.

Los ingenieros fueron educados en los principios de conocimientos en ese tiempo, física, matemáticas y mecánica para la construcción de carreteras, puentes, puertos, canales y estructuras de retención.

En el tiempo de la revolución Americana, la importancia de la humedad del suelo sobre la fuerza de las masas de suelo fue reconocida pero no entendida de una manera científica. El principal interés fue proveer de los ingenieros civiles, sistemas subterráneos, usualmente zanjas con rocas, remover agua de los suelos y la condición de superficies de drenaje para remover la superficie de agua y prevenir la infiltración hacia la masa de suelo. Donde las condiciones de las cimentaciones eran encontradas también los suelos eran removidos y reemplazadas con piedras o pilas que eran manejadas para cimentaciones firmes.

El primer siglo Americano 1776 a 1876

Después de la revolución Americana y la formación de un gobierno estable ocurrió una gran expansión de la población, industria y el comercio. Muchos ingenieros civiles construyeron caminos, canales y puertos. Muchas estructuras residenciales y comerciales eran ligeras e imponían pequeñas cargas y la construcción de edificios eran evitadas en áreas pobres o pantanos.

• Apesar de los drenajes superficiales, los caminos eran muy inseguros pues llegaban a ser mares de lodo en los períodos de lluvia. En la época de 1800 la construcción de caminos fue reconocida como una profesión y como el mayor problema al igual que hoy, fue un drenaje adecuado. Algunas personalidades como Thomas Telford y John Loudon Mcadam construían sus caminos utilizando sus teorías de drenaje. Estas teorías eran muy en general y a veces muy inciertas. Esto despertó un gran interés en la construcción de sistemas de vías de aguas internas para superar desventajas climáticas de los sistemas de caminos empleados anteriormente. Dos de los mejores sistemas interiores de canales fueron construidos uno en New York y otro en Pensilvania. Los sistemas de canales encontraron un número considerable de deslizamientos en los taludes.

• Coulomb estableció una teoría de muros de retención, la cual fue una de las primeras referencias para conocer la presión hidrostática. Se propuso después un sistema de subdrenajes.

Durante este mismo período Alejandro Colin estudió la acción de los derrumbes o deslizamientos y vio que las fallas habían ocurrido en cada caso por que las fuerzas de gravedad excedían de las fuerzas de resistencia aplicadas por la intensidad de láminas de arcilla y que la razón de las fallas ocurrían después de la construcción a veces varios años después, esto fue

debido a una reducción en la intensidad en las láminas de arcilla. El razonó que la pérdida en la intensidad de las láminas fue debido a la acción del agua o humedad en la arcilla.

Segundo Siglo Americano 1876 a 1976.

El segundo siglo de la existencia de los Estados Unidos fue marcado con el avance fenomenal en la ingeniería de cimentaciones. La importancia de la fase del agua en suelo llegó a establecerse con intensidad y también los problemas de asentamiento. Esta propuesta llevó a la ingeniería de cimentaciones al desarrollo de pruebas para suelos para determinar sus propiedades físicas.

En los años de 1920s, el mayor avance en mecánica de suelos fue la compactación de los terraplenes de vías férreas. El uso de equipo de compactación pesados resulto en problemas; cuando el suelo era muy seco, los asentamientos podían ocurrir durante los periodos de lluvia; cuando el suelo era muy húmedo el equipo de compactación llegaba a hundirse y las fallas ocurrirían. Una simple prueba fue usada para la construcción. Esta prueba empírica o no científica fue un método de control de humedad efectivo y lo llevó al desarrollo de las pruebas equivalentes de humedad en el campo.

Durante éste período había incrementado la conciencia de los ingenieros por la necesidad de medir y estudiar las propiedades físicas de los suelos, ya que algunas obras ponían en peligro la seguridad pública. En 1911, Atterberg propuso las simples pruebas de límites líquidos, plásticos y contracción para clasificar los suelos. En los 1880s la humedad del suelo se reportó en porcentajes del suelo. En éste tiempo el diseño en construcción de subdrenes y vías férreas era extensamente desarrollado.

Un interesante ejemplo de un sistema de subdrén profundo fue sobre wooster pike cerca de cleveland construido sobre una arcilla blanca expansiva en 1893.

Este camino sirvió al tráfico por muchos años.

A través de los años hasta hoy se hicieron grandes estudios sobre las propiedades de la arcilla, como la permeabilidad, la consolidación por Terzagí, drenes de arena, control de la humedad para la compactación, etc.

La fase de agua en el sistema suelo-agua-aire tiene una influencia enorme en las propiedades ingenieriles del sistema. Con un muestreo inteligente y programas de pruebas es posible hoy construir muchas estructuras ingenieriles grandes sobre suelos con peligros pequeños de falla, sin embargo, el control de la fase del agua es siempre de principal interés.

Todas éstas consideraciones han resultado en el desarrollo de numerosos métodos para estabilización y mejoramiento de suelos.