



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

EL USO DE LA CAL EN LA ESTABILIZACION
DE LOS SUELOS

TESIS

Que para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL

presenta

ADRIAN JESUS GONZALEZ BADILLO

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA
EXAMENES PROFESIONALES
60-1-24

Al Pasante señor ADRIAN JESUS GONZALEZ BADILLO,
P a e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Ing. Rosendo Ortiz Peñón, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Inge-
niero CIVIL.

"EL USO DE LA CAL EN LA ESTABILIZACION DE LOS
SUELOS"

- I. Introducción.
- II. Agentes más comunes en la estabilización de los suelos.
- III. Criterios generales para elegir un agente es-
tabilizante.
- IV. La estabilización con cal.
- V. Diseño de pavimentos.
- VI. Procedimiento constructivo.
- VII. Comparación entre pavimentos con y sin capas es-
tabilizadas.
- VIII. Conclusiones.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá pres-
tar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Ser-
vicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visi-
ble de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo rea-
lizado.

Atentamente
"POR MI BATA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cd. Universidad, 29 de agosto de 1960
EL DIRECTOR

ING. JAVIER TIMENZ IZQUIERDO

33E/0711/60

I N D I C E .

| CAPITULO | | PAGINA. |
|----------|---|----------|
| I | Introducción. | 1-3 |
| II | Agentes más comunes en la estabiliza <u>ción</u> de los suelos. | 4-30 |
| III | Criterios generales para elegir un agente estabilizante. | 31-74 |
| IV | La estabilización con cal. | 75-107 |
| V | Diseño de pavimentos. | 108-127 |
| VI | Procedimiento constructivo. | 128-144 |
| VII | Comparación entre pavimentos con y sin capas estabilizadas. | 145-172 |
| VIII | Conclusiones. | 173-174 |
| | Bibliografía. | 175-176. |

CAPITULO I

Introducción:

-Antecedentes históricos.

-Descripción del trabajo a desarrollar.

La cal como material de construcción es uno de los más antiguos, probablemente antecedido solo por la piedra y el barro.

En documentos de alrededor del año 4000 A.C. se menciona su empleo en enyesados para las pirámides de Egipto, también Plinio cita su uso en la construcción del Templo de Apolo y Elis en el año 450 A.C. La muralla China fue asentada con mortero de cal.

Sin embargo, fueron los romanos quienes realmente desarrollaron sus diversas aplicaciones, Vitruvius (Ingeniero militar a las órdenes de Julio César) escribió las primeras especificaciones para el uso de la cal como mortero, pasta para enyesados interiores y exteriores y en la construcción de caminos como la famosa Vía Apia (contiene cal en tres de sus cuatro niveles) que ha resistido por más de 2000 años.

La mayor contribución de los romanos fue el descubrimiento de la reacción de la mezcla de cal viva, agregados y ceniza volcánica bajo el agua, esta característica hidráulica resultaría en el desarrollo del Cemento Romano o Cal Hidráulica elaborada con cal y puzolanas, de este modo, los romanos usaron esta mezcla como mortero para construir losas, pilares, pavimentos y otras estructuras de concreto.

Con la caída del Imperio Romano gran parte de su tecnología se perdió con lo cual la cal cayó en desuso.

Durante la edad media y el renacimiento se empleó nuevamente para enyesados, base para murales y morteros de albañilería. Fue hasta el siglo XIX cuando el mortero de cal fue substituido por los morteros de cemento Portland.

En la actualidad su empleo es muy amplio, se aplica en diques y terraplenes, estabilización de canales de riego, aeropistas, carreteras, cimentaciones, en mezcla con cemento para evitar el fraguado relámpago y mezcla con asfalto para evitar escases de finos.

Durante el desarrollo de este trabajo se proporcionaran los elementos fundamentales para conocer y aplicar la cal en trabajos de ingeniería, se citarán los agentes comúnmente usados para estabilizar un suelo; su obtención, su campo de aplicación y conveniencia de ser aplicado. Se tratará con mayor detalle la estabilización con cal, el efecto que tiene en los suelos y las pruebas más empleadas para determinar la cantidad de cal así como para cuantificar sus efectos. Se diseñarán diversos pavimentos, se mencionará el procedimiento constructivo del pavimento y se establecerá una comparación entre estos pavimentos con capas estabilizadas y pavimentos de estructura tradicional.

CAPITULO 11

AGENTES MAS COMUNES EN LA ESTABILIZACION DE LOS SUELOS

11.1. Cemento Portland.

11.2. Productos asfálticos:

- a) Cemento asfáltico, asfalto fluidificado (Cutback).
- b) Emulsiones asfálticas: aniónicas y catiónicas.
- c) Asfalto rebajado.

11.3. Cal.

11.4. Otros productos químicos.

11.1. CEMENTO PORTLAND.

En el sentido general de la palabra, el cemento puede describirse como material de propiedades cohesivas, lo cual le da la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto, esta definición abarca una gran variedad de materiales cementantes.

Los principales componentes del cemento empleado en la Ingeniería Civil son los de cal, es decir, se trabaja con cementos calcareos; los cementos tienen la propiedad de fraguar y endurecen en presencia del agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ella, por esta particularidad se denominan cementos hidráulicos.

El nombre de Cemento Portland, concebido originalmente debido a la semejanza de color y calidad entre el cemento fraguado y la piedra de Portland (una roca caliza obtenida de una cantera en Dorset), se ha conservado hasta nuestros días para describir un cemento compuesto por sílice, alumina y óxidos de fierro; los principales compuestos de un Cemento Portland se citan a continuación:

| <u>Compuesto</u> | <u>Expresión Química</u> | <u>Porcentaje</u> |
|------------------------------|---|-------------------|
| Silicato tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | 42.00 |
| Silicato dicálcico | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | 34.00 |
| Alumino ferrito tetracálcico | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 9.50 |
| Aluminato tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | 6.70 |
| Otros | | <u>7.8</u> |
| | | <u>100.00</u> |

El método de fabricación del cemento puede ser tanto en húmedo como en seco.

Consideremos inicialmente el proceso húmedo. Cuando se emplea marga, este material se tritura finamente y se dispersa en agua en un molino de lavado, el cual es un pozo circular con brazos revolventes radiales con rastrillos, los que rompen los aglomerados de materias sólidas. La arcilla también se tritura y se mezcla con agua, generalmente

en un molino de lavado semejante al anterior. En seguida se bombean las dos mezclas de tal forma que se mezclen en proporciones determinadas y pasen a través de una serie de cribas, llegando finalmente la lechada a tanques de almacenamiento.

Cuando se emplea caliza esta debe barrenarse, triturarse, generalmente en dos trituradoras (una más pequeña que la otra) y luego depositarse en un molino de bolas con la arcilla dispersa en agua. Allí se continúa el molido de la caliza hasta el grado de finura de la harina y la lechada resultante se bombea a estanques de almacenamiento. De aquí en adelante, el proceso es el mismo, sin importar la naturaleza original de las materias primas.

La lechada es un líquido de consistencia cremosa, con un contenido de agua entre un 35 y un 50 por ciento y sólo una pequeña fracción del material (alrededor de dos por ciento) es mayor que el diámetro de la malla de 90 μm B.S. (No. 170). Generalmente hay varios tanques en los cuales se almacena la lechada; la sedimentación de los sólidos suspendidos se impide mediante agitación mecánica o por burbujeo de aire comprimido. El contenido de cal de la lechada está determinado por la proporción de materiales calcáreos o arcillosos originales, tal como se ha mencionado anteriormente. Un ajuste final para obtener la composición química requerida puede efectuarse mezclando lechadas de diferentes tanques de almacenamiento, utilizando a veces un sistema complicado de tanques de mezcla.

Finalmente la lechada con el contenido de cal descado pasa a un horno rotatorio, el cual es un cilindro de acero de gran tamaño, recubierto de material refractario, con diámetro interior hasta de 5.00 metros y una longitud que a veces alcanza 150.00 metros, el cual gira lentamente alrededor de su eje, levemente inclinado hacia la horizontal. La lechada se deposita en el extremo superior del horno, mientras que se añade carbón pulverizado mediante la insuflación de un chorro de aire en el extremo inferior, donde la temperatura alcanza de 1400 a 1500°C. El carbón que no debe tener un contenido demasiado alto de cenizas,

merece una mención especial, puesto que se consumen hasta 350 kilogramos para fabricar una tonelada de cemento, en lugar de carbón se puede emplear petróleo o gas natural.

Cuando la lechada desciende dentro del horno, encuentra progresivamente mayores temperaturas. Primero se elimina el agua y se libera el CO_2 ; posteriormente el material seco sufre una serie de reacciones químicas hasta que finalmente, en la parte más caliente del horno, un 20 a 30 por ciento del material se vuelve líquido y la cal, el sílice y la alúmina vuelven a combinarse. Después la masa se funde en bolas de diámetros que varían entre 3 y 25 milímetros, conocidas como clinker. El clinker cae dentro de enfriadores de diferentes tipos que a menudo favorecen un intercambio de calor con el aire que después se usa para la combustión del carbón pulverizado. Un horno de grandes dimensiones puede producir más de 700 toneladas de cemento al día.

El clinker frío, que es característicamente negro, reluciente y duro, se mezcla con yeso para evitar un fraguado relámpago del cemento. La mezcla se efectúa en un molino de bolas compuesto por diversos compartimientos, los cuales tienen bolas de acero cada vez más pequeñas. En algunas plantas se emplea un sistema de circuito cerrado de mezcla donde el cemento descargado por el molino pasa a través de un separador y las partículas finas se trasladan a un silo de almacenamiento por medio de una corriente de aire, mientras que las partículas mayores vuelven a pasar por el molino. El circuito cerrado de mezcla evita la producción de una gran cantidad de material excesivamente fino o de una pequeña cantidad de material demasiado grueso, fallas que a menudo se presentan en sistemas de molienda.

Una vez que el cemento se ha mezclado satisfactoriamente cuando alcanza a tener hasta 1.1×10^{12} partículas por kilogramo, está en condiciones para empacarse en los conocidos sacos de papel, en tambores o para transporte a granel.

En los procesos seco y semisecho, las materias primas se trituran y adicionan en las proporciones correctas en un molino de mezclado, donde se secan y se reduce su tamaño a un polvo fino. El polvo seco, llamado grano molido crudo, se bombea al silo de mezclado y se hace un ajuste final en la proporción de los materiales requeridos para la manufactura del cemento. Para obtener una mezcla íntima y uniforme, se mezcla el grano crudo, generalmente mediante aire comprimido, induciendo un movimiento ascendente del polvo y reduciendo su densidad aparente. El aire se bombea por turnos sobre cada cuadrante del silo y esto permite al material aparentemente más pesado de los cuadrantes no aireados, moverse lateralmente hacia el cuadrante aireado.

De este modo, el material aireado tiende a comportarse como un líquido y, por aireado sucesivo de todos los cuadrantes (se completa en un período de alrededor de una hora) se obtiene una mezcla uniforme.

El grano molido y mezclado se pasa por una malla la que se deposita en una cuba rotativa llamada granulador. Simultáneamente se agrega agua en una cantidad correspondiente a un 12 por ciento del peso del grano molido adicionado. De esta forma, se obtienen pastillas duras de alrededor de 15 milímetros de diámetro interior. Esto es conveniente, si se introdujera directamente el polvo en el horno, se impediría el flujo de aire y el intercambio de calor necesarios para las reacciones químicas de la formación de clinker del cemento.

Las pastillas se hornean en una rejilla de precalentamiento, mediante gases calientes del horno hasta endurecer. En seguida, las pastillas se meten al horno y las operaciones posteriores son las mismas que en el proceso de fabricación en húmedo. Sin embargo, como el contenido de humedad de las pastillas es solo del 12 por ciento, comparado con el 40 por ciento de la lechada empleada en el proceso húmedo, el horno en el proceso seco tiene dimensiones considerablemente menores, la cantidad de calor requerida es mucho más baja, puesto que hay que eliminar alrededor de un 12 por ciento de humedad, aunque ya se ha utilizado previamente calor adicional para remover la humedad original de

las materias primas (generalmente del 6 al 10 por ciento). El proceso es por lo tanto bastante económico, pero sólo si las materias primas están relativamente secas. En tal caso, el consumo total de carbón puede ser tan pequeño como 100 kilogramos por tonelada de cemento.

Las dificultades de control del mezclado seco han impedido hasta tiempos recientes un uso más amplio de este tipo de proceso. Sin embargo, se ha utilizado en Estados Unidos y Alemania. En diversos países se utilizan pequeños hornos verticales, en los cuales se producen hasta 150 toneladas de cemento al día.

Debe explicarse que una mezcla minuciosa de materias primas es necesaria debido a que una parte de las reacciones que ocurren en el horno debe producirse por difusión de materiales sólidos, lo cual requiere una distribución adecuada del material para asegurar la uniformidad del producto.

Existen otros procesos de fabricación del cemento que no se mencionan por no estar al alcance de este trabajo.

11.2. PRODUCTOS ASFÁLTICOS.

En líneas generales llamamos asfalto a determinadas sustancias de color obscuro que pueden ser líquidas, semisólidas o sólidas, compuestas esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono en su mayor parte y procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos de petróleo por destilación o extracción y cuyas propiedades físicas y químicas los hacen aptos para multitud de aplicaciones de diverso tipo.

Los datos existentes identifican al asfalto como uno de los más antiguos agentes estabilizantes empleados por el hombre, ya que tenemos conocimiento de su uso alrededor del año 3,800 A. de C. en Mesopotamia. A partir de este momento tan remoto, las referencias de su empleo se repiten a través de todas las civilizaciones hasta nuestros días.

El asfalto que se conoció primero y se empleó usualmente hasta época muy próxima a nosotros es el natural, es decir, el asfalto que se muestra en la naturaleza en forma de yacimiento y que puede explotarse sin dificultad y sin empleo de operaciones industriales.

En época relativamente reciente comenzó la explotación de los pozos de petróleo de todo el mundo y la destilación del material obtenido, dividiéndolo en diversos productos de aplicaciones específicas y obteniéndose como residuo de esta destilación, el asfalto; cuyo uso se extendió entonces con mayor facilidad.

a) Cemento asfáltico, asfalto fluidificado (Cutback).

No todos los petróleos crudos contienen asfalto y los que contienen es en cantidades variables. Los crudos de petróleo se dividen fundamentalmente en dos grupos: crudos asfálticos y crudos parafínicos.

Los crudos asfálticos son como su propio nombre indica, los más adecuados para la obtención del asfalto. La proporción de este material obtenido de estos crudos pueden variar según su origen, pero la calidad del asfalto obtenido es siempre satisfactoria; hay que observar que la calidad de un asfalto depende en gran manera del crudo de que se ha extraído, de tal forma que existe una verdadera producción especializada en crudos de petróleo para la obtención de asfaltos para aplicaciones determinadas.

Los crudos parafínicos no contienen asfaltos en cantidades apreciables y la calidad del que contienen no suele permitir su aprovechamiento directo. A veces, cuando no se dispone de otro crudo para la obtención del asfalto, se recurre al tratamiento de crudos parafínicos mediante procesos de soplado que permiten la obtención de asfaltos de calidad escasamente satisfactoria, cuyo costo resulta forzosamente mucho más elevado que el de los asfaltos obtenidos por destilación directa de crudos adecuados.

La destilación del petróleo para obtener el asfalto se realiza, usualmente en instalaciones como la representada esquemáticamente a continuación (Figura 11.1.)

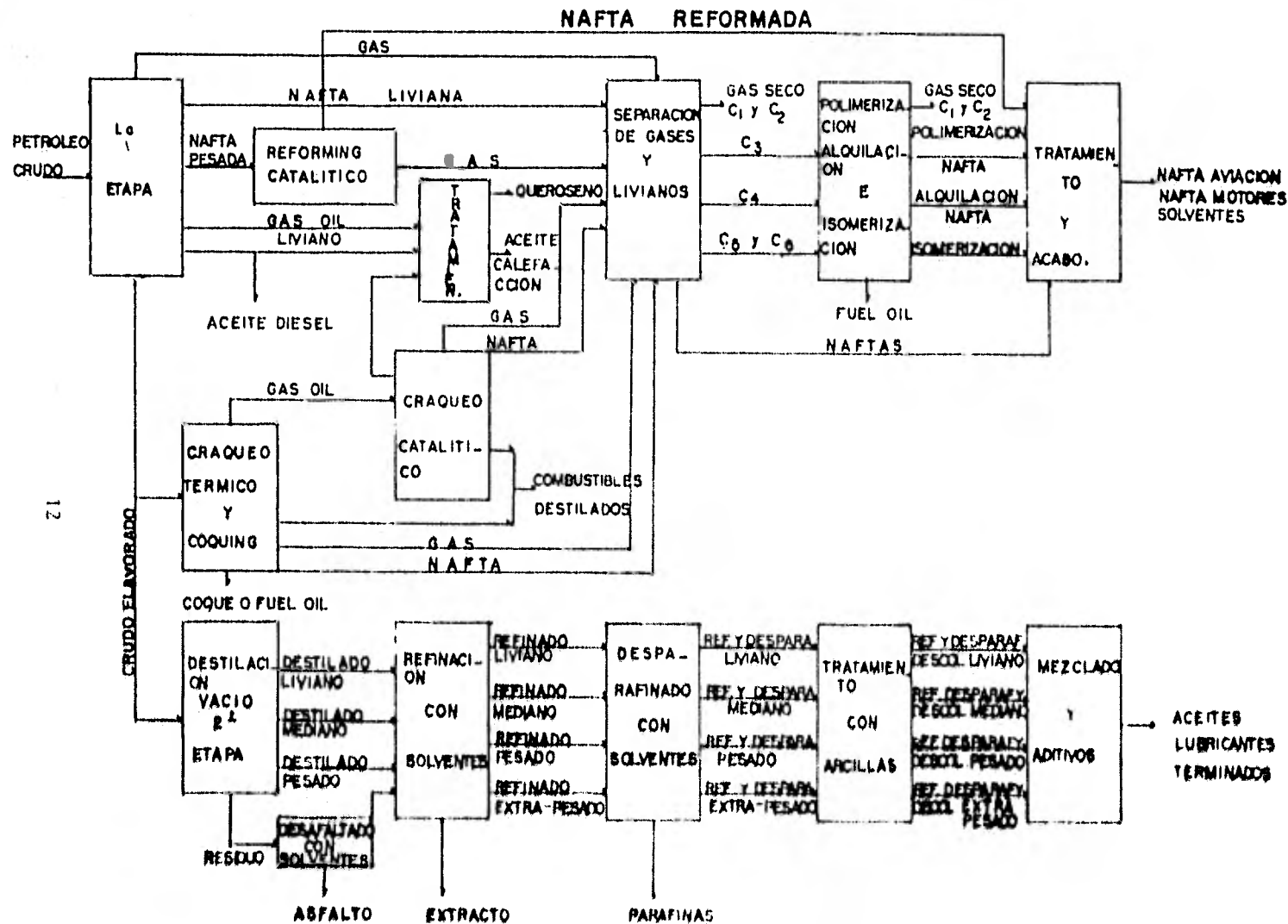
Obtención del cemento asfáltico: El petróleo crudo se hace circular a gran presión y velocidad por una tubería situada en el interior de un horno que alcanza temperaturas elevadas, el petróleo así calentado se introduce en la torre de destilación en la que se separa en sus distintos componentes que se clasifican, de abajo a arriba en orden de densidad decreciente, de forma que mientras por la parte superior de la torre, se obtienen gases y gasolina, en la parte inferior se acumula asfalto, que es el residuo de la destilación.

La destilación puede realizarse a presión atmosférica o al vacío y generalmente, tiene lugar en varias etapas que permiten una mejor clasificación de los productos obtenidos.

A veces se destila un crudo con alto contenido de asfalto con la finalidad de que este reúna determinadas características, considerando como residuos el resto de los productos, que requerirán un tratamiento posterior para ser utilizables.

En otras ocasiones, el asfalto es sólo un producto secundario de una destilación llevada de forma que sean otros los productos que resulten con características determinadas, de tal manera que el asfalto requiera un tratamiento ulterior.

Hay ocasiones en que se desea eliminar de un crudo o de una fracción destilada el asfalto que contiene, por ser indeseable para determinados fines (por ejemplo, fabricación de aceites lubricantes) y se recurre al tratamiento del crudo o de una fracción de éste con propano líquido en el cual se disuelven todos los componentes del petróleo excepto los asfálticos, que se precipitan y separan.



12

FIGURA II.1.

OBTENCION DEL ASFALTO A PARTIR DEL PETROLEO CRUDO

b) Emulsiones asfálticas: aniónicas y catiónicas.

Se llama emulsión a un sistema compuesto de dos líquidos inmiscibles de los que uno se dispersa en el otro en forma de gotas diminutas, se llama al primero fase dispersa y al segundo fase continua.

En las emulsiones asfálticas las dos fases en presencia son agua y asfalto, si se agitan asfalto fundido y agua caliente, se obtiene una emulsión inestable que solo dura lo que la agitación. Tan pronto como cesa ésta las partículas de asfalto se unen unas a otras, formando una masa continua separada del agua. Para lograr emulsiones estables es necesario introducir en el sistema un tercer componente, el emulgente, que se concentra en la capa interfacial de ambos componentes, modificando las propiedades del conjunto y haciendo estable la emulsión. Evidentemente, cada sistema de dos líquidos inmiscibles puede dar dos emulsiones de tipo completamente distinto, según sea una u otra la fase dispersa.

Casi todas las emulsiones constan de una fase acuosa o polar y otra oleosa o no polar, los dos tipos fundamentales de emulsión suelen denominarse aceite en agua (o/w) y agua en aceite (w/o).

Es conveniente aclarar el término de polaridad antes mencionado, por su dificultad de definición tan solo diremos que son cuerpos polares los que tienen mayor tendencia a disolverse en agua que en benceno y los no polares o apolares los que presentan las características inversas.

Los diversos emulgentes empleados en la fabricación de emulsiones pueden dividirse en tres grupos:

- a) electrólitos
- b) materiales coloidales
- c) sólidos reducidos a polvo muy fino

Los materiales empleados con mayor frecuencia en la manufactura de emulsiones asfálticas son los del segundo grupo. La emulsión asfáltica se compone de un cuerpo polar, el agua, y de otro no polar, el asfalto. Los emulgentes de tipo coloidal se caracterizan porque su molécula se compone de una parte polar que tiende a disolverse en el agua y de otra no polar que tiende a disolverse en el asfalto; de este modo, las moléculas del emulgente se fijan en la superficie de los globulos de asfalto, impidiendo que entren en contacto entre sí y se unan.

A continuación definiremos las emulsiones aniónicas y catiónicas: las emulsiones aniónicas son aquellas en que las partículas de asfalto están cargadas negativamente, por lo que presentan afinidad por las superficies cargadas positivamente.

Los emulgentes empleados normalmente en la fabricación de emulsiones aniónicas de asfalto son oleatos o resinas de sosa o de potasa u otros jabones de tipo similar; cuando el asfalto empleado contiene una elevada proporción de ácidos nafténicos pueden fabricarse emulsiones aniónicas utilizando como emulgente los jabones formados por los ácidos nafténicos del asfalto con un álcali.

Las emulsiones catiónicas son aquellas en que las partículas de asfalto están cargadas positivamente, por lo que presentan afinidad por los cuerpos cargados negativamente.

Los emulgentes más frecuentemente usados en la fabricación de emulsiones catiónicas son las sales cuaternarias de amonio.

Para fabricar emulsiones asfálticas basta con mezclar en circunstancias adecuadas asfalto, agua y emulgentes. Es condición necesaria que la viscosidad del asfalto en el momento de la mezcla sea suficientemente baja para permitir su dispersión en gotas microscópicas; para ello se le calienta previamente a unos 100°C.

Las sustancias emulgentes cuando son necesarias, o el álcali en caso contrario, se añaden normalmente al agua; a veces se añaden al asfalto pero se presenta el inconveniente de que al calentar el asfalto se produce espuma que dificulta el trabajo.

El agua con los emulgentes o el álcali se mezcla enérgicamente con el asfalto, para lo cual puede recurrirse simplemente a agitadores de paletas o emplear molinos coloidales, los que son dispositivos en los que se somete a enérgico esfuerzo cortante a la mezcla de asfalto, agua y emulgente, obligándola a pasar a través de ranuras u orificios muy estrechos; normalmente los molinos coloidales tienen paredes dobles por cuyo interior circula vapor u otro fluido caliente para mantener el conjunto a temperatura adecuada.

Las emulsiones aniónicas se clasifican en distintos tipos según su estabilidad, es decir, su resistencia a la rotura, que se determina en general por la cantidad de asfalto que coagula al mezclar la emulsión con una solución de cloruro cálcico, esta es una prueba comunmente empleada para este fin.

Se emplea normalmente en la construcción de carreteras tres tipos llamados de rotura lenta, media y rápida, se designan estos tres tipos por las letras ss,ms y rs (iniciales de las expresiones inglesas slow setting, medium setting y rapid setting), aparte de estos tres tipos se emplean otros especiales en los que se obtiene una estabilidad adicional mediante el empleo de determinados electrólitos y otros cuerpos, obteniendo propiedades diversas en cuanto a rotura, impermeabilidad de las mezclas, etc.

La rapidez de rotura de las emulsiones catiónicas no es susceptible de regulación, pues la rotura se produce siempre inmediatamente al contacto con los agregados pétreos, esto presenta el inconveniente de que es imposible emplear emulsiones catiónicas de asfalto puro para la elaboración de mezclas, pues al producirse la rotura en los primeros momentos de mezclado, queda el asfalto en presencia

de los restantes elementos de la mezcla y es imposible continuar el proceso para lograr una buena distribución del cementante en toda la masa de la mezcla.

Por otra parte, las excelentes propiedades de las emulsiones catiónicas hacían muy deseable su empleo en la elaboración de mezclas y se llegó a la solución, actualmente generalizada, de fabricar emulsiones catiónicas, no de cemento asfáltico, sino de cutback, de este modo una vez rota la emulsión, el producto resultante es suficientemente fluido para hacer posibles las operaciones de mezclado.

Estas emulsiones pueden fabricarse con cutbacks de los tipos normales, pero generalmente se emplea cutbacks de viscosidades muy elevadas, los empleados usualmente sólo contienen un 10 por ciento de disolvente de tipo keroseno o gas-oil.

c) Asfalto rebajado.

Este producto es el resultado de combinar gasolinas, kerosinas o diesel con cemento asfáltico, dando origen esta mezcla a los asfaltos rebajados de fraguado rápido, medio y lento respectivamente.

11.3. DEFINICION Y PROPIEDADES DE LA CAL *

Antes de una definición de las características físicas y químicas de la cal, es apropiado comenzar por definir cal, es el primer derivado en la manufactura de las calizas. Muchas de las siguientes definiciones son repetidas y se traslapan, pero estos términos son empleados ampliamente en la industria y entre sus consumidores:

Cal para la agricultura. Lleva granos gruesos, es una forma de cal hidratada sin refinar, es principalmente usada para neutralizar los ácidos y para problemas donde no sea necesario que la cal sea pura y uniforme.

*Ver apéndice 11.1. Obtención de la cal.

Cal aireada. Contiene proporciones variables de óxidos, hidróxidos y carbonatos de calcio y magnesio quienes resultan del prolongado contacto con el aire de la cal viva. Es una prolongada descomposición de la cal viva que ha comenzado a hidratarse y carbonatarse.

Cal de autoclave. Es una forma especial de cal dolomítica altamente hidratada, empleada principalmente para propósitos estructurales, que ha sido hidratada bajo presión en un autoclave.

Cal disponible. Representa la totalidad de cal libre (Ca O) contenida en una cal viva o hidratada y es la parte activa de una cal. Representa un intento por cuantificar la concentración de cal.

Cal para construcción. Puede ser cal viva o hidratada (usualmente implica la segunda), cuyas características físicas la hacen conveniente para propósitos estructurales.

Cal-carburo. Es un desecho de la cal hidratada, producto de la generación de acetileno del carburo de calcio y puede usarse como un lodo húmedo o polvo seco de muy variables grado de pureza y granulometría. Es de color gris y posee un penetrante olor de acetileno.

Cal química. Es una cal viva o hidratada que es empleada para una o más de sus muchas aplicaciones químicas e industriales. Generalmente tiene una alta pureza química.

Cal hidratada. Es un polvo seco obtenido por la hidratación de la cal viva con agua hasta satisfacer su afinidad química, formando un hidróxido debido a su combinación química con ésta. Puede ser principalmente de calcio, magnesio, dolomítica o hidráulica.

Cal hidráulica hidratada. Es una forma químicamente impura de la cal con propiedades hidráulicas de límite variable, contiene apreciables cantidades de silicato, alúmina y generalmente algo de acero químicamente combinado con la cal. Es empleada generalmente para propósitos estructurales.

Cal. Es un término general que implica únicamente una forma de cal calcinada, generalmente cal viva, pero puede también referirse a la cal hidratada o hidráulica. Puede ser de calcio, de magnesio o dolomítica. Este término no puede ser aplicado a rocas calcáreas o cualquier forma carbonatada de cal.

Lechada de cal. Es una forma de cal hidratada en suspensión acuosa que contiene considerable agua libre.

Cal viva. Es óxido de calcio formado por la calcinación de calizas que liberan dióxido de carbono. Puede ser principalmente de calcio, magnesio o dolomita y de diversos grados de pureza.

Cal romana. Es sinónimo de cal hidratada, pero más impura y de tipo más hidráulico.

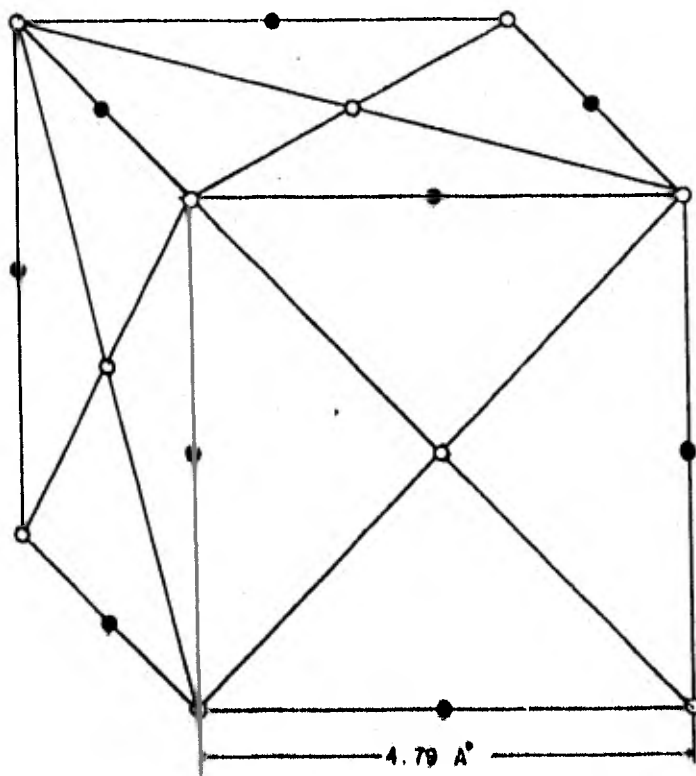
Propiedades físicas de la cal viva:

Color. Generalmente la cal viva es blanca con diversos grados de intensidad, dependiendo de su pureza química. El tipo más puro de la cal viva será el más blanco. Otras menos puras o inadecuadamente calcinada puede tener un ligero color gris ceniza, piel de ante o casi amarillento. La cal viva es invariablemente blanca por derivarse de la caliza.

Olor. Tiene un débil aunque característico olor que es difícil definir, excepto que es ligeramente "terroso" y aroma penetrante, aunque no ofensivo.

Textura. Todas las cales vivas son cristalinas, pero los conglomerados cristalinos varían bastante en tamaño y espacio entre sus matrices. Algunas parecen ser amorfas pero tienen estructuras microcristalinas.

Estructura cristalina. La difracción con rayos X revelan un cristal puro de óxido de calcio en un sistema como el mostrado en la Figura II,1. Las aristas del cubo miden 4.797 Å, con los átomos de calcio localizados en medio.



○ = Ca
● = O

Figura II.1r Estructura cristalino de oxido de calcio

El óxido de magnesio posee el mismo enrejado cúbico cristalino del óxido de calcio, excepto que el cristal de Mg O es ligeramente menor y más denso, con aristas de 4.203 Å. Esto explica la ligeramente mayor densidad promedio de la cal viva dolomítica.

Porosidad-densidad. El grado de porosidad de una cal viva comercial varía ampliamente en porcentaje de espacio poroso de 18 a 48 por ciento, con un promedio del 35 por ciento, dependiendo de la estructura de la caliza, temperatura e intensidad de calcinación. Dolomitas inertes han disminuido su porosidad de 8 a 12 por ciento.

Gravedad específica. La verdadera gravedad específica de un óxido de calcio puro es 3.34, pero se presupone cero porosidad, una condición que es imposible llevar a la práctica. Han sido reportados valores de 3.40 y menos, pero 3.34 parece ser un promedio generalmente aceptado. Cales comerciales tienen un intervalo más bajo que 3.0; óxidos dolomíticos puros pueden tener un intervalo tan alto como 3.5 a 3.6.

La aparente gravedad específica varía igualmente de 1.6 a 2.8. Valores promedio de óxidos comerciales son de 2.0 a 2.2. Cales de dolomitas tienen un promedio sobre el 3 a 4 por ciento más que el mayor.

Dureza. La cal viva dolomítica varía entre 3 y 4 en la Escala de Moh. La cal viva común es variable pero generalmente entre 3 y 2. La misma amplia divergencia en la dureza y resistencia de las calizas es manifiesta en sus derivados, las cales.

Resistividad eléctrica. Han sido calculados 71×10^8 ohms/cm a 15°C disminuyendo a 91 ohms/cm a 1466°C. La presencia de nitrógeno disminuye estos valores.

Luminescencia. Todos los óxidos de cal son muy luminiscentes a altas temperaturas en el intervalo de calcinación de 900°C y más altos, de donde se origina el término "cal brillante"

Angulo de reposo. Hay algunas diferencias en valores con diferentes cales vivas y con diferentes granulometrías y graduaciones, pero 50 a 55° para tamaños de gravilla, es una razonable medida promedio para su cuantificación.

Propiedades físicas de la cal hidratada:

Color. Todas las cales hidratadas secas, excepto aquellas que son totalmente impuras, son extremadamente claras en color, invariablemente más blancas que la cal viva de su origen. Sobrecargando de cal viva pueden producir un tenue color amarillento en la cal hidratada resultante. Manchas negras de partículas de cuarzo son simplemente impurezas, generalmente silicatos.

Por separado, los cristales de hidróxidos puros son limpios e incoloros.

Olor. Existe un aroma similar a una cal viva.

Textura. Se encuentra como un polvo fino. La finura varía en tamaño, pero puede ser de microcristalina o tamaño coloidal (submicron). Por esta razón, mucha gente equivocadamente se refiere a algunas variedades de cales hidratadas como amorfas. Pero los rayos X revelan una estructura cristalina definida, patrón uniforme hasta en el más finamente hidratado. Partículas hidratadas de cuarzo son claramente cristalinas en apariencia.

Estructura cristalina. Es un cristal de forma de plato hexagonal o prisma con base perfectamente hendida, la partícula física es de tamaño variable, pues los microscópicos conglomerados cristalinos varían en algunos grados, la estructura se muestra en la Figura 11.2.

Gravedad específica. El intervalo en la gravedad específica para dife-

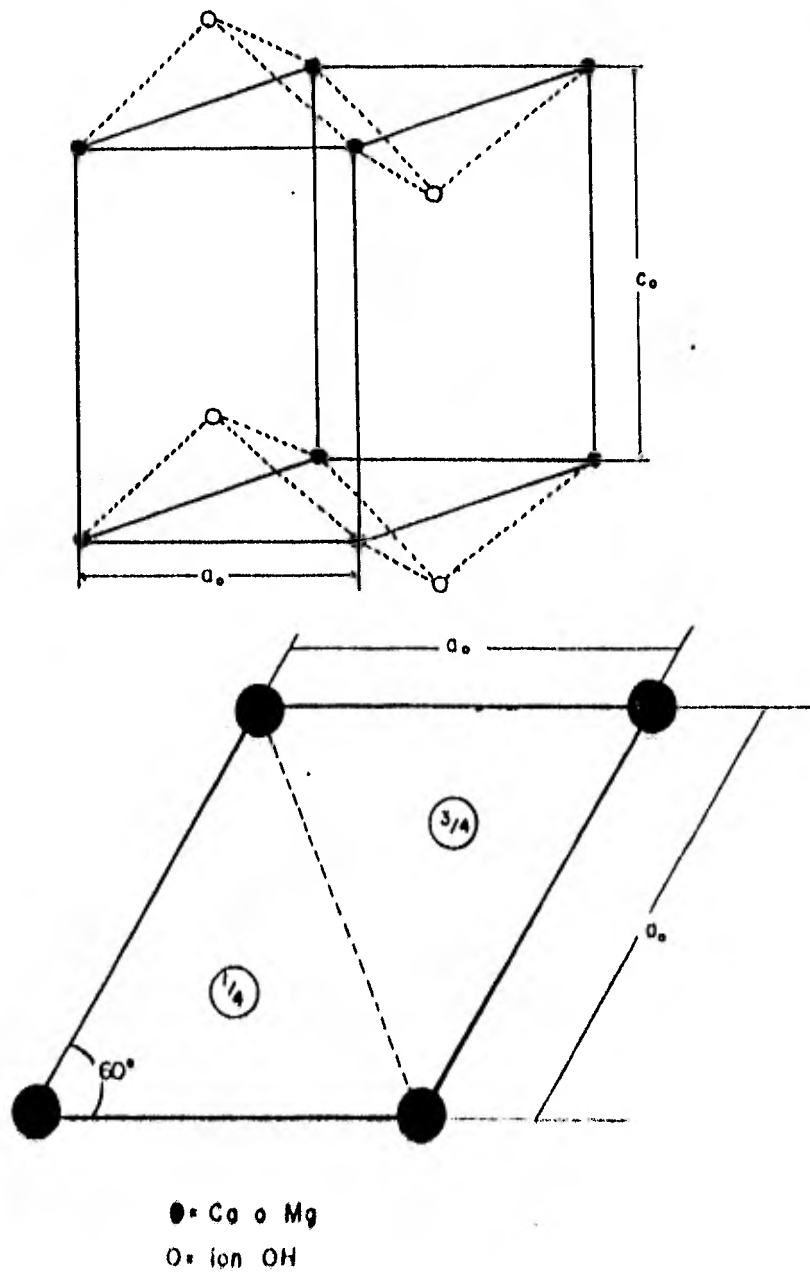


Figura II.2-Estructura cristalina de hidroxido de calcio

rentes cales hidratadas comerciales son como sigue:

| | |
|--------------------------------|-----------|
| Calcio | 2.3 - 2.4 |
| Dolomita altamente hidratada | 2.4 - 2.6 |
| Dolomita normalmente hidratada | 2.7 - 2.9 |

Los últimos contienen del 25 a 35 por ciento de óxido de magnesio en promedio.

Dureza. Es un valor intermedio entre 2 y 3 en la Escala de Moh, se han reportado valores promedio de 2.5 en cristales puros de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Angulo de reposo. Hay un amplio rango de ángulos de reposo para diversas cales hidratadas comerciales, dependiendo de su granulometría, contenido de la mezcla, grado de aireación y particularmente de la amplitud de su carga electrostática. Puede variar de 15 a 80°, pero 70° es considerada el más común por algunas autoridades.

Estas propiedades físicas no son todas las que pueden ser estudiadas en las cales pero no siendo el propósito de este trabajo se han mencionado las más importantes desde el punto de vista ingenieril.

Propiedades químicas de las cales (viva o hidratada).

En la siguiente tabla se definen los porcentajes gravimétricos de los principales constituyentes de las cales, tanto sus elementos como sus compuestos.

| Tipo de cal | Porcentaje elemento | | | | Porcentaje compuesto | | | |
|--|---------------------|-------|-------|------|----------------------|--------|--------|---------------------------------|
| | Ca | Mg | O | H | H ₂ O | Ca O | Mg O | Oxido alcalino (Ca O + Mg O) |
| Ca O | 71.47 | | 28.53 | | | 100.00 | | 100.00 |
| Ca (OH) ₂ | 54.09 | | 43.19 | 2.72 | 24.31 | 75.69 | | 75.69 |
| Mg O | | 60.39 | 39.68 | | | | 100.00 | 100.00 |
| Mg (OH) ₂ | | 41.69 | 54.85 | 3.46 | 30.88 | | 69.12 | 69.12 |
| CaO, MgO | 41.58 | 25.23 | 33.19 | | | 58.17 | 41.83 | 100.00 |
| Ca (OH) ₂ , Mg O | 35.03 | 21.26 | 41.95 | 1.76 | 15.75 | 49.01 | 35.24 | 84.25 |
| Ca (OH) ₂ , Mg(OH) ₂ | 30.27 | 18.56 | 48.33 | 3.04 | 27.21 | 47.35 | 30.44 | 77.79 |

Estabilidad. Ambas cales son compuestos estables, aunque no necesariamente tan estables como su roca calcárea de origen. La cal viva es estable a cualquier temperatura, es vulnerable únicamente al agua, la humedad en el aire produce efectos de inestabilidad (apagado de la cal); reaccionará químicamente con ácidos, compuestos químicos y elementos que originarán diversos compuestos de calcio y magnesio.

La cal hidratada es aún más estable, puesto que el agua no causara un cambio químico en su composición. El único compuesto que compromete su estabilidad es el bióxido de carbono (CO_2), por quien posee una fuerte afinidad en sus concentraciones diluidas. Reacciona en forma parecida a la cal viva con otros compuestos químicos y elementos. Sin embargo, la cal hidratada se descompondra y regresara a $\text{Ca O} + \text{H}_2 \text{O}$ cuando sea sujeta a temperaturas sobre los 540°C .

Cales de tipo dolomítico son ligeramente más estables que las de calcio por ello no absorbera agua o CO_2 tan rápidamente. Dolomitas inertes son totalmente estables bajo mayor número de condiciones excepto para la lenta actividad de fuertes concentraciones de ácidos.

Poder desecante. Por ser la cal tan higroscópica es un efectivo desecador, absorbiendo humedad del aire o removiendo agua como líquido o vapor de solventes de hidrocarburos clorados, alcoholes y aldehídos. Su capacidad de absorción es de por lo menos del 24.3 por ciento de su propio peso. Su intervalo de absorción varía ampliamente dependiendo de su actividad química y la concentración de agua o vapor. La variación de la capacidad de absorción de agua de una cal viva dolomítica es mucho menor que una de calcio.

Acidez. El pH de una solución $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 25°C puede ser cuantificado, estos datos son mostrados en la siguiente tabla:

| <u>Ca O g/l</u> | <u>pH</u> |
|-----------------|-----------|
| 0.064 | 11.27 |
| 0.065 | 11.28 |
| 0.122 | 11.54 |
| 0.164 | 11.66 |
| 0.271 | 11.89 |
| 0.462 | 12.10 |
| 0.680 | 12.29 |
| 0.710 | 12.31 |
| 0.975 | 12.44 |
| 1.027 | 12.47 |
| 1.160 | 12.53 |

La anterior tabla indica que el aumento de una pequeña cantidad de óxido de calcio a agua destilada causa un rápido incremento en el pH de un 7 (neutral) a 11. De aquí que el aumento en el pH es gradual. Una solución saturada al 50 por ciento de Ca O incrementa ligeramente su acidez antes de alcanzar la saturación. La temperatura es un factor limitante en los aumentos de acidez, en temperatura que reduzca la solubilidad decrecera el pH en concentraciones solubles fraccionales. En forma parecida, el valor pH bajo los 25°C son ligeramente mayores que a alta temperatura, probablemente como una solución saturada asciende a un pH de 13 a 0°C. Debido a su muy baja solubilidad, Mg (OH)₂ posee un pH máximo de únicamente 10.5, la cal dolomítica es igual a Ca (OH)₂.

Silicato y Alúmina. La cal reacciona con las formas disponibles de silicato y alúmina si bien sus reacciones son completadas totalmente, no hay un completo acuerdo sobre este fenómeno.

Se combinan estos elementos con los sistemas de calces Ca O-Si O₂-Al₂O₃; Ca O-SiO₂ y CaO-Al₂O₃ en varios grados y formas a altas temperaturas (1200 a 2800°F) sin la presencia de humedad. En estos sistemas, pero debilmente con Al₂O₃, la cal se combinará lentamente a temperatu-

ra ambiental con compactación y bajo condiciones de saturación. Estas reacciones son grandemente aceleradas por presiones de 10 a 75° atmosféricos y/o elevada temperatura (200 a 500°F) que convertirá la humedad a energía. Presión y/o calor pueden reducir el tiempo de reacción de meses a horas.

Las reacciones químicas que tienen lugar con el silicato de las arcillas (kaolinita, montmorilonitas, illitas, etc.) serán tratadas más ampliamente cuando veamos en detalle la influencia de la cal en los suelos estabilizados.

11.4. OTROS PRODUCTOS QUÍMICOS.

En la siguiente exposición se tratarán someramente algunos agentes químicos empleados en la estabilización de suelos, en la inteligencia de que su utilización es mucho menos frecuente que el del cemento, el asfalto, la cal o la estabilización mecánica.

Acido fosfórico y fosfatos.

La estabilización con estos productos está en gran parte en la fase experimental y es probable que nunca pase de ella, puesto que lo investigado hasta el momento indica que estos productos han de entrar en porcentajes similares a los que se requieren de cemento o de cal y su precio es varias veces mayor.

Parece ser que la ventaja más importante de estos estabilizantes está en los buenos resultados que se obtienen con cloritas, ante las que el cemento y la cal rinden resultados más erráticos. También se ha dicho que el ácido fosfórico tiene una considerable y benéfica acción en el peso volumétrico seco de mezcla a que se llega. Las ventajas anteriores parecen señalar a estos estabilizantes una particular ventaja en los suelos jóvenes de origen volcánico.

Los estabilizantes fosfóricos limitan su acción a suelos ácidos y no son efectivos en los alcalinos, en los limos, ni en las arenas. Esto se debe a que el ácido fosfórico debe atacar a las retículas arcillo-

sas para captar el aluminio y precipitar un fosfato hidratado de aluminio. Otra dificultad de estos estabilizantes está en su manipulación, que es difícil aunque en general no son sustancias tóxicas.

Resinas y polímeros.

Son cadenas muy largas de moléculas formadas por unión de componentes orgánicos, a los que se denomina monómeros. Los polímeros naturales tienen la forma de resinas. La incorporación de polímeros a los suelos se hace de dos maneras; o se añaden los monómeros junto con un sistema catalizador que produce la polimerización posterior o el polímero se añade ya formado, sólido, en solución o emulsión.

El vinsol es la resina que más frecuentemente se ha utilizado como estabilizante, sobre todo en Europa. Los resultados que con ella se han obtenido son variables, pero alentadores; su acción se circunscribe a la de estabilizante de la mezcla ante la acción del agua, esta es en general la reacción de todas las resinas y polímeros.

Los contenidos de resinas y polímeros fluctúan normalmente entre 1 y 2 por ciento y únicamente pueden usarse con suelos ácidos, otra desventaja importante del producto es su degradación bacteriana, que limita su vida útil.

Se ha hecho muy poco trabajo de investigación respecto a la posibilidad de incorporar las resinas a los polímeros en tiras, armando el suelo, los polímeros pueden ser catiónicos, aniónicos y no iónicos. Los catiónicos poseen cargas positivas que crean nexos eléctricos muy fuertes con las cargas negativas de las partículas de arcilla o de las arenas finas silíceas; por este mecanismo pueden aumentar la resistencia del suelo. Desgraciadamente este efecto aumenta mucho la resistencia de la mezcla a ser compactada, también son productos difíciles de mezclar por la pequeña proporción en que intervienen y de costo alto.

Los polímeros aniónicos tienen la misma carga eléctrica que los minerales de arcilla, por lo que su incorporación más bien tiende a disminu-

nir la resistencia de los suelos tratados; correspondientemente favorecen la compactación. La efectividad de estos productos es muy variable, según el tipo de suelo y su utilización probablemente se justifica pocas veces, considerando que la sal común, mucho más barata, puede ser tan o más efectiva.

Los polímeros no iónicos generan nexos de hidrógeno importantes entre las partículas de arcilla, asociando sus grupos OH con el oxígeno de aquéllas.

Cloruro de sodio y cloruro de calcio.

Frecuentemente se ha usado el cloruro de sodio como un estabilizante de acción no muy durable o como ayuda en la superficie de deslizamiento contra el polvo.

El cloruro de sodio es efectivo en todos los suelos, aunque mucho menos en los que contienen materia orgánica. Su efecto estriba en producir reacciones coloidales y en alterar las características del agua contenida en el suelo. Normalmente actúa como floculante y desde este punto de vista suele ayudar en la compactación.

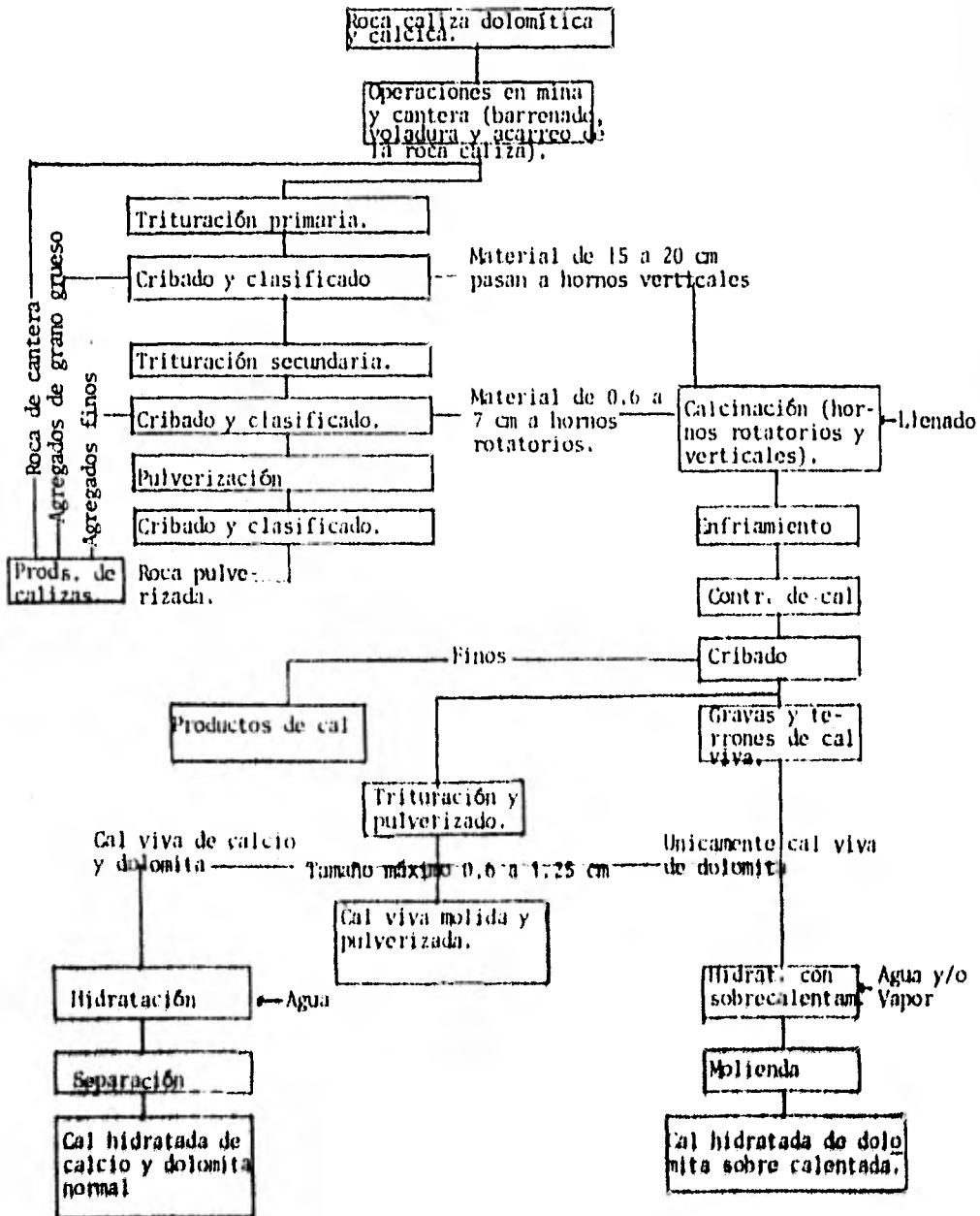
Un uso muy particular, pero prometedor de la sal común, es la disminución de permeabilidad que produce en muchas arcillas, lo que la hace útil para tratar a las expansivas. La sal también beneficia la resistencia del suelo, así como el comportamiento de los suelos ante la congelación.

La principal desventaja de estos tratamientos es que la sal es muy soluble y, por lo tanto, fácilmente lavada; por esto se le adjudicó al principio la calificación de no durable.

El comportamiento del cloruro de calcio es muy similar al de sodio aunque su efecto en la compactación sea mucho menos marcado, así como su efecto sobre la permeabilidad, a la que a veces hacen aumentar, con lo que se aumenta mucho la posibilidad de remoción por lavado.

Apéndice 11.1. Obtención de la cal.

A continuación se describirá la obtención de la cal por medio de un diagrama de flujo con el fin de dar mayor claridad al proceso.



CAPITULO III

CRITERIOS GENERALES PARA ELEGIR UN AGENTE ESTABILIZANTE

- Criterios generales.
- Efectos sobre el suelo.

El extendido empleo de agentes químicos para mejorar las propiedades físicas de suelos y sistemas agregado-suelo han enfatizado la necesidad de una clasificación y una metodología que simplifique la selección del más adecuado producto para ser empleado en las condiciones que presente el medio ambiente y las condiciones de servicio.

Los diversos criterios para seleccionar cal, cemento portland, productos asfálticos y combinaciones de estos son descritos en el presente capítulo.

El sistema de selección que discutiremos aquí se basa en el desarrollado por el cuerpo de Ingenieros de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de Norteamérica denominado Sistema Guía para Estabilización de Suelos (SSIS):

- Tipo de estabilización. En el SSIS la primera alternativa que presenta es la estabilización química; sin embargo, tanto la química como la mecánica pueden ser consideradas y ambas alternativas evaluadas.
- Factor de uso. El sistema clasifica la forma de construcción del suelo estabilizado en oportuno y no oportuno.

El término no oportuno se refiere a pavimentos de vida corta, alto riesgo y construcción rápida, la principal diferencia entre pavimentos no oportunos y permanente es que el segundo probablemente será construido por una firma civil y el tiempo de diseño permitirá una investigación más completa y detallada de las alternativas de estabilización.

La Figura III.1. muestra la forma como los factores de uso son integrados al sistema por diferentes subsistemas específicos para terracerías y bases estabilizadas. Las sub bases no son consideradas directamente, pero pueden ser incluidas en los campos de terracerías o bases; los subsistemas dependen del tipo de material y las características de resistencia deseadas.

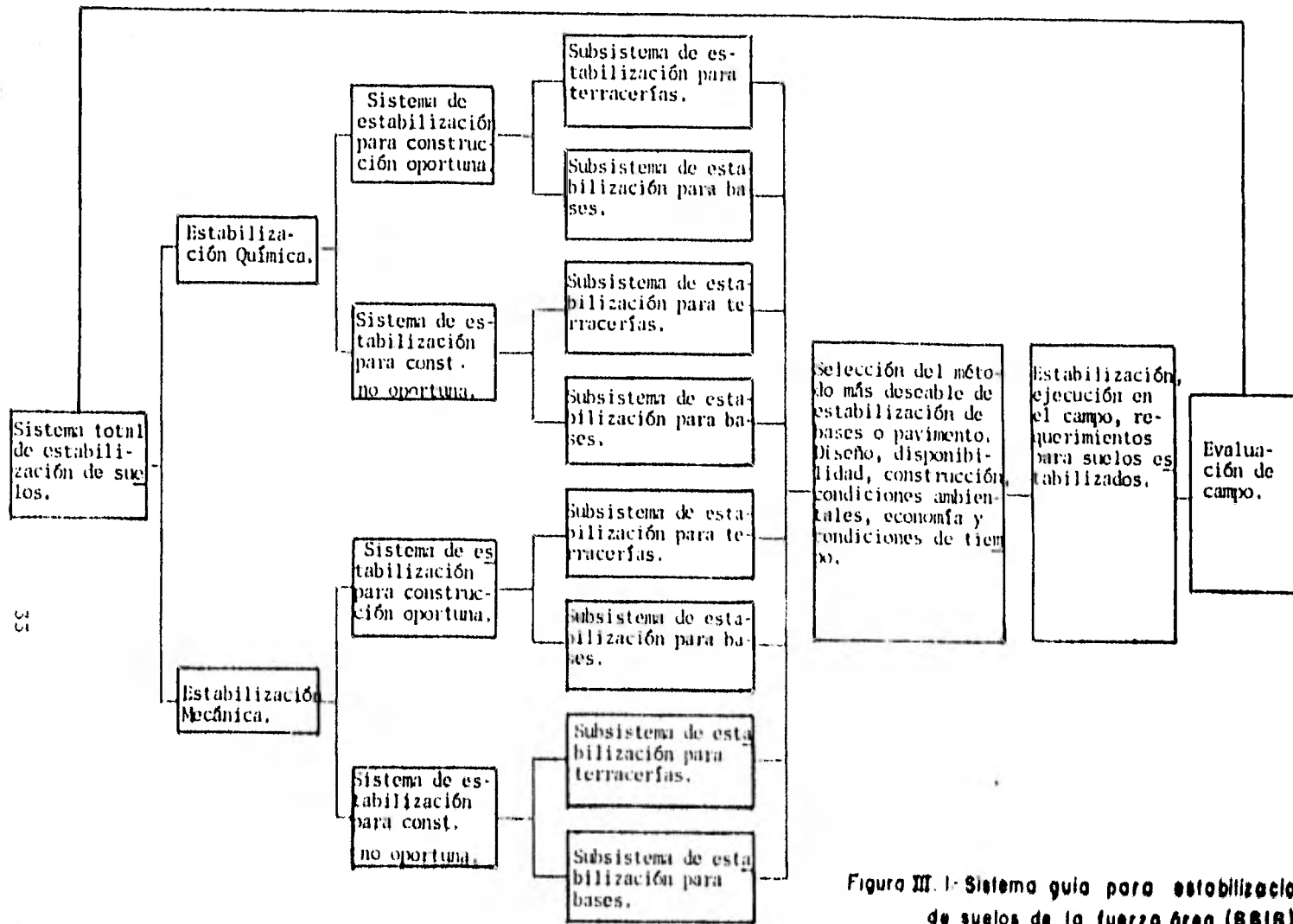


Figura III.1- Sistema guía para estabilización de suelos de la fuerza área (SSIS).

-Factores ambientales. Estos influyen principalmente en la durabilidad última y la conveniencia de estabilizar el suelo; están basados principalmente en los efectos climatológicos, tanto la lluvia como la temperatura serán consideradas porque cualquiera de los dos podrá influir significativamente en el tipo y cantidad del agente estabilizante empleado así como la época del año en que ciertos estabilizadores pueden ser empleados.

Es necesario hacer notar que el SSIS no substituye el diseño estructural del pavimento sino que nos auxilia para elegir el mejor estabilizador así como la cantidad en que será empleado.

REQUERIMIENTOS GENERALES PARA LA SELECCION DE UN AGENTE ESTABILIZANTE.

Algunas guías han sido editadas para auxiliar a los Ingenieros en la selección de un estabilizador para un suelo en particular. Estas guías indican que la selección del estabilizador depende de la localización de la capa del pavimento por estabilizar así como el tipo de suelo. El sistema ha sido desarrollado tanto para bases como terracerías aunque únicamente se presentará la estabilización para bases en este capítulo, siendo similar la estabilización de terracerías.

Tanto el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) Apendice III.1. y Apendice III.1.a); como el Sistema de Clasificación de Suelos AASHO Apendice III.2. y Apendice III.2.a); han sido empleados para seleccionar estabilizadores de suelos, ambos emplean la granulometría y los límites de Atterberg como datos para clasificar el suelo de acuerdo a cualquiera de los dos sistemas, estos dos parámetros fueron usados para la clasificación inicial de los suelos en categorías específicas. En particular se seleccionó el porcentaje que pasa la malla No. 200 y el Índice Plástico como parámetros básicos.

Criterio de estabilización con cal. La cal reacciona con suelos de mediana y moderada finura y grano fino; disminuye la plasticidad, incrementa la trabajabilidad, reduce la expansión y aumenta la resistencia.

En términos generales, los suelos que más reaccionan con la cal incluyen arcillas con grava, limos arcillosos y arcillas. Todos los suelos clasificados por AASHO como A-5, A-6 y A-7 y algunos como A-2-6 y A-2-7 son fácilmente estabilizados con cal. Acorde con el SUCS prácticamente todos los suelos pueden ser considerados como potencialmente capaces de ser estabilizados con cal. Basado en experiencias, la cal puede ser un efectivo estabilizador con arcillas ($< 2 \mu$) en un porcentaje tan bajo como es el 7 por ciento; además, suelos con Índice Plástico tan bajo como 8 pueden ser estabilizados satisfactoriamente con cal. El criterio de las Fuerzas armadas indica que el Índice Plástico deberá ser mayor de 12, mientras que la Asociación Nacional de cal indica que un Índice Plástico mayor a 10 será un límite inferior razonable para emplear cal.

En vista de estas sugerencias en diversos criterios, es creible que el Índice Plástico del suelo tendrá un límite mínimo de 10 para asegurar con cierto grado de certeza que existirá el éxito con la estabilización con cal.

Criterio de estabilización con cemento. La Asociación de Cemento Portland indica que todos los tipos de suelos pueden ser estabilizados con cemento. Sin embargo, los materiales granulares bien graduados que posean una matriz de materiales finos han dado los mejores resultados.

Podemos dividir en tres grandes grupos los suelos para emplear el cemento.

- a) Suelos arenosos y con grava combinados con un porcentaje del 10 al 35 por ciento de limo y arcilla, son los suelos que presentan las mejores características para ser mezclados con el cemento y generalmente requieren pequeñas cantidades para lograr una adecuada consistencia. Los depósitos de arena y grava de acarreo, caliche, suelo gravoso y todo material granular tiene un buen comportamiento si contienen un 5 por ciento o más de material que pase la malla No. 4. En materiales excepcionalmente bien graduados que contengan

más del 65 por ciento de gravas retenidas en la malla No. 4 y tengan suficientes finos para adquirir una adecuada cohesión; tienen buen comportamiento con cantidades bajas de cemento.

- b) Suelos arenosos donde existe una ausencia de finos (arena de playa). Las arenas acarreadas por glaciares y corrientes de aire pueden ser buenos suelos estabilizados con cemento a condición de ser cuidadosos en extremo para determinar las cantidades de cemento necesarias para evitar su disgregación posterior.
- c) Los suelos arcillosos y limosos presentan buenos resultados con la adición del cemento, aunque se deberán pulverizar perfectamente antes de proceder a la estabilización con el fin de evitar un fraguado demasiado rápido y lograr una liga íntima entre el suelo y el cemento; cabe aclarar que mientras mayor sea el contenido de arcilla mayor cantidad de cemento será necesario para lograr resultados satisfactorios.

Los límites en el Índice Plástico han sido establecidos por las fuerzas armadas, dependiendo del tipo de suelo. El Índice Plástico podría ser menor de 30 para arena y grava y menos de 20 para suelos de grano fino. Estas limitaciones son necesarias para asegurar la propiedad de la mezcla del estabilizador en el suelo.

Investigaciones desarrolladas por la Administración Federal de Caminos indica que el cemento puede ser empleado como un estabilizante para materiales con menos del 35 por ciento de material que pase la malla No. 200 y con un Índice Plástico menor de 20. De este modo, se deduce que suelos A-2 y A-3 pueden ser estabilizados con cemento mientras que suelos A-5, A-6 y A-7 corresponderán al campo de la cal.

En el criterio de la Fuerza Aérea se ha seleccionado como el máximo Índice Plástico el de 30 para suelos estabilizados con cemento.

En general el material estabilizado con cemento recibe el nombre de suelo-cemento, pero suele hacerse una distinción de acuerdo al porcentaje de cemento empleado, así se tiene Suelo-Cemento Modificado o Tipo Flexible cuando se emplea hasta un 6 por ciento y Suelo-Cemento o Tipo Rígido cuando el porcentaje es mayor de 6, habiéndose llegado a usar hasta el 16 por ciento.

La estabilización de tipo flexible se aplica principalmente en aquellos suelos cuyo contenido de arcilla, limo y coloides dan por resultado bajas resistencias y por lo tanto, su empleo no es conveniente. En este procedimiento la estabilización del suelo se logra empleando únicamente la cantidad necesaria para que la fracción fina del suelo sea aglomerada, de tal manera que las reacciones que se produzcan entre el suelo y el cemento en presencia del agua sean mínimas, principalmente en lo que se refiere a plasticidad y cambios volumétricos; sin llegar a alcanzar la aglutinación suficiente para producir una masa rígida.

La estabilización del tipo rígido en los suelos finos además de neutralizar la actividad de la arcilla proporciona al suelo una elevada resistencia. En los suelos gruesos el cemento proporciona cohesión, impermeabilidad y gran resistencia.

Los contenidos de cemento son relativamente altos, de tal suerte que el cemento al reaccionar con el suelo en presencia del agua, da como resultado un material de consistencia rígida, siendo este material un verdadero concreto pobre.

Este tipo de estabilización mejora la densidad del terreno natural; respecto a este factor conviene señalar que la reacción humedad-densidad de la mezcla está cambiando continuamente, desde el momento en que ésta se inicia. Por lo general, un tiempo prolongado de mezcla causa un aumento en el contenido óptimo de humedad y una disminución de la densidad; por otra parte la pérdida por cepillado en los especímenes sujetos a saturación y secado, o a congelación y deshielo aumenta también con el incremento en el tiempo de mezclado.

Las mezclas de suelo-cemento presentan un notable aumento en la resistencia, en el caso del Suelo-Cemento Modificado durante el mezclado se efectúa un cambio radical en la mezcla de tal manera que se origina un suelo más o menos coagulado, originando un aumento en la fricción interna. En el caso del Suelo-Cemento el aumento de la resistencia lo proporciona la elevada cantidad de cemento que como ya se dijo antes, origina un especie de concreto pobre.

Podemos notar este aumento de resistencia en base al Valor Relativo de Soporte obtenido en mezclas de diferentes estabilizantes:

| Estabilizante | Cantidad % | VRS % |
|-------------------|------------|-------|
| Ninguno | - - - | 55 |
| Cloruro de Calcio | 1.25 | 65 |
| Cloruro de Sodio | 1.25 | 60 |
| FM-3 | 1.00 | 50 |
| Cemento | 1.00 | 500 |

La plasticidad se ve reducida con la adición de cemento, debido a las reacciones físico-químicas que tienen lugar entre éste y la arcilla y la consiguiente floculación de los finos del suelo, como consecuencia de esto se tiene una reducción en los cambios volumétricos del material.

El índice Plástico del material se reduce debido a la disminución en el límite líquido.

Criterio de estabilización con asfalto. La mayoría de las estabilizaciones suelo-asfalto han sido hechas principalmente con cemento asfáltico, asfalto fluidificado (Cutback) y emulsiones asfálticas. Por esta razón únicamente estos tipos de asfalto serán discutidos aquí.

Los primeros criterios para estabilización con asfalto fueron desarrollados por el Departamento de Investigación de Carreteras (IRB) y El Comité de Caminos de suelo-asfalto. Otros criterios han sido presentados por la Asociación Americana de Constructores de Carreteras, Instituto del Asfalto Herrin, Chevron Asphalt Company, Douglas Oil Company y Departamento de Marina, EUA. Aunque estos criterios fueron desarrollados para tipos particulares de asfaltos, a continuación se presenta una tabla con propósitos de comparación (Tabla 11.1.).

La tendencia común indica que la estabilización con cemento asfáltico es la más extendida. Los requisitos de granulometría y propiedades de la mezcla han sido recientemente resumidas por el Comité de Bases con agregados asfálticos. Esta inspección del criterio aunado a información publicada por las fuerzas armadas sugieren que el suelo sea no plástico y contenga menos del 18 por ciento de material que pase la malla No. 200, estas condiciones son las más convenientes para la estabilización con cemento asfáltico en mezcla caliente.

Basado en este criterio, un límite de 20 por ciento que pase la malla No. 200, un Índice Plástico menor a 6 y el producto del Índice Plástico por el material que pasa la malla No. 200 sea menos de 60 han sido utilizados para elegir suelos susceptibles de ser estabilizados con asfalto. Requerimientos menos rigurosos han sido empleados en conjunto con los otros subsistemas de estabilización desarrollados por la Fuerza Aérea.

La estabilización de los suelos con un producto asfáltico tiene dos finalidades principales:

- a) En los suelos de plasticidad excesiva, la de impermeabilizar y aglomerar las partículas de arcilla, contrarrestando la actividad de éstas en presencia de agua.
- b) En los suelos no plásticos o arenosos, la de proporcionar la cementación requerida que asegure la estabilidad permanente del suelo al evitar deformaciones por desplazamientos de sus partículas bajo la acción de las cargas.

Tabla III.1. Criterio desarrollado para estabilizaciones con asfalto.

| Desarrollado por | Por ciento que pasa la malla No. 200 | Indice Plástico | Indice Plástico por el porcentaje que pasa la malla No. 200 |
|--|--------------------------------------|-----------------|---|
| Winterkorn | 8 a 50 | 18 | |
| Asociación Americana de Constructores de Carreteras. | 0 a 35 | 10 | |
| Herrin | 0 a 30 | 10 | |
| Instituto del Asfalto División de la Costa del Pacífico. | 3 a 15 | 6 | 60 |
| Chevron Asphalt Co. | 0 a 35 | no plástico | 72 |
| Douglas Oil Company | 0 a 30 | 7 | |

En los suelos plásticos o arcillosos, la presencia de humedad excesiva origina una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, lo que se traduce en deformaciones de éste bajo la acción de las cargas. En estos casos pueden aprovecharse las propiedades impermeabilizantes de los productos asfálticos para mantener el poder portante de estos suelos en todas las épocas. Ahora bien, los materiales asfálticos que recubren las partículas de un suelo, en forma semejante al agua, pueden actuar como lubricantes si se encuentra en cantidades excesivas, dando por resultado mezclas esponjosas e inestables; de esto se deduce que es esencial el empleo de la cantidad apropiada de productos asfálticos si se desea lograr resultados satisfactorios.

Otro requisito importante para realizar un trabajo aceptable es la mezcla uniforme del suelo y del producto asfáltico, pues aunque se añada la cantidad correcta de material asfáltico a un suelo, pueden existir porciones del mismo con exceso o falta de asfalto que constituyen zonas de debilidad; para lograr una mezcla aceptable el suelo debe reducirse a partículas pequeñas, para lo cual debe tener un bajo contenido de humedad que permita la disgregación del material; y deberá revolverse suficientemente para que el asfalto se encuentre totalmente en forma de película delgada. Algunos materiales, como los suelos de granos finos, presentan dificultades para la incorporación del asfalto, en los cuales la presencia de un cierto grado de humedad facilita esta operación.

El agua adicionada, más la correspondiente a la humedad del suelo, más la cantidad adecuada de asfalto que en conjunto se le denomina contenido líquido tienen un valor óptimo para lograr la compactación más eficiente, cuando en estas condiciones, a pesar de haber alcanzado el mayor peso volumétrico, la resistencia del suelo sea baja por ser una mezcla esponjosa, se tienen dos maneras de corregir dicha mezcla:

1. Removiendo y aflojando el terreno para reducir el contenido líquido por medio de evaporación del agua y las materias volátiles del producto asfáltico.

2. Añadiendo más material y repitiendo la operación de mezclado.

Con las dos soluciones anteriores se puede tener para un mismo esfuerzo de compactación una mayor resistencia y un peso volumétrico más bajo; éste puede incrementarse aumentando el esfuerzo de compactación con el consiguiente aumento en la resistencia, pero ello puede resultar antieconómico al llevarse a la práctica; además las dos soluciones dadas anteriormente encarecen el trabajo y deben evitarse.

En los suelos granulares es común encontrar, principalmente en los depósitos de corrientes fluviales, un bajo valor cementante y una composición granulométrica defectuosa, debido a una escasez de los tamaños finos de las partículas de suelo.

El tipo de suelo más fácil de estabilizar con asfalto es aquel que contenga una gran cantidad de material grueso, con granos de más de 6 milímetros (1/4"), como este material presenta una fricción interna relativamente alta es fácil de obtener una mezcla de gran estabilidad, las partículas gruesas tienen menos área superficial y requieren por lo tanto menos cantidad de asfalto para recubrirlas. Estos suelos son también más fáciles de pulverizar y mezclar y poseen más elevada resistencia al desgaste.

Deben distinguirse los suelos granulares que tengan suficiente contenido de arcilla de los que no tenga, pues en los primeros la arcilla proporciona la cementación necesaria bajo condiciones normales de humedad y el material asfáltico sólo se usa como impermeabilizante para mantener la humedad de la arcilla dentro de los límites deseados. Si el suelo no posee ningún aglutinante, la cementación puede ser proporcionada mediante la estabilización del suelo con un asfalto rebajado o una emulsión asfáltica. Una forma de explicar el efecto que origina el producto asfáltico es la siguiente: considerando una arena parcialmente húmeda, la cual se somete a una prueba directa de resistencia al esfuerzo cortante, se observa al aplicar la fuerza horizontal y teniendo una fuerza vertical nula, que la arena presenta una resistencia al desplazamiento

la cual es debida a la tensión superficial que existe entre partículas y agua; una forma más objetiva de darse cuenta del efecto de tensión superficial es en el caso de un vehículo que trata de desplazarse sobre arena suelta, en este caso el vehículo tiene dificultad para avanzar, pero si el vehículo se apoya sobre una arena húmeda, como en el caso de una plaza, se podrá desplazar rápidamente, pues los granos de arena, debido al agua, proporcionan la suficiente capacidad de soporte.

La deficiencia de finos puede originar variaciones bruscas en la resistencia mecánica del suelo estabilizado, debido a que gran parte de dicha resistencia queda proporcionada por la cementación debida al asfalto, tales variaciones pueden ocasionarse por pequeños cambios en el contenido del asfalto o en la temperatura; para asegurar que el material estabilizado con asfalto no presenta las condiciones críticas de resistencia mencionadas, es recomendable proporcionar previamente la cantidad de finos que razonablemente se crean convenientes para mejorar las condiciones de estabilidad, como este incremento de finos obliga a elevar el porcentaje de asfalto, deberá ser tal que no provoque un aumento de consideración en el contenido de asfalto necesario para estabilizar el suelo. Si el defecto de granulometría del suelo consiste en la presencia de un exceso de partículas finas, puede encontrarse conveniente adcionar al suelo arena gruesa o grava para disminuir la superficie total del agregado, con la consiguiente reducción en el contenido de asfalto obteniéndose a la vez una mayor resistencia.

La selección del tipo apropiado del producto asfáltico que se va a emplear es esencial para lograr un buen trabajo de estabilización; normalmente con los suelos se usan los asfaltos rebajados y las emulsiones y el tipo de trabajo a realizar determinará cual de estos productos producirá los resultados más satisfactorios. Lo primero que hay que tener en cuenta para seleccionar un material asfáltico es la función que debe desempeñar el citado material, si se trata de estabilizar materiales como la grava, arena o todo sin cohesión, el producto asfáltico será del tipo que origine cohesión y mantenga la estabilidad del suelo.

Si hay suficiente arcilla en el suelo para proporcionar la cohesión necesaria, el material asfáltico debe ser capaz de mezclarse íntimamente con la arcilla de manera que la mezcla se impermeabilice y permanezca estable, ya que los productos asfálticos de baja viscosidad contienen materias volátiles que son inútiles, después que se ha concluido la mezcla, resulta más económico por lo general, emplearlos sólo en las cantidades que sean indispensables para facilitar el proceso de mezclado. Un buen equipo de mezcla permite usar estabilizadores más viscosos, pero en caso de duda deben emplearse siempre los materiales más fluidos porque la mezcla íntima es esencial para el éxito del trabajo. Los asfaltos rebajados proporcionan una amplia variedad de productos que se adaptan a todas las clases de suelos.

Los asfaltos rebajados de fraguado rápido (y las emulsiones asfálticas) dejan un residuo relativamente viscoso que origina buena cohesión, pero a causa del escaso tiempo de curado y de la viscosidad del residuo, no se mezclan bien con arenas finas y arcillas, obteniéndose excelentes resultados cuando se mezclan con suelos extremadamente arenosos o que contienen un mínimo de partículas de limo y arcilla. Los asfaltos rebajados de fraguado medio con un disolvente del tipo kerosene dejan un residuo menos viscoso pero no imparten tanta dureza a la mezcla como los de fraguado rápido, por lo tanto, el suelo debe poseer bastante buena graduación y contener algún material aglutinante de grano fino para que pueda desarrollar adecuada estabilidad.

Estos asfaltos producen de ordinario una masa más homogénea cuando se mezcla con suelo cuyo índice de plasticidad varía entre 0 y 10 como puede ser un limo o arcilla. Cuando aumenta la plasticidad de un suelo, aumenta también la cohesión, por consiguiente, la estabilidad de una mezcla de este tipo de suelos depende a la vez del poder cementante del material asfáltico y de la cohesión de las partículas de arcilla que forman parte del suelo. Las emulsiones asfálticas resultan también satisfactorias con determinados suelos cuyo índice de plasticidad está comprendido entre los valores citados.

Los asfaltos rebajados de fraguado lento cuyo disolvente es un gas-oil o residuo pesado de la destilación del petróleo, impregnan los suelos arcillosos mejor que los otros tipos de material asfáltico, desempeñando con éxito funciones de agente impermeabilizante; por ello, se comportan más satisfactoriamente cuando se mezclan con suelos cuyo índice de plasticidad sea superior a 10 ó cuyo contenido de limo y arcilla exceda del 30 por ciento. Estos suelos de mayor poder cohesivo, tienen características cementantes propias de gran importancia y dependen menos del poder cementante del material asfáltico.

A causa de la fluidez del residuo de estos asfaltos, debe controlarse cuidadosamente la cantidad de material que se va a incorporar a los suelos, porque cualquier exceso producirá una mezcla esponjosa difícil de compactar y de mantener.

Las emulsiones son muy fáciles de mezclar, especialmente con los suelos de grano grueso pues su agente fluidificante es agua. El residuo de las emulsiones proporciona, casi siempre, buena cohesión y las películas que crean son lo suficientemente fuertes para producir mezclas estables siempre que el exceso de agua se evapore antes de compactarse la mezcla. A menudo se requieren emulsiones especiales para mezclarse con arcillas pues estos materiales de granos finos pueden causar una rotura prematura de dichas emulsiones. Es recomendable ensayar varios tipos de mezclas finas con emulsiones en el laboratorio, antes de empezar la construcción.

Hay tipos de suelos para los que se hace difícil encontrar un producto asfáltico que los estabilice satisfactoriamente, pero si, existen otras clases de materiales en la localidad que puedan mezclarse para mejorar su estabilidad, es recomendable llevar a cabo esa mezcla y entonces usar el material asfáltico más apropiado al suelo resultante.

Resumiendo lo anterior se puede decir que en materiales finos la viscosidad y lentitud de fraguado de los productos asfálticos, ya sean asfaltos rebajados o emulsiones que se utilicen en la estabilización, deben estar condicionados a la finura y plasticidad del suelo, a las ca-

racterísticas del equipo de estabilización y la temperatura durante la construcción. Los suelos más finos y de mayor plasticidad, requieren productos de mayor viscosidad y lentitud de fraguado. Estas mismas características del producto asfáltico se requieren, también, cuando es baja la temperatura del lugar durante la construcción. Los productos adecuados para la estabilización son los asfaltos de fraguado medio o lento, o las emulsiones de fraguado lento, pero puede utilizarse un asfalto rebajado de fraguado rápido si se cuenta con una máquina especial para estabilización. Por lo que respecta a la cantidad de productos asfálticos necesario para estabilizar el suelo, se puede decir que es mayor mientras mayor sea el grado de finura del suelo, la presencia de fragmentos gruesos en el material, además de aumentar la estabilidad disminuye el contenido de asfalto al reducirse la superficie por cubrir.

De allí que en algunos casos convenga incorporar gravas a suelos finos y el conjunto tratarlo con asfalto. Respecto al producto asfáltico adecuado para la estabilización de suelos arenosos, se recomendarán los asfaltos rebajados de fraguado rápido o medio o las emulsiones asfálticas de fraguado lento. Deberán escogerse los productos menos viscosos para los suelos gruesos con mayor contenido de finos, y para las condiciones de más baja temperatura ambiente durante la construcción. Así mismo, deberá tomarse en cuenta al hacer la elección del producto el tipo del equipo de construcción disponible para hacer la estabilización. Las máquinas especiales, como es la estabilizadora de un sólo paso, permiten emplear productos más viscosos.

Criterio de combinación de estabilizadores. La estabilización combina esta definida por cualquiera de las tres mezclas siguientes: cal-cemento, cal-asfalto y cal-cenizas volcánicas. Debido a que la estabilización cal-cenizas volcánicas no está contemplado como una estabilización común en los métodos usados por la Fuerza Aérea, por esto, no está incorporado dentro del sistema. El propósito de usar una combinación de estabilizadores (Cal y otro(s)) es con el fin de reducir la plasticidad e incrementar la trabajabilidad, permitiendo al suelo ser efectivamente estabilizado por un segundo estabilizador.

Se acepta que los suelos que pueden ser tratados por esta combinación de estabilizadores son los clasificados por AASHO como A-6, A-7 y ciertos suelos clasificados como A-4 y A-5.

Basados en estas conclusiones, ha sido sugerido que esta combinación de estabilizadores sean empleados con materiales que tengan más del 35 por ciento de material que pasa la malla No. 200 y la cantidad de cal usada sea suficiente para asegurar que el Índice Plástico sea menor que el establecido por los criterios para estabilizar tanto con cemento como con asfalto.

Este criterio junto con un medio ambiente apropiado y sus precauciones constructivas son dadas en la Tabla III.2, esta información ha sido usada para establecer la base del sistema mostrado en la Figura III.2.

Los criterios anteriores nos indican una forma para clasificar los suelos y elegir un estabilizador, más no nos indican las cantidades a usar, en la siguiente sección del capítulo trataremos de responder a esta pregunta.

DISEÑO DEL SUBSISTEMA.

Numerosas publicaciones de investigaciones y guías técnicas están disponibles para auxiliar al Ingeniero en la selección de un criterio para determinar la cantidad de estabilizador. Una amplia variedad de métodos de prueba han sido propuestos; sin embargo, criterios cuantitativos no están siempre disponibles. El criterio aquí discutido es para proponer el subsistema dirigido ha determinar la cantidad adecuada de cal, cemento y asfalto para estabilizar satisfactoriamente el suelo.

Estabilización con cal.

Selección del tipo adecuado de suelo. En la sección anterior se discutieron los requisitos generales del suelo con respecto a su granulometría y plasticidad. Sin embargo, hay otras características físico-químicas que deben ser consideradas para determinar si la cal reaccionará con el suelo.

Tabla III.2. Precauciones para condiciones ambientales y constructivas.

| Estabilizador | Medio ambiente o Construcción | PRECAUCIONES |
|---------------|-------------------------------------|--|
| Cal | Medio ambiente | Si la temperatura del suelo es menor a 40°F y no se espera un incremento, la reacción química no se producirá rápidamente y consecuentemente, la resistencia obtenida por la mezcla suelo-cal será mínima. |
| | Construcción | La mezcla de suelo-cal deberá ser programada para su construcción de tal modo que obtenga la suficiente durabilidad para resistir los ciclos de congelamiento y deshielo esperados. No podrán circular vehículos pesados sobre el suelo-cal durante 10 a 14 días después de su construcción. |
| Cemento | Medio ambiente | Si la temperatura del suelo es menor a 40°F y no se espera un incremento, la reacción química no se producirá rápidamente y, consecuentemente, la resistencia obtenida por la mezcla suelo-cemento será mínima. La mezcla de suelo-cemento deberá ser programada para su construcción de tal modo que obtenga la suficiente durabilidad para resistir los ciclos de congelamiento y deshielo esperados. |
| | Construcción | La construcción durante los períodos de fuertes lluvias se deberá evitar. No podrán circular vehículos pesados sobre el suelo-cemento durante 7 a 10 días después de su construcción. |
| Asfalto | Medio ambiente | Cuando se usa cemento asfáltico, su construcción sólo deberá permitirse cuando sea posible su correcta compactación. Una adecuada compactación puede ser obtenida a temperaturas de congelamiento. Cuando cutbacks y emulsiones están siendo empleados, la temperatura del suelo y del aire será sobre la de congelación. |
| | Construcción | El material asfáltico deberá cubrir completamente las partículas de suelo antes de compactar. Plantas estacionarias de bacheado, junto con otros equipos especializados, son necesarios para la estabilización con cemento asfáltico. Un clima caliente y seco es preferible para todo tipo de estabilización asfáltica. |

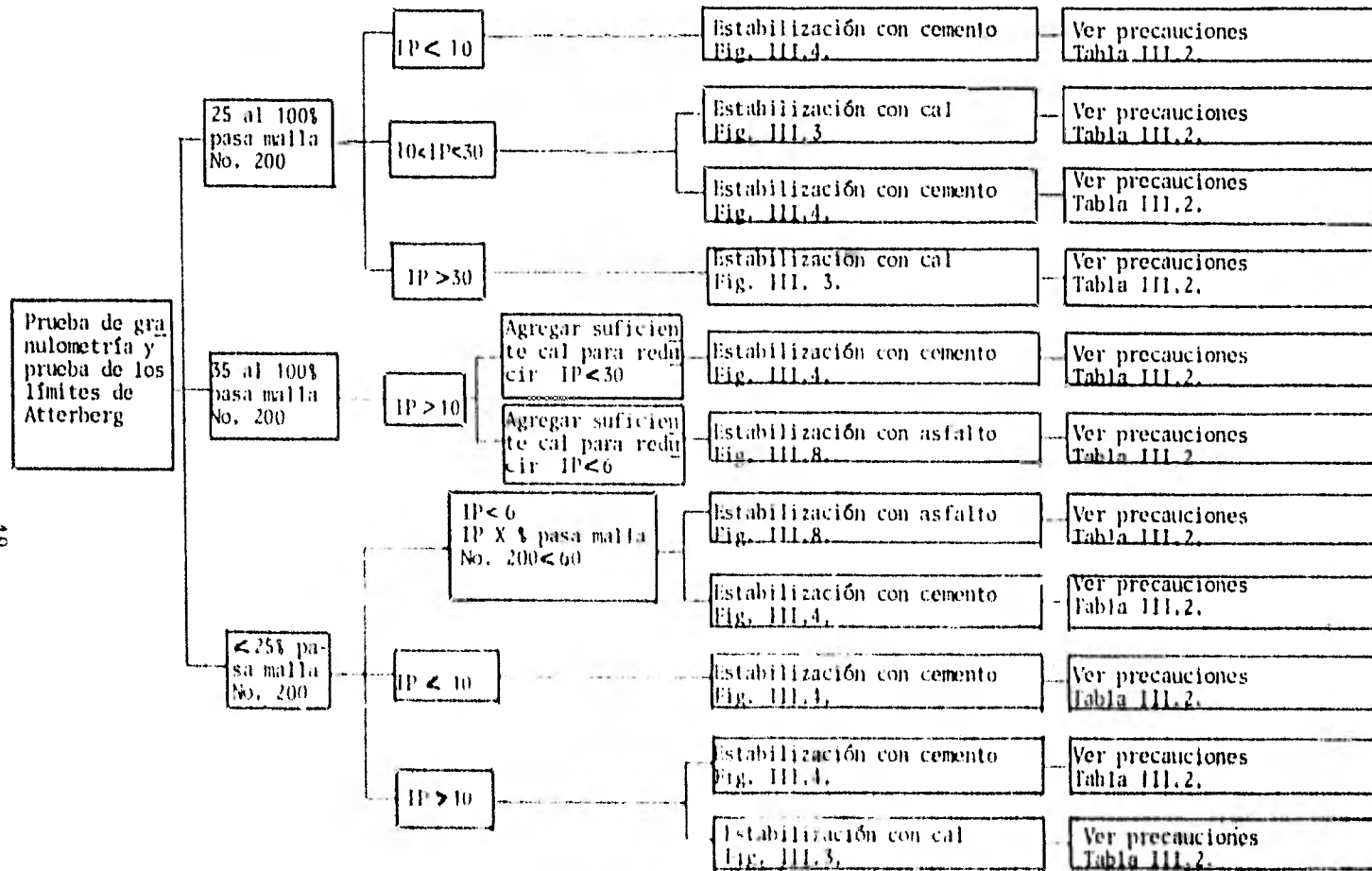


Figura III.2 - Selección del agente estabilizador para la construcción de bases en construcciones no-oporunas.

Se ha definido suelo reactivo con la cal si muestra incrementos significativos en su resistencia (cuantificado por su resistencia a la compresión sin confinar) cuando es tratado con la cal. De acuerdo a esta definición un suelo no reactivo no necesariamente dejará de ser mejorado por la adición de cal pues aun así disminuirá su plasticidad, disminuirá la susceptibilidad al agua y mejorará su comportamiento ingenieril. Sin embargo, por el mejoramiento de sus características de resistencia es deseable que en el Sistema Índice de Estabilización se tenga una mayor consideración a esta cualidad.

Entre los factores que pueden evitar la reactividad de los suelos con la cal se encuentran: la acidez de los suelos, la presencia de materia orgánica y sulfatos. Suelos con un pH menor de 7 puede no reaccionar, aunque se han reportado suelos estabilizados satisfactoriamente con un pH tan bajo como 5.7; también se han reportado suelos con carbón orgánico excediendo el 1 por ciento que no han reaccionado. En suma, la experiencia ha mostrado que cantidades significativas de sulfatos disminuyen la eficiencia de la cal.

Suelos pobremente drenados son los que se han presentado más reactivos, debido posiblemente al alto pH y la disponibilidad de los componentes de la reacción química (suelos minerales intemperizados).

Selección del tipo de cal. El término cal es empleado generalmente tanto para designar cal viva como hidratada, en México tanto las cales de calcio como las de magnesio (dolomitas) son elaboradas y están en el mercado; si bien hay diferencias entre las cales en la resistencia de la mezcla suelo-cal, la selección del tipo de cal es usualmente marcada por su disponibilidad y por los requisitos de seguridad en un determinado trabajo.

Selección de la cantidad de cal. Hay pocos criterios definidos para evaluar la cantidad correcta de cal, cemento y asfalto.

Se ha propuesto una pequeña prueba donde el contenido apropiado de cal es aquel que producirá un pH mínimo de 12.4 unas horas después de la

mezcla. Esta prueba no es válida para suelos empleados en bases y en general se empleará con la debida precaución.

Varios investigadores consideran que un mínimo de 3 por ciento de cal es necesario para producir una adecuada reacción en el campo. La Fuerza Aérea sugiere que 2, 3 y 5 por ciento de cal sea usada en suelos de grano grueso (conteniendo 50 por ciento o menos de material que pasa la malla No. 200) mientras que el 3, 5 y 7 por ciento será probado para suelos de grano fino (más del 50 por ciento de material que pasa la malla No. 200). La Asociación Nacional de Cal (The National Lime Association) recomienda 3, 5 y 7 por ciento de cal para usar en las mezclas. Con excepción de la prueba del pH descrita, el contenido de cal generalmente es determinado por medio de mezclas de prueba con la cantidad de cal aproximada que produzca las reacciones necesarias.

Métodos de evaluación de mezclas suelo-cal. Algunos tipos de pruebas han sido propuestas para evaluar la mezcla suelo-cal. Estas incluyen, pero no limitan, Resistencia a la compresión sin confinar, Valor Relativo de Soporte, Resistencia a la flexión, Resistencia a la compresión triaxial, pruebas de las propiedades elásticas, cohesímetro y pruebas de congelación y deshielo. Muchas de estas pruebas no son rutinarias y se emplearán en función del criterio que se emplea.

En la Tabla III.3. se proponen tentativamente los requisitos de resistencia a la compresión de mezclas suelo-cal.

Durabilidad, la capacidad de un material de mantener estabilidad e integridad después de ser expuesto a servicio y desgaste, es generalmente lo más difícil de determinar, de las muchas pruebas desarrolladas posiblemente la que más merito le encontramos es la de congelación y deshielo pues es esta la condición más crítica para el conjunto suelo-cal y es necesario aclarar que esta prueba es aplicable a zonas frías por lo que en México sus resultados deberán ser interpretados con las reservas del caso.

Tabla III.3. Requisitos de resistencia a la compresión de una mezcla de suelo-cal.

| U S O S | Requisito de resistencia residual (psi) (b) | Requisitos de resistencia para diversas condiciones de servicio esperado (a) | | | |
|---------------------------|---|--|--|---------------|-----------|
| | | 8 días de saturación (psi) | Ciclos de congelación-deshielo (psi) (c) | | |
| | | | 3 ciclos | 7 ciclos | 10 ciclos |
| Terracería mejorada | 20 | 50 | 50 | 90 50(d) | 120 |
| Sub-base Pavimento rígido | 20 | 50 | 50 | 90 50(d) | 120 |
| Pavimento flexible | | | | | |
| Espesor 10 in (e) | 30 | 60 | 60 | 100 60(d) | 130 |
| Espesor 8 in (e) | 40 | 70 | 70 | 110 75(d) | 140 |
| Espesor 5 in (e) | 60 | 90 | 90 | 130 100(d) | 160 |
| Base | 100(f) | 130 | 130 | 170 150(d) | 200 |

- (a) El requisito de resistencia al finalizar el período de curado proveerá de la adecuada resistencia residual.
- (b) Provee la mínima resistencia para soportar el primer período invernal al que se vea expuesto el suelo-cal.
- (c) Es el número de ciclos que se esperan para el primer período invernal de servicio.
- (d) La pérdida de resistencia por congelamiento-deshielo esta basada en 10 psi/ciclo excepto en los valores de 7 ciclos que se basan en una ecuación de regresión previamente calculada.
- (e) Es el espesor total sobre la sub-base, este requerimiento esta basado en la distribución de esfuerzos de Boussinesq, pavimento rígido necesario si el material cementado es usado como base.
- (f) La resistencia a la flexión podrá ser considerada en el diseño del espesor del pavimento.

Nota: Estos requisitos son recomendados para zonas extremadamente frías.

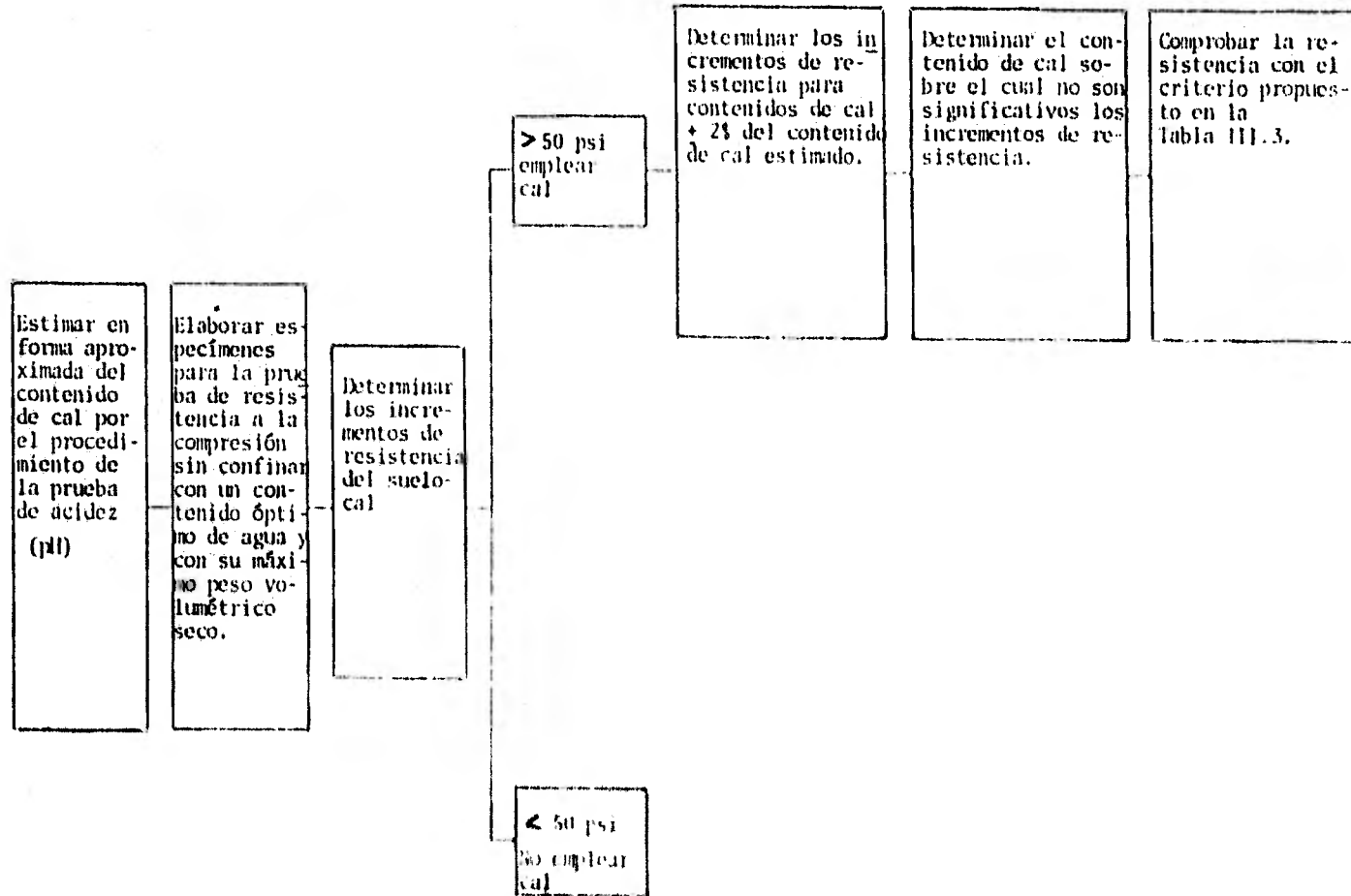


Figura III 3- Subsistema para capas de base estabilizadas con cal

De esta información se ha desarrollado el subsistema de estabilización con cal que observamos en la Figura III.3.

Estabilización con cemento Portland.

Los requisitos generales sobre granulometría y límites de Atterberg han sido discutidos previamente; sin embargo, investigaciones y construcciones con mezclas de suelo-cemento han sido ejecutadas con un criterio basado únicamente en la clasificación AASHTO, por otro lado la experiencia ha mostrado que esta aproximación es satisfactoria; aunque no se incluyen propiedades importantes del suelo como sería el tipo de arcilla, acidez, contenido orgánico, contenido de sulfatos que pueden influir en la conveniencia de estabilizar con cemento.

Efectos de la acidez, materia orgánica y sulfatos. Algunas investigaciones han mostrado una tendencia general al incremento de resistencia de suelos que poseen un alto pH. Para valores de pH tan grandes como 7 no se han notado efectos negativos. La Asociación de Cemento Portland (PCA) ha conducido experimentos sobre el pH de los suelos pero no ha encontrado una correlación general entre el pH y el comportamiento del cemento.

Dos pruebas han sido propuestas para evaluar los efectos de la materia orgánica en la resistencia del suelo-cemento. La PCA ha sugerido el uso de la prueba de absorción de calcio para determinar la presencia de materia orgánica en suelos arenosos, pero esta prueba no podrá ser empleada para suelos arcillosos. Una investigación adicional conducida por PCA ha mostrado que la prueba calorimétrica estandar no identifica la presencia de materia orgánica convenientemente.

Un método satisfactorio para determinar la presencia de materia orgánica es la prueba del pH en una pasta suelo-cemento después de 15 minutos de mezclarse. Esta prueba muestra básicamente la reactividad del suelo con el cemento; sin embargo, la reactividad no es función únicamente del contenido de materia orgánica sino depende tanto de su cantidad.

como de su tipo.

El contenido de sulfatos en el suelo en más del 0.5 a 1 por ciento disminuye la resistencia del suelo-cemento. Similares concentraciones de sulfatos en el agua en más del 0.5 por ciento disminuirá igualmente su resistencia.

Tipo de cemento. La influencia del tipo de cemento en las propiedades de la mezcla suelo-cemento han sido examinados por algunos investigadores. En general, los tipos I, II, III y V producen únicamente pequeñas diferencias en el comportamiento de la mayoría de los suelos. De esta manera, por su general disponibilidad y economía, se recomienda usar el cemento Tipo I.

Selección de la cantidad de cemento. Investigaciones desarrolladas por la PCA en más de 2000 suelos nos proporciona la información para determinar el contenido de cemento para varios tipos de suelos. Los contenidos de cemento se muestran en la Tabla III.4.

Métodos de evaluación de mezclas suelo-cemento. Varios tipos de pruebas han sido empleadas para evaluar las propiedades de las mezclas suelo-cemento. Estos métodos incluyen la resistencia a la compresión sin confinar, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad, Valor Relativo de Soporte, Fatiga, valor-R, y prueba de congelación y deshielo.

Muchos de los métodos de estas pruebas no han sido empleados extensamente, esto origina la carencia de un criterio definido. Sin embargo, la PCA recomienda el uso de la prueba de congelación y deshielo y establece un criterio para probar las mezclas suelo-cemento, esta información se muestra en la Tabla III.5.

El diseño del subsistema de estabilización con cemento se muestra en la Figura III.4.

Tabla 111.4. Requisitos de cemento para diversos suelos.

| Clasificación de suelos | | Valoración de los requerimientos de cemento (b) | | Contenido de cemento estimado en la prueba de humedad-densidad. (Porcentaje en peso) | Contenido de cemento determinado por pruebas de saturación-secado y congelación-deshielo. (Porcentaje en peso) |
|-------------------------|-------------------------|---|--------------------|---|---|
| AASHO | SUCS (a) | Porcentaje en volumen | Porcentaje en peso | | |
| A-1-a | GW, GP, GM, SW, SP, SM. | 5 a 7 | 3 a 5 | 5 | 3 a 5 a 7 |
| A-1-b | GM, GP, SM, SP | 7 a 9 | 5 a 8 | 6 | 4 a 6 a 8 |
| A-2 | GN, GC, SM, SC | 7 a 10 | 5 a 9 | 7 | 5 a 7 a 9 |
| A-3 | SP | 8 a 12 | 7 a 11 | 9 | 7 a 9 a 11 |
| A-4 | CL, ML | 8 a 12 | 7 a 12 | 10 | 8 a 10 a 12 |
| A-5 | ML, MH, OH | 8 a 12 | 8 a 13 | 10 | 8 a 10 a 12 |
| A-6 | CL, CH | 10 a 14 | 9 a 15 | 12 | 10 a 12 a 14 |
| A-7 | OH, MH, CH | 10 a 14 | 10 a 16 | 13 | 11 a 13 a 15 |

(a) Basado en recomendaciones de la Fuerza Aérea.

(b) Para la mayoría de suelos del horizonte A, el contenido de cemento se podrá incrementar 4 por ciento si el suelo es gris oscuro a gris y 6 por ciento en suelos negros.

Tabla III.5. Criterio de la Asociación de Cemento Portland para mezclas suelo-cemento empleadas en bases.

| Clasificación del suelo | | Peso perdido de un suelo-cemento durante 12 ciclos de las pruebas de saturación-secado o congelación-deshielo. |
|-------------------------|------------------------|--|
| AASHO | SUCS (a) | |
| A-1 | GW, GP, GM, SW, SP, SM | |
| A-2-4, A-2-5 | GM, GC, SM, SC, SP | $\leq 14 \%$ |
| A-3 | SP | |
| A-2-6, A-2-7 | GM, GC, SM, SC | |
| A-4 | CL, ML | $\leq 10 \%$ |
| A-5 | ML, MH, OH | |
| A-6 | CL, CH | |
| A-7 | OH, MH, CH | $\leq 7 \%$ |

(a) Basado en una correlación presentada por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos.

Estabilización con asfalto.

Un indicador del tipo de asfalto (cutback, emulsión o cemento) a usarse en ciertos tipos de suelos han sido sugeridos por el Instituto del Asfalto, Marina y Fuerza Aérea de E.U.A. y Chevron Asphalt Company. La selección del estabilizador apropiado dependerá de la granulometría aunada a la función de la capa estabilizada en la estructura del pavimento. Las Tablas III.6 y III.7. nos dan idea de la selección por realizar.

Cemento asfáltico. El criterio usado para seleccionar la viscosidad y la cantidad de cemento varía bastante entre los diversos organismos relacionados, las fuerzas armadas basan su selección del grado de viscosidad o grado del cemento asfáltico en el Índice de Temperatura del pavimento. Sus recomendaciones han sido modificadas y son usadas en el diseño del subsistema (Tabla III.8.)

La cantidad de asfalto puede ser estimada por el Método de California CKE, o puede ser estimada de la experiencia. La información de la Tabla III.9. puede ser usada como una estimación preliminar del contenido de cemento asfáltico, pero esta cantidad es una guía únicamente, la selección final estará basada en la ejecución de pruebas con la mezcla suelo-asfalto.

El criterio del Método Marshall empleado por las fuerzas armadas está dado en la Tabla III.10. El criterio enlista sus usos con suelos de grano grueso, mezclado en caliente, mientras el criterio para arena-asfalto está dada por separada, La Fuerza Aérea también especifica que el contenido de asfalto determinado por el método Marshall será modificado con el Índice de Temperatura del pavimento. Sin embargo, este criterio que fue desarrollado para capas superficiales, no parece ser seguro para capas inferiores.

El Instituto del Asfalto recomienda los criterios de Marshall, Hyeem y Hubbard-Field para usarse en el diseño de mezclas calientes. Específicamente, el Instituto del Asfalto recomienda el mismo criterio para

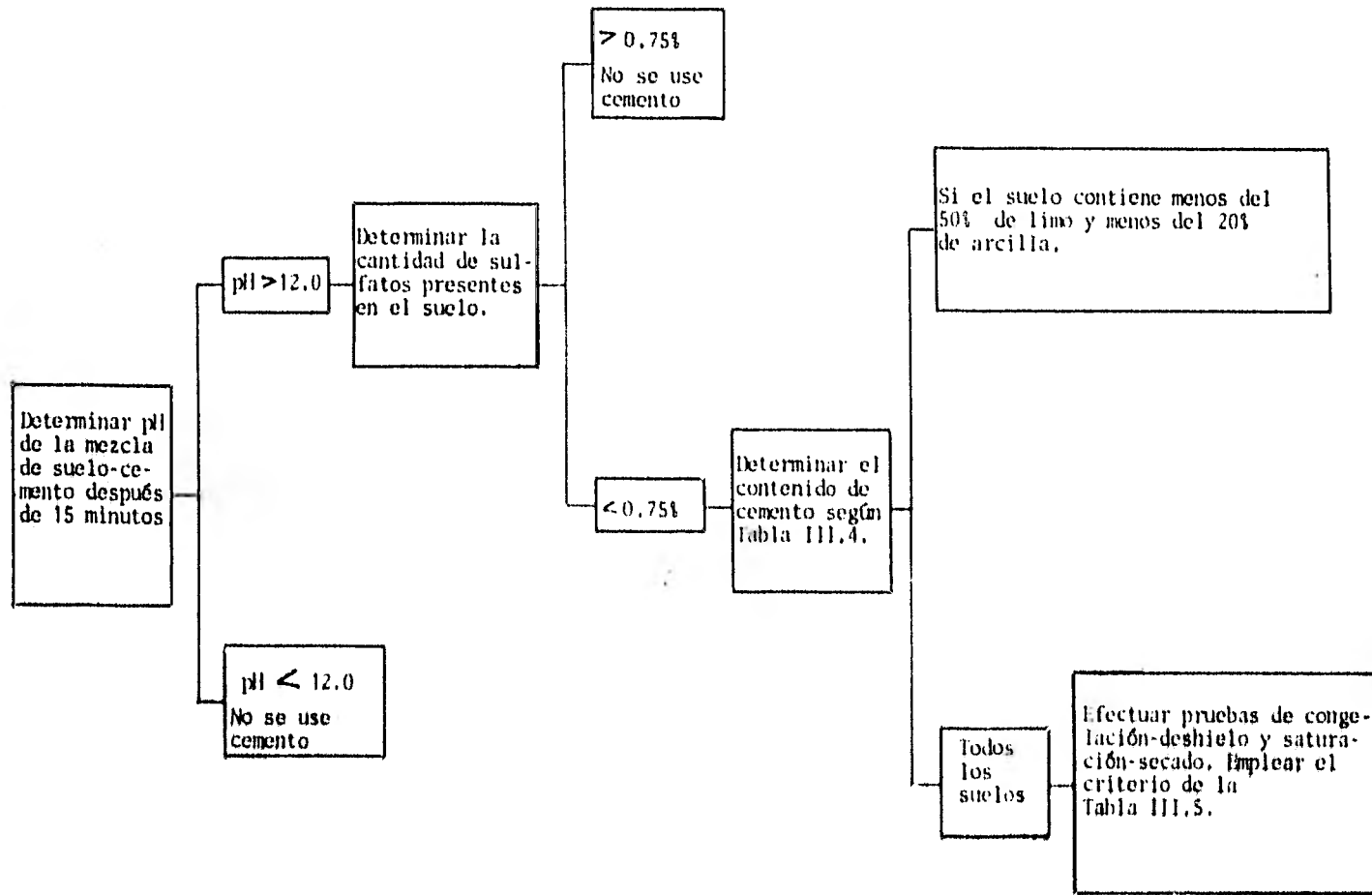


Figura III.4.- Subsistema para capas de base estabilizados con cemento.

Tabla III.6. Selección de un tipo conveniente de asfalto para problemas de estabilización de suelos.

| Mezcla | Arena-Asfalto | Suelo-asfalto | Piedra triturada y arena-grava-asfalto. |
|----------|---|---|---|
| Caliente | Cemento Asfáltico 60 a 70 Clima caliente 85 a 100 120 a 150 Clima frío | | Cemento Asfáltico 45 a 50 Clima caliente |
| Frío | Cutback Ver Fig. III.5. | Cutback Ver Fig. III.5. | Cutback Ver Fig. III.5. |
| Emulsión | Emulsión Ver Tabla III.11. Ver Fig. III.6. Ver Fig. III.7. | Emulsión Ver Tabla III.11. Ver Fig. III.6. Ver Fig. III.7. | Emulsión Ver Tabla III.11. Ver Fig. III.6. Ver Fig. III.7. |

Tabla III.7. Propiedades ingenieriles del material susceptible de ser estabilizado con asfalto.

| PARAMETRO | Arena-Asfalto | Suelo-Asfalto | Arena-grava-asfalto |
|-------------------------|---------------|---|---------------------|
| Graduación (% que pasa) | | | |
| Malla 1 1/2 in | | | 100 |
| Malla 1 in | 100 | | |
| Malla 3/4 in | | | 60 a 100 |
| Malla No. 4 | 50 a 100 | 50 a 100 | 35 a 100 |
| Malla No. 10 | 40 a 100 | | |
| Malla No. 40 | | 35 a 100 | 13 a 50 |
| Malla No. 100 | | | 8 a 35 |
| Malla No. 200 | 5 a 12 | Bueno 3 a 20 Regular 0 a 3 y 20 a 30 Pobre > 30 | 0 a 12 |
| Límite líquido | | Bueno 20 Regular 20 a 30 Pobre 30 a 40 Inaplicable > 40 | |
| Índice Plástico | ≤ 10 | Bueno ≤ 5 Regular 5 a 9 Pobre 9 a 15 Inaplicable > 12 a 15 | ≤ 10 |

Tabla III.8. Determinación del grado del asfalto para la estabilización de bases.

| Indice de temperatura del pavimento (a) | Grado del asfalto (Penetración) |
|--|---------------------------------|
| Negativo | 100 a 120 |
| 0 a 40 | 85 a 100 |
| 40 a 100 | 60 a 70 |
| 100 ó más | 40 a 50 |

(a) La suma, por un período de un año, de los incrementos sobre los 75°F del promedio mensual de las temperaturas máximas diarias. El promedio de la temperatura máxima diaria para el período de registros puede ser usado donde 10 ó más años de duración, el registro del año más caluroso se podrá emplear. Un índice negativo resulta cuando el promedio mensual no excede los 75°F. El índice negativo puede ser cuantificado simplemente restando el promedio mensual más grande de 75°F.

Tabla III.9. Selección preliminar del contenido de cemento asfáltico en la construcción de bases.

| Forma y textura del agregado | Asfalto por peso de agregado seco |
|------------------------------|-----------------------------------|
| Redondeado y liso | 4 % |
| Angulado y áspero | 6 % |
| Intermedio | 5 % |

Tabla III.10. Criterio del Método de Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto.

| Prueba | Tipo de mezclas | Punto en la curva | | Criterio | |
|---|--|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | 100 psi (a) resistencia | 200 psi resistencia | 100 psi resistencia | 200 psi resistencia |
| Estabilidad | Concreto asfáltico | Pico de curva | Pico de curva | 500 lb o más | 1800 lb o más |
| | Capa superficial Concreto asfáltico | (b) Pico de curva | Pico de curva | 500 lb o más | 1800 lb o más |
| | Capa aglomerante Arena-asfalto | Pico de curva | | 500 lb o más | |
| Peso unitario | Concreto asfáltico | Pico de curva | Pico de curva | No se use | No se use |
| | Capa superficial Concreto asfáltico | No se use | No se use | No se use | No se use |
| | Capa aglomerante Arena-asfalto | Pico de curva | | No se use | No se use |
| | | | | | |
| Fluides | Concreto asfáltico | No se use | No se use | 20 o más | 16 o más |
| | Capa superficial Concreto asfáltico | No se use | No se use | 20 o más | 16 o más |
| | Capa aglomerante Arena-asfalto | No se use | No se use | 20 o más | 16 o más |
| | | | | | |
| Porcentaje de vacíos en la totalidad de la mezcla | Concreto asfáltico | 4 (3) | 4 (3) | 3 a 5 (2 a 4) | 3 a 5 (2 a 4) |
| | Capa superficial Concreto asfáltico | 5 (4) | 6 (5) | 4 a 6 (3 a 5) | 5 a 7 (4 a 6) |
| | Capa aglomerante Arena-asfalto | 6 (5) | - | 5 a 7 (4 a 6) | - |
| | | | | | |
| Porcentaje de vacíos llenados con asfalto | Concreto asfáltico | 80 (85) | 75 (80) | 75 a 85 (80 a 90) | 70 a 80 (75 a 85) |
| | Capa superficial Concreto asfáltico | 70 (75) | 60 ^b (65) | 65 a 75 (70 a 80) | 70 a 80 (55 a 75) |
| | Capa aglomerante Arena-asfalto | 70 (75) | - | 65 a 75 (70 a 80) | - |
| | | | | | |

(a) En parentesis aparecen cantidades para ser empleadas en volúmenes con gravedad específica saturada (absorción de agua en más del 2,5 %).

(b) Si se agrega el asfalto en estos puntos en la mayoría de las ocasiones los espacios vacíos caerán fuera de los límites, el contenido óptimo de asfalto podrá ser ajustado de tal manera que los vacíos en la totalidad de la mezcla estén dentro de los límites.

ser utilizado en capas superficiales, pero con una prueba de temperatura en un intervalo de 100 a 140°F.

Recientemente, se ha intentado realizar un desarrollo más racional para el diseño de los pavimentos. Se hace notar que las propiedades elásticas y de fatiga de una superficie tratada con asfalto deberán de ser consideradas al diseñar el pavimento. Este método más racionalizado permitirá al Ingeniero una mejor evaluación del comportamiento de estos materiales estabilizados.

Asfalto fluidizado (Cutback). En el criterio desarrollado por la Marina EHA ha sugerido que el grado del cutback puede ser elegido basándose en el porcentaje de suelo que pasa la malla No. 200 y la temperatura ambiente del suelo. La Figura 111.5, nos muestra esta relación.

Algunos métodos están a disposición del Ingeniero para seleccionar la cantidad de cutback. El método California CKE puede ser utilizado así como la ecuación desarrollada en Oklahoma y por el Instituto del Asfalto, basado en el concepto de área superficial. La ecuación recomendada por el Instituto del Asfalto es:

$$p = 0.02(a) + 0.07(b) + 0.15(c) + 0.20(d) \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

p: por ciento de material asfáltico por peso de agregado seco.

a: por ciento de material retenido en la malla No. 50.

b: por ciento de material que pasa la malla No. 50 y es retenido en la malla No. 100.

c: por ciento de material que pasa la malla No. 100 y es retenido en la malla No. 200.

d: por ciento de material que pasa la malla No. 200.

Numerosas pruebas de laboratorio han sido empleadas para determinar el contenido de asfalto en un cutback y en emulsiones asfálticas. Estos métodos incluyen Hubbard Field, Estabilometro Hycem, Estabilometro

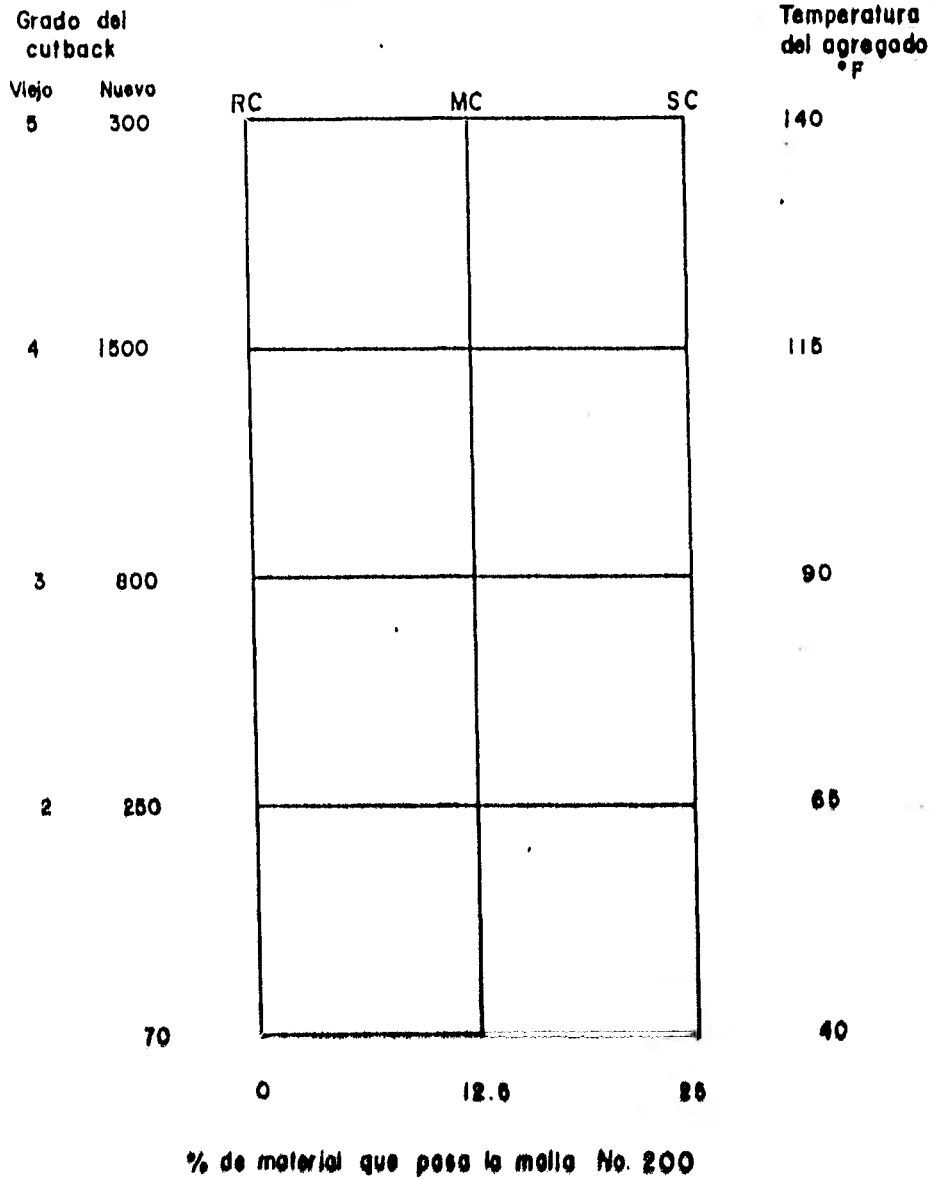


Figura III.5: Selección del tipo de cutback para estabilización

Marshall, Prueba de carga de Florida y Iowa, extrusión, compresión sin confinar, compresión triaxial, valor-R y módulo elástico. Métodos de mezclado, condiciones de curado, grado de carga y temperatura son variables muy importantes que deberán ser cuidadosamente controladas cuando alguna prueba se ejecuta.

La Fuerza Aérea utiliza comúnmente la prueba de extrusión para diseñar mezclas. La prueba de compresión sin confinar es fácil de ejecutarse, pero no hay un criterio adecuado para emplear los resultados.

Es importante hacer notar que no únicamente son la resistencia o estabilidad los criterios necesarios para determinar el contenido de asfalto sino también se recomienda complementarlo con un criterio de durabilidad.

Emulsión asfáltica. La selección del grado de emulsión puede ser convenientemente determinado de los datos de la Tabla III.11, preparada por la Marina. El criterio está basado en el porcentaje del material que pasa la malla No. 200 y el contenido relativo de agua. La elección entre una emulsión catiónica o aniónica estará basada en el tipo de agregado que se usará. Se ha desarrollado un método por medio del cual puede ser clasificado (Figura III. 6.) indicando el posible cambio de fase y el tipo de emulsión (aniónica o catiónica) seleccionada para satisfacer una particular característica de la fase del agregado, la Figura III.7. complementa esta idea.

Una selección preliminar de la cantidad de emulsión puede ser obtenida de los datos de la Tabla III.12. Otros métodos basados en el concepto de área superficial han sido empleados por el Instituto del Asfalto y Bird. La elección final de la cantidad estará basada en pruebas de laboratorio de la mezcla suelo-asfalto. Las fuerzas armadas sugieren como base de criterio la Prueba Marshall como es mostrada en la Tabla III.13.

El diseño del subsistema para estabilización con asfalto está mostrado en la Figura III.8.

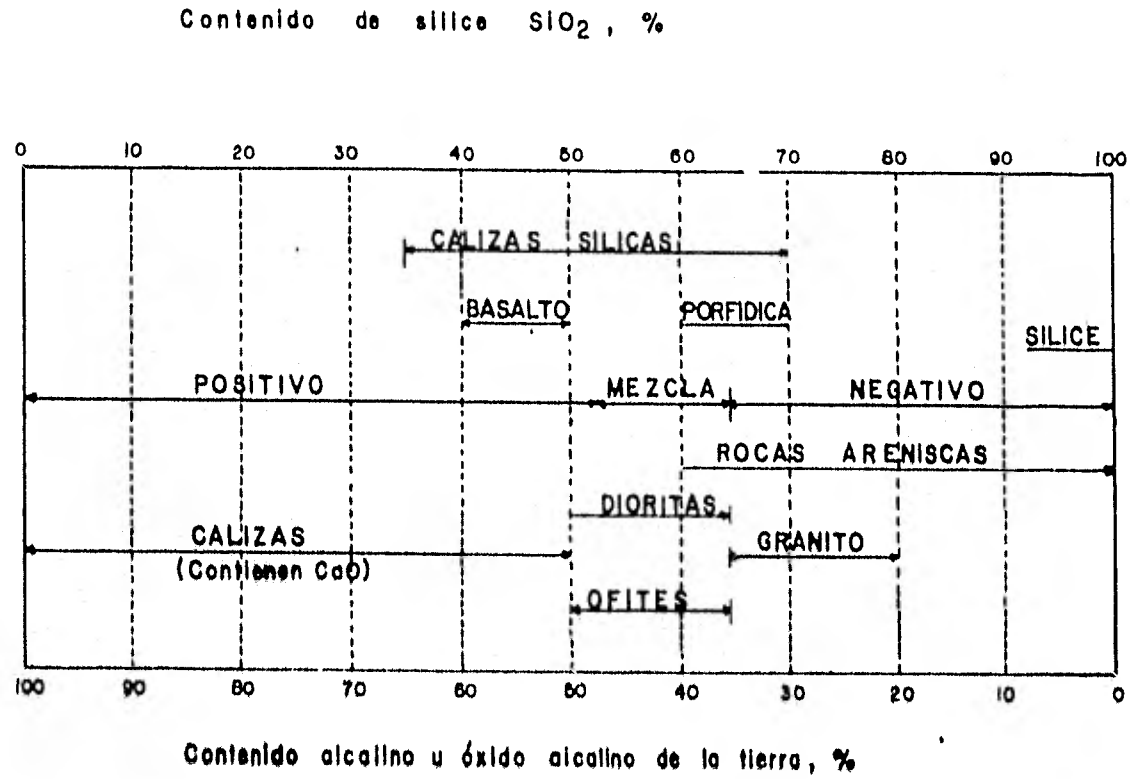


Figura III.6.- Alcalinidad del suelo y su posibilidad de mezcla con emulsiones

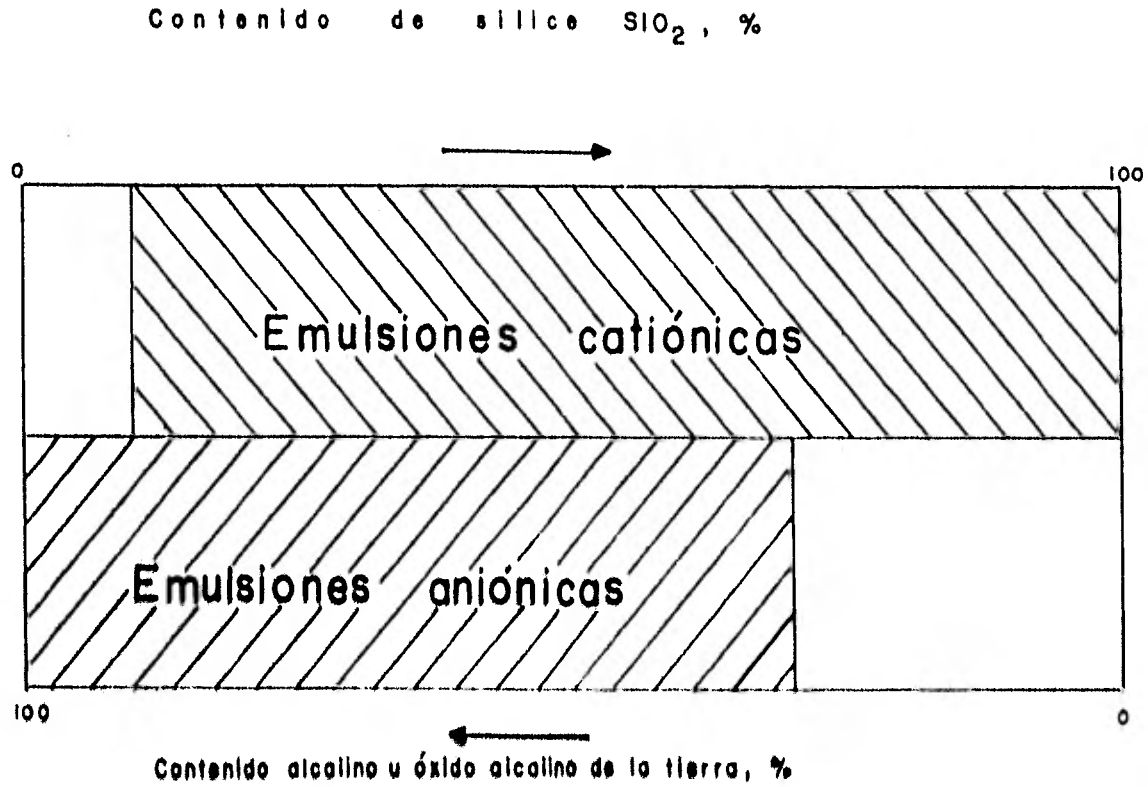


Figura III.7 - Efectividad de emulsiones catiónicas y aniónicas con diversos tipos de agregados

Tabla III.11. Selección del tipo de emulsión asfáltica para estabilizaciones.

| Porcentaje de material que pasa la malla No. 200 | Contenido relativo de agua en el suelo | |
|--|--|--------------------------|
| | Húmedo (5 % ó más) | Seco (3 a 5 %) |
| 0-5 | SS-1b (o SS-Kh) | SM-K (o SS-1b) (a) |
| 5-15 | SS-1, SS-1h (o SS-K, SS-Kh) | SM-K (o SS-1h, SS-1) (b) |
| 15-25 | SS-1 (o SS-K) | SM-K |

Nota: Se determinó este cuadro basándose en las Figuras III.6 y III.7.

(a) El suelo puede ser saturado previamente con agua antes de emplear este tipo de emulsiones asfálticas.

Tabla III.12. Requisitos de las emulsiones asfálticas.

| Porcentaje de material que pasa la malla No. 200 | Libras de emulsión asfáltica por 100 lb de agregado seco, cuando el porcentaje de material que pasa la malla No. 10 es: | | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|-----|------|
| | 50 ó menos | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 0 | 6.0 | 6.5 | 6.5 | 6.7 | 7.0 | 7.2 |
| 2 | 6.3 | 6.5 | 6.7 | 7.0 | 7.2 | 7.5 |
| 4 | 6.5 | 6.7 | 7.0 | 7.2 | 7.5 | 7.7 |
| 6 | 6.7 | 7.0 | 7.2 | 7.5 | 7.7 | 7.9 |
| 8 | 7.0 | 7.2 | 7.5 | 7.7 | 7.9 | 8.2 |
| 10 | 7.2 | 7.5 | 7.7 | 7.9 | 8.1 | 8.4 |
| 12 | 7.5 | 7.7 | 7.9 | 8.2 | 8.4 | 8.6 |
| 14 | 7.7 | 7.9 | 8.1 | 8.4 | 8.6 | 8.8 |
| 16 | 7.9 | 8.1 | 8.4 | 8.6 | 8.8 | 9.0 |
| 18 | 8.1 | 8.4 | 8.6 | 8.8 | 9.0 | 9.2 |
| 20 | 8.4 | 8.6 | 8.8 | 9.0 | 9.2 | 9.4 |
| 22 | 8.6 | 8.8 | 9.0 | 9.2 | 9.4 | 9.6 |
| 24 | 8.8 | 9.0 | 9.2 | 9.4 | 9.6 | 9.8 |
| 25 | 9.0 | 9.2 | 9.4 | 9.6 | 9.8 | 10.0 |

Tabla III.13. Criterio de diseño de mezclas Marshall para cutbacks y emulsiones asfálticas.

| Prueba Marshall de | Criterio para una prueba a 77°F de temperatura. | |
|----------------------------|---|--------|
| | Mínimo | Máximo |
| Estabilidad, libras | 750 | |
| Fluidez, 0.01 in | 7 | 16 |
| Vacios de aire, por ciento | 3 | 5 |

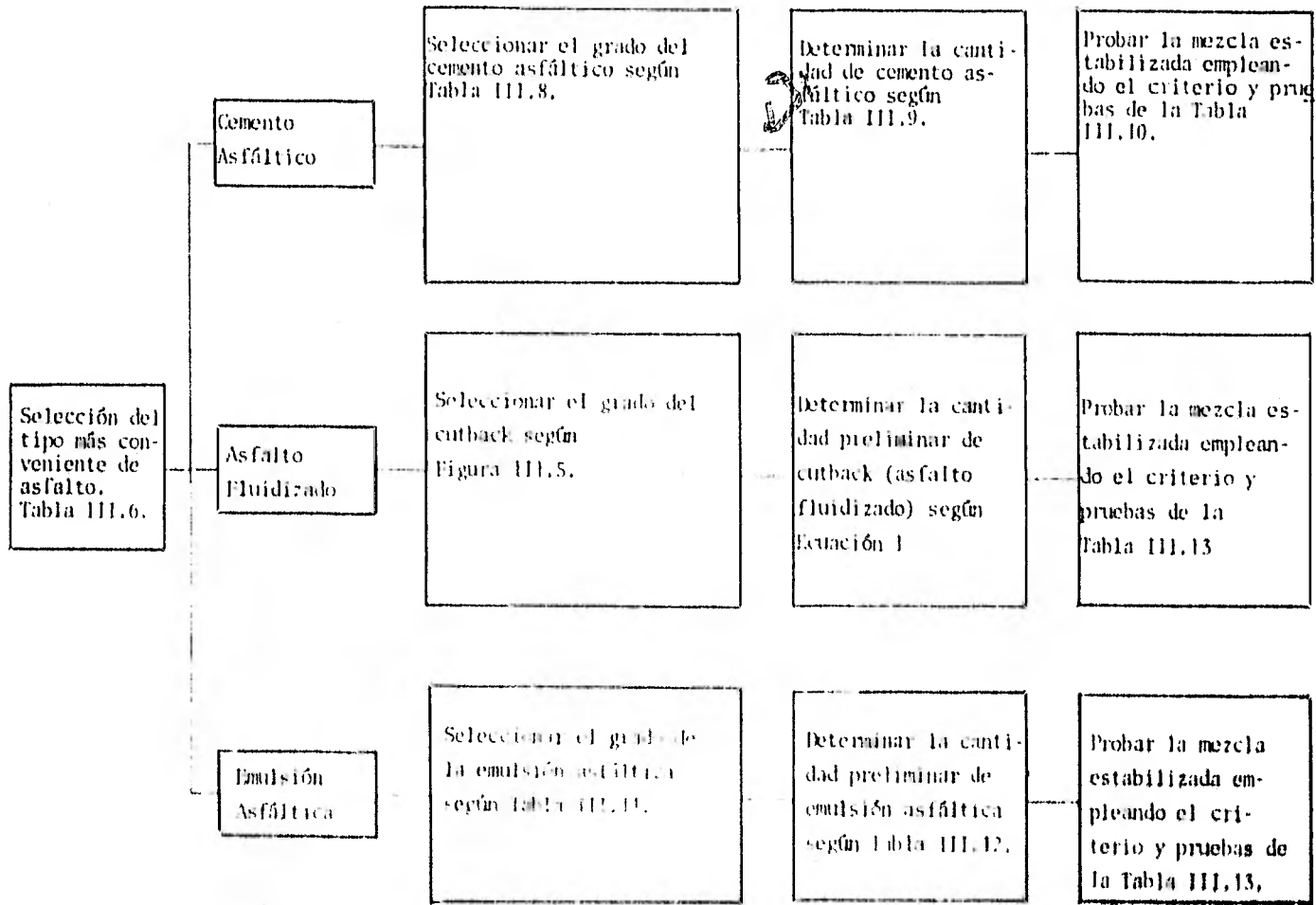
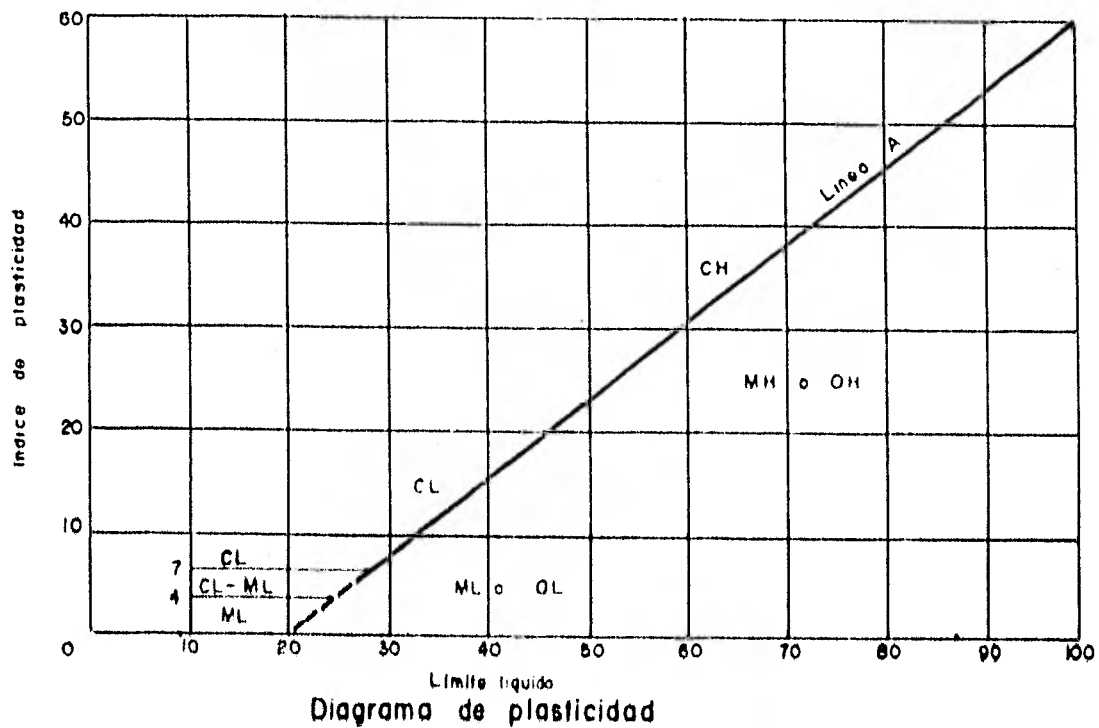


Figura III.8 - Subsistema para capas de base estabilizadas con asfalto.

Apéndice III.1 - Sistema unificado de clasificación de suelos (S U C S)

| Descripción | Símbolos de grupo | Criterios de laboratorio | | | | | |
|--|--|---|-----------|------------------------------|----------------------------|---|-----------------------------------|
| | | Finos % | Gradación | Plasticidad | Notas | | |
| Grano grueso (Más de 50% de tamaño mayor que la medida del tamiz No. 200 BS) | Gravas (Más de 50% de la fracción gruesa, de dimensión de grava) | Gravas bien escalonadas, gravas arenosas, con escasos finos o sin ellos | GW | 0-5 | $U > 1$ $1 < C_u < 3$ | Símbolos duales si los finos van de 5 a 12%. Símbolos duales si están sobre la línea A, y 4 PI 7 | |
| | | Gravas pobremente escalonadas, arenosas, con escasos finos o sin ellos | GP | 0-5 | No satisf. los requerim. | | |
| | | Gravas sedimentarias, gravas arenosas sedimentarias | GM | > 12 | | | Por debajo de la línea 'A' o PI 4 |
| | | Gravas arcillosas, gravas arenosas arcillosas | GC | > 12 | | | Por encima de la línea 'A' o PI 7 |
| | Arenas (Más de 50% de la fracción gruesa, de dimensiones de arena) | Arenas bien escalonadas, arenosas con grava, con pocos finos o sin ellos. | SW | 0-5 | $C_u > 6$ $1 < C_u < 3$ | | |
| | | Arenas pobremente escalonadas, arenosas con grava, con pocos finos o sin ellos. | SP | 0-5 | No satisf. los requerim. | | |
| | | Arenas sedimentarias | SM | > 12 | | | Por deb. de la línea 'A' o PI 4 |
| | | Arenas arcillosas | SC | > 12 | | | Por enc. de la línea 'A' o PI 7 |
| Grano fino (Más de 50% de tamaño menor que la medida del tamiz No. 200 BS) | Sedimentos y arcillas (límite líquido inferior a 50) | Sedimentos inorgánicos, arenas finas sedimentarias, arcill. con baja plastic. | ML | Usar diagrama de plasticidad | | | |
| | | Arcillas inorgánicas, sedimentarias, arenosas de baja plastic. | CL | Usar diagrama de plasticidad | | | |
| | | Sedimentos orgánicos y arcillas sediment. org. de baja plastic. | OL | Usar diagrama de plasticidad | | | |
| | Sedimentos y arcillas (límite líquido superior a 50) | Sedimentos orgánicos de alta plasticidad. | MH | Usar diagrama de plasticidad | | | |
| | | Arcillas inorg. de alta plastic. | CH | Usar diagrama de plasticidad | | | |
| | | Arcillas org. de alta plastic. | OH | Usar diagrama de plasticidad | | | |
| Suelos altamente org. | Turba y suelos alt. org. | TA | | | | | |

Apendice III 1-(a)



Apéndice III.2. Sistema AASHO de clasificación de suelos

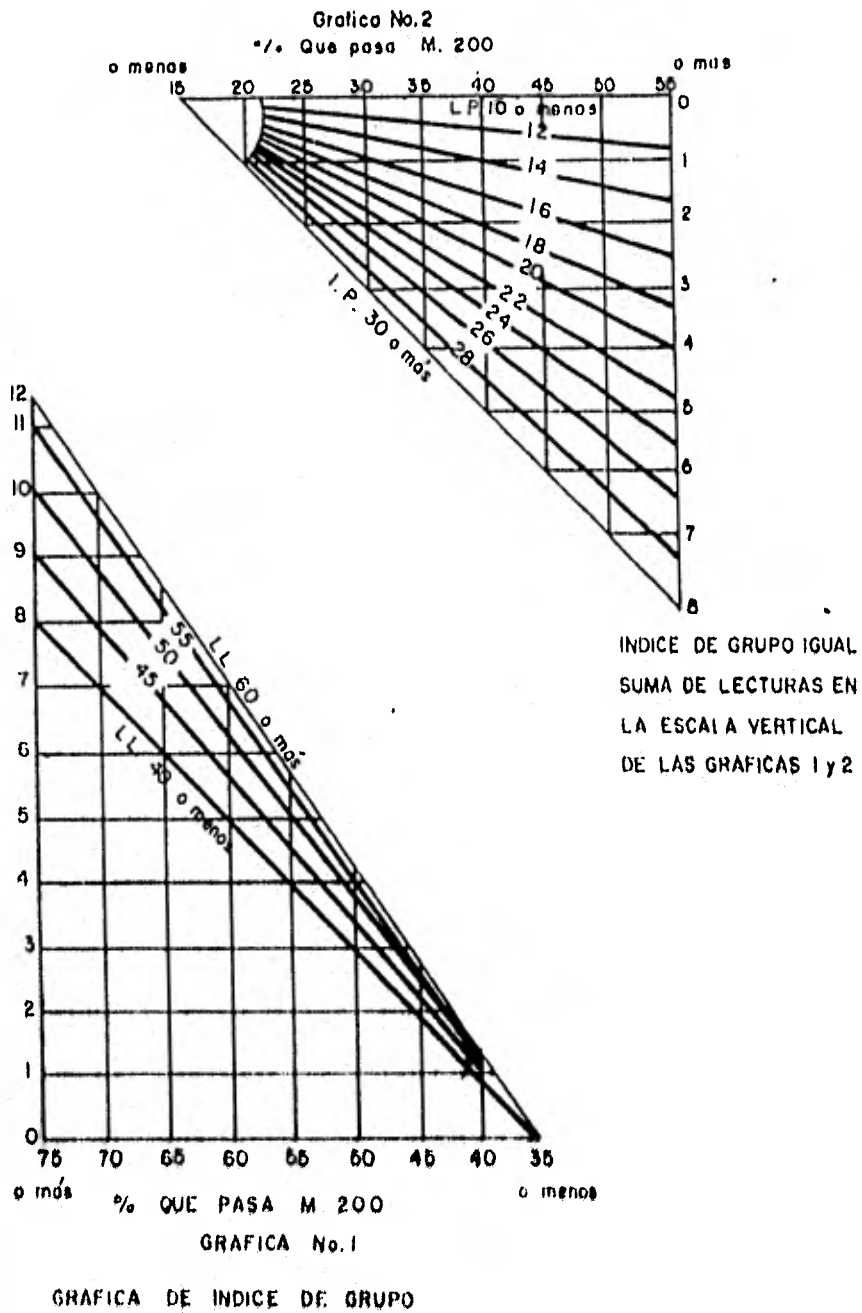
| Clasificación general | Suelos granulares (35% o menos pasa malla No. 200) | | | | | | Suelos arcillosos limosos (Más del 35% pasa malla No.200) | | | | |
|---|--|---------|------------|------------------------------|---------|---------|---|---------|---------|----------------|---------|
| Clasificación de grupo | A-1 | | A-3 | A-2 | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | |
| | A-1-a | A-1-b | | A-2-1 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | | A-7-6 A-7-5 | |
| Análisis granulométrico Porcentaje que pasa: | | | | | | | | | | | |
| Malla No. 10 | 50 max. | | | | | | | | | | |
| Malla No. 40 | 15 max. | 50 max. | 51 min. | | | | | | | | |
| Malla No. 200 | 50 max. | 25 max. | 10 max. | 35 max. | 35 max. | 35 max. | 35 min. | 36 min. | 36 min. | 36 min. | |
| Características de la fracción que pasa la malla No. 40 | | | | | | | | | | | |
| Límite Líquido | | | | 40 max. | 41 min. | 40 max. | 41 min. | 40 max. | 41 min. | 40 max. | 41 min. |
| Índice de Plasticidad | 0 max. | | no pres. | 10 max. | 10 max. | 11 min. | 11 min. | 10 max. | 10 max. | 11 min. | 11 min. |
| Índice de grupo | 0 | | 0 | 0 | | 4 max. | | 8 max. | 12 max. | 16 max. | 20 max. |
| Tipo de material constitutivo más importante | Fragmentos de piedra, grava y arena. | | Arena fina | Grava y arena fina o arcilla | | | | Limos | | Arcillas | |
| Clasificación como material de base. | Excelente o buena | | | | | | Aceptable o pobre | | | | |

75

Notas:

- El índice de plasticidad del sub-grupo A-7-5 es igual o menor a un límite líquido de 30.
- El índice de plasticidad del sub-grupo A-7-6 es menor a un límite líquido de 30.
- El índice de grupo debe ser indicado junto al número entero más próximo, entre paréntesis, después del grupo (A-2-6(3), A-4(5), etc.).
- El procedimiento de clasificación como los datos necesarios se obtienen de izquierda a derecha, la clasificación correcta de un suelo se obtendrá por eliminación, el primer grupo de izquierda entre dos iguales será la clasificación.

Apendice III.2(a).- Indice de grupo AASHO



CAPITULO IV

LA ESTABILIZACION CON CAL

- IV.1. Usos, interacción entre suelo y cal (fenómenos químicos y físicos).
- IV.2. Pruebas de laboratorio para determinar la cantidad óptima de cal.
 - A) Pruebas rápidas.
 - B) Pruebas normales.
- IV.3. Gráficas obtenidas por la práctica mexicana.

Usos de la cal.

La estabilización de la cal puede ser dividida en dos tipos principales:

Estabilización de sub-bases, incluyendo suelos de granos finos, suelos cohesivos y estabilización de bases, incluyendo material granular plástico (semejante a la arcilla con grava), que contiene menos del 50 por ciento de material que pasa la malla No. 40. Se podrá emplear cal de cualquier origen, no es recomendable el empleo de cales de baja calidad por sus resultados poco predecibles aunque en altos porcentajes funciona adecuadamente.

La cal viva es, por lo menos, tan efectiva como la hidratada, es raramente usada por el peligro de severas quemaduras de los operarios, particularmente en los días de viento. En Alemania, sin embargo, se emplea cal viva pulverizada en grandes proyectos de estabilización, una mayor disciplina en el personal da como resultado su empleo en forma segura y exitosa.

La cal puede ser aplicada seca o como una lechada compuesta del 30 al 33 por ciento de sólidos de cal, la aplicación de la lechada elimina el molesto polvo, siendo particularmente apropiada para calles y áreas populosas.

Una nueva técnica empleada en el mantenimiento de carreteras que incluye a la cal fue introducida por el Departamento de Carreteras de Oklahoma a principios de 1960, esta técnica es conocida como "estabilización por inyección" y es referido como un fenómeno de difusión iónica.

Los pavimentos flexibles que se han deteriorado debido a la falla de la base causada por la intrusión de arcillas plásticas inestables a nivel de base y/o la incrustación de los agregados gruesos de la base en la terracería durante prolongados períodos de humedad, el pavimento es reconstruido por medio de una inyección de cal hidratada a través de la estructura del camino a la capa de arcilla.

En cada sitio donde se inyecta cal aparece una fuerte columna que refuerza la base y seca la sub-base saturada, con lo anterior la estructura del pavimento tiene un mejor comportamiento.

Exactamente qué, en qué grado y qué tan extensa es la migración de los iones de calcio a través de la arcilla se desconocen, en efecto, en algunos proyectos experimentales posteriores revelaron que no había ocurrido la difusión e indicaban ineficiencia con ciertos tipos de arcillas particularmente impermeables, aún en semejantes casos se observó que la desintegración y arreglo del camino han sido detenidos con este tratamiento correctivo.

Este método se ha extendido basado en una tesis de ensaye y error y proporcionando una alternativa económica para el mantenimiento de carreteras.

Se ha empleado la inyección para estabilizar suelos con propósito semejante al de carreteras en cimentaciones de edificios, alrededor y bajo esta, donde el subsuelo expansivo produce asentamientos diferenciales o mayores que podrían en casos extremos presentar planos de falla; aumenta su uso la resistencia a la erosión y los deslizamientos de terraplenes cercanos a vías de agua y diques de irrigación.

El contenido de cal en la mezcla de estabilización disminuye los cambios de volumen ocurridos durante ciclos alternativos de saturación y secado.

En todas estas aplicaciones es la reacción de la cal y la arcilla la que provee de estabilidad, consolidación y resistencia que soportara la masa del suelo.

Durante el período de 1910 a 1930 hubo algunas aplicaciones de cal hidratada en pavimentos asfálticos, tanto en mezclas frías como calientes; fue empleado básicamente como un agente contra pérdida de agregados por la degradación del asfalto y como un relleno de los huecos pa

ra proporcionar el porcentaje necesario de finos para mejorar su densidad y granulometría.

Su uso a desaparecido ya que fue reemplazado por rocas calizas pulverizadas y otros rellenos minerales de bajo costo.

Influencia de las propiedades de los suelos en las reacciones Suelo-Cal y propiedades del suelo tratado.

El mejoramiento en las propiedades ingenieriles de una mezcla de suelo-cal son atribuidas a cuatro reacciones básicas, a saber: intercambio catiónico, floculación y aglomeración, carbonatación y una reacción puzolánica.

A continuación se expone una breve discusión sobre las reacciones básicas.

1. Intercambio catiónico.

Es el resultado de la atracción de iones con carga positiva (cationes) y la carga negativa de las partículas de arcilla.

El intercambio catiónico se presente generalmente en suelos con calcio, magnesio e hidrógeno, en presencia de sodio y potasio ocurre un intercambio limitado.

La adición de cal a un suelo suministra un exceso de iones de calcio (Ca^{++}) y el intercambio catiónico ocurrirá con el reemplazo de los cationes (Ca^{++}) del compuesto del suelo.

2. Floculación y aglomeración.

La mezcla de cal con un suelo de grano fino origina floculación y aglomeración de la fracción de arcilla.

Esta reacción resulta en un aparente cambio de textura, las partículas de arcilla forman grandes terrones. Después que esta reacción

haya tenido lugar, el suelo asume una textura un tanto limosa o arenoso que es muy evidente.

3. Carbonatación de la cal.

La cal reaccionará con el bióxido de carbono (CO_2) para formar agentes cementantes carbonatados relativamente débiles. La carbonatación de la cal no es una reacción conveniente puesto que reduce la cantidad de cal que puede intervenir en la muy importante reacción puzolánica.

4. Reacción puzolánica.

La reacción ocurre entre el silicato y/o alúmina del suelo y la cal para formar varios tipos de agentes cementantes. Los minerales arcillosos, cuarzo, feldspatos, micas y otros silicatos o minerales aluminio-silíceos en un suelo son posibles fuentes de silicato y alúmina. Extensas investigaciones han mostrado que la solubilidad de un suelo sílico es incrementado por el alto pH del medio ambiente (12.3), inducido en la mezcla del suelo-cal por la adición de la cal. Los agentes cementantes formados en la reacción puzolánica han sido identificados como silicatos de calcio hidratado y aluminato de calcio hidratado y son similares a los producidos por la hidratación del cemento Portland.

Deberá notarse que en contraste a algunos métodos corrientes de estabilización de suelos, el proceso del suelo-cal usa el suelo como un componente básico de el sistema de estabilización, puesto que el suelo es una parte integrante de el sistema, las propiedades del suelo significarán una influencia en la naturaleza y magnitud de las reacciones suelo-cal.

El intercambio catiónico, la floculación y la aglomeración tienen lugar dentro de un periodo de tiempo corto, algunos minutos, si la cal puede ser cuidadosamente mezclada con el suelo. No obstante, esta reacción no ocurrirá tan rápidamente si no es posible obtener una mezcla íntima. En algunas ocasiones, cal y suelo son mezclados

previamente y se dejan reposar de 24 a 48 horas permitiendo a las grandes estructuras de arcilla romperse. El curado del suelo-cal es susceptible de una mezcla adicional y una posterior manipulación para compactarse.

La carbonatación, que es indeseable, y la reacción puzolánica son dependientes. La reacción puzolánica es relativamente lenta en una temperatura normal (24°C) pero a altas temperaturas el proceso de la reacción es proporcionalmente mucho más rápida. Una típica relación resistencia-tiempo de curado es mostrada en la Figura IV.1. para una temperatura normal y una temperatura elevada. Aparentemente el campo de la temperatura en el curado y su duración deben ser consideradas cuidadosamente en trabajos de estabilización con cal.

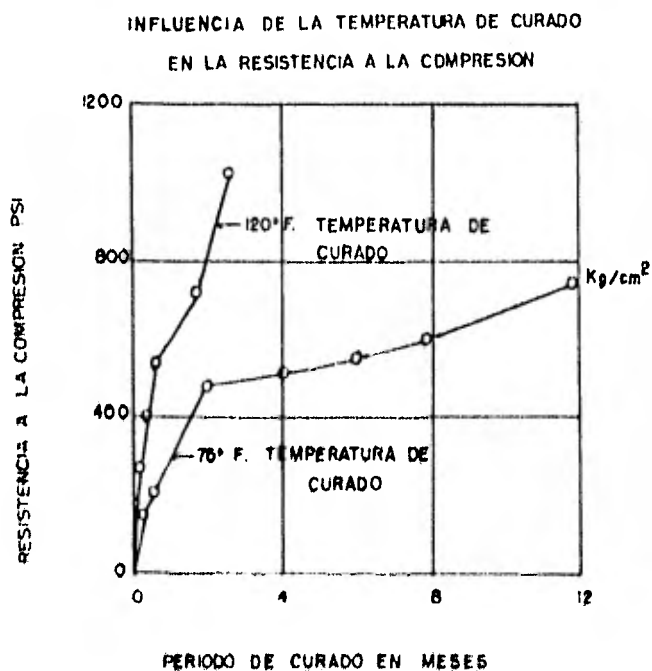


FIGURA IV.1

Propiedades del suelo-cal.

La mezcla suelo-cal muestra propiedades ingenieriles sustancialmente diferentes a las del suelo natural antes de su estabilización. Normalmente, estos marcados cambios son evidentes en tan importantes características como plasticidad, trabajabilidad, compactación, expansibilidad y resistencia.

a) Plasticidad y trabajabilidad.

La cal origina generalmente una marcada reducción en el índice plástico, un decremento en la contracción lineal y una mejor trabajabilidad. La influencia de la cal es mostrada en la Tabla IV.1. Los efectos benéficos del tratamiento con cal son bastante evidentes. Si bien la trabajabilidad no puede ser cuantificada, experiencias tanto en campo como en laboratorio han mostrado que la textura limosa y friabilidad de la mezcla del suelo-cal la hacen bastante trabajable y fácilmente manejable.

Los cambios en plasticidad y trabajabilidad son producidos por el intercambio catiónico, las reacciones de floculación y conglomeración. Estudios en laboratorio y experiencias en campo han demostrado que estas reacciones ocurrirán en mayor o menor grado con todos los suelos de grano fino. Consecuentemente el uso de cal en suelos de plasticidad variable y trabajabilidad no dependen mayormente de las propiedades químicas y mineralógicas del suelo. Sin embargo algunos factores tales como el tipo del mineral arcilloso y contenido de arcilla pueden influir en la cantidad de cal requerida para llevar a un grado satisfactorio la estabilización.

b) Compactación.

Las características de compactación del suelo son cambiadas por la cal, en las más de las ocasiones el peso volumétrico seco disminuye y la humedad óptima se incrementa 1 a 5 por ciento.

Tabla IV.1. Plasticidad del terreno natural y del suelo tratado con cal.

| Clasificación AASHO | 0% LL | Límites de Atterberg | | | | Límite de contracción | | | |
|------------------------|----------|----------------------|----------|-----------|----------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | | Cal IP | 3% LL | Cal IP | 5% LL | Cal IP | 0%Cal | 3%Cal | 5%Cal |
| A-7-6 | 53.1 | 28.8 | 47.9 | 21.4 | NP | NP | 12.5 | 41.9 | 43.8 |
| A-4 | 33.4 | 7.7 | NP | NP | -- | -- | 28.1 | 36.4 | 43.6 |
| A-7-6 | 54.2 | 32.5 | 46.7 | 7.4 | NP | NP | 12.9 | 30.6 | 55.0 |
| A-6 | 34.2 | 15.20 | NP | NP | -- | -- | 18.2 | 31.0 | 35.1 |
| A-7-6 | 54.4 | 30.8 | 44.1 | 10.4 | NP | NP | 17.1 | 36.3 | 40.8 |
| A-7-6 | 52.6 | 28.4 | 41.9 | 19.1 | NP | NP | 20.0 | 39.2 | 39.0 |
| A-7-6 | 62.6 | 33.7 | NP | NP | -- | -- | 22.6 | 41.7 | NC |
| A-6 | 31.9 | 10.1 | NP | NP | -- | -- | 28.9 | 35.7 | 55.2 |
| A-6 | 28.7 | 14.3 | NP | NP | -- | -- | 15.8 | 27.4 | 34.4 |
| A-7-6 | 49.3 | 26.9 | 51.1 | 13.7 | 58.1 | 11.0 | 17.5 | 31.2 | 35.3 |
| A-6 | 25.5 | 11.0 | NP | NP | -- | -- | 13.9 | 25.1 | 21.40 |

NOTA: NP No plástico
NC No cohesivo

c) Expansibilidad.

Las propiedades de expansibilidad de suelos de grano fino que contienen apreciables cantidades de arcilla son alterados por el tratamiento con cal. La expansibilidad la podemos determinar de los VRS de los ejemplos presentados en la Tabla IV.2. de suelos en estado natural y tratados con cal. Las características expansivas son sustancialmente reducidas, y con algunos pocos suelos, si no ninguno, se nota alguna expansión después de los 4 días de saturación para la prueba de VRS. El intercambio catiónico en el cual el ion Ca^{++} sustituye a los cationes existentes en el compuesto disminuyendo la afinidad de la arcilla a absorber agua e hincharse. En suma, los efectos de la reacción puzolámica del suelo-cal entre las partículas del suelo originan un todo capaz de restringir o limitar la expansión volumétrica.

d) Resistencia.

Los incrementos obtenidos en la resistencia, en la estabilización suelo-cal son bastante variables. Algunos suelos no reaccionan ni llevan incremento alguno en la resistencia, algunos otros muestran incrementos de algunos cientos por ciento. La Tabla IV.3. muestra resultados típicos de pruebas de compresión, es interesante notar que los incrementos en el porcentaje de cal no siempre producen un material más fuerte. En investigaciones se ha demostrado que la reacción puzolámica es la mayor fuente de los incrementos de resistencia notados en las mezclas suelo-cal. La extremada variabilidad de la resistencia ganada indica que la reacción puzolámica depende de la naturaleza y característica del suelo que será estabilizado. Dado que esta reacción necesita silicato y/o alúmina del suelo, es factor responsable de la relativa abundancia de éste el origen silicoso del suelo, como es factor catalizador o retardador de la disolución del silicato, de este origen influirá en los incrementos de resistencia obtenidos por el tratamiento con cal.

Tabla IV.2. Propiedades expansivas de suelos naturales y tratados con cal.

(a) porcentaje de expansión en la prueba VRS

| % Arcilla en el suelo | Suelo natural | 5% Cal |
|-----------------------|---------------|--------|
| 45.5 | 4.6 | -0.1 |
| 68.2 | 3.85 | 0.08 |
| 80.0 | 4.10 | 0.0 |
| 84.60 | 1.4 | 0.0 |
| 41.0 | 1.6 | -0.1 |

(a) Todos los especímenes fueron saturados por un período de 4 días.

Tabla IV.3. Resistencia a la compresión de suelos naturales y tratados con cal.

28 días de curado a 73°F, excepto el que se indique.

| Clasificación AASHO | Horizonte | Resistencia a la compresión psi | | | | | |
|------------------------|-----------|---------------------------------|-------------------|-----|-----|----|----|
| | | O ^(a) | Porcentaje de cal | | | | |
| | | | 3 | 5 | 7 | 9 | 15 |
| A-7-5 | A | 57 | 43 | 58 | 53 | 46 | 47 |
| A-7-6 | B | 81 | 201 | 212 | 193 | -- | -- |
| A-7-6 | A | 53 | 29 | 49 | 32 | 34 | 36 |
| A-7-6 | B | 68 | 186 | 152 | 146 | -- | -- |
| A-7-5 | A | 53 | 21 | 38 | 33 | 34 | 37 |
| A-7-6 | B | 98 | 89 | 110 | 110 | -- | -- |
| A-7-5 | A | 38 | 37 | 46 | 48 | 32 | 36 |
| A-7-5 | B | 70 | 109 | 114 | 112 | -- | -- |
| A-6 | C | 40 | 137 | 185 | 123 | -- | -- |
| A-6 | C | 73 | 153 | 171 | 116 | -- | -- |
| A-7-6 | C | 78 | 167 | 158 | 139 | -- | -- |
| A-6 | - | 51 | 150 | 186 | 143 | -- | -- |

(a) 7 días de curado.

En la gráfica IV.2. se muestra la relación entre el contenido de carbón orgánico (una medida de materia orgánica en un suelo) y el incremento de la resistencia a la compresión producido por el tratamiento con cal. Aparentemente el suelo con material orgánico afecto adversamente la resistencia producida por la reacción puzolánica. Un tratamiento con cal sobre el 15 por ciento en peso (ver Tabla IV. 3.) no produjo incremento adicional en la resistencia. El horizonte A del perfil de los suelos contiene generalmente cantidades apreciables de materia orgánica y consecuentemente, ellos no reaccionan normalmente con cal para tener grandes incrementos de resistencia. Esto no es un problema muy serio pues el horizonte A es quitado y no es usado como material de sub-base. Ciertos grandes grupos de suelos desarrollados bajo vegetación tipo pastizal contienen, también, grandes cantidades de materia orgánica en el horizonte B que impide la reacción del suelo-cal. Hasta ahora es posible que con ciertos perfiles de suelos sobre 50 a 80 centímetros, el horizonte A y B, no puedan ser mejorados con un tratamiento con cal.

La influencia del contenido de arcilla en la reacción puzolánica en un suelo con cal para sus incrementos en la resistencia es mostrada en la gráfica IV.3. El contenido de arcilla no influye sustancialmente la reacción, con suelos de alto e intermedio contenido de arcilla reacciona satisfactoriamente.

Es necesario hacer hincapié en que una cantidad de arcilla presente en un suelo proveerá una adecuada fuente de silicato y/o alúmina para la reacción puzolánica.

El grado de acidez (pH) es un indicativo del estado de intemperización del suelo, un pH bajo de 4 a 5, indica un alto grado de intemperización y un valor alto de pH es característica de un material ligero o moderadamente intemperizado. La relación entre la acidez del suelo y la actividad de la cal es mostrada en la gráfica IV.4. El suelo con alto pH (aproximadamente 7) nos muestra mayores incre-

INCREMENTO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION PSI.

FIGURA IV. 2.

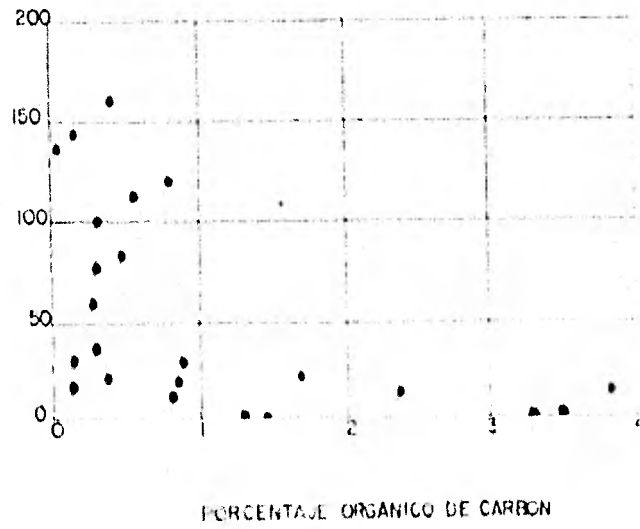
EFECTOS DEL CONTENIDO ORGANICO DEL CARBON
EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION.

FIGURA IV. 3

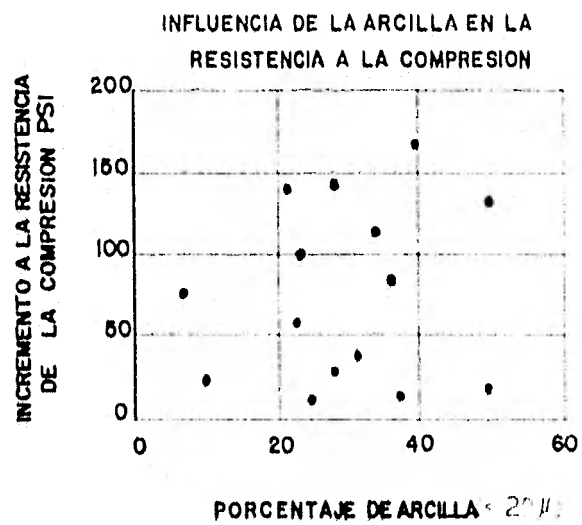
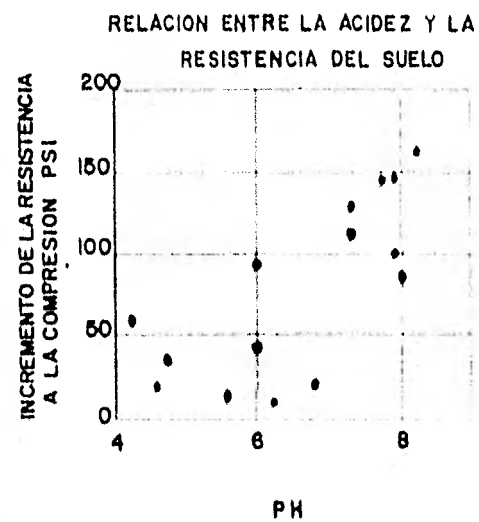


FIGURA IV. 4



mentos de resistencia que un suelo con pH bajo, sugiriendo una asociación entre el grado de intemperización de un suelo y la actividad de la cal. Todos los materiales de origen calcáreo no son intemperizables y reaccionan muy bien con cal si contienen algo de arcilla.

En los horizontes B estudiados con drenaje deficiente son generalmente muy activos con la cal, pero los perfiles con buen drenaje no reaccionaron tan bien; muchos de los problemas del suelo están localizados en sitios con un drenaje deficiente y por consiguiente son descablos por ser dóciles al tratamiento con cal.

En la anterior exposición se enfatizó el papel de las propiedades naturales del suelo en la reacción puzolánica de un suelo-cal. Es posible que en algunos suelos la influencia de estas propiedades puedan operarse simultáneamente, porque de esta posibilidad es la dificultad de diferenciar o evaluar cualitativamente la importancia de cualquiera de éstas.

Una propiedad más de una base o sub-base estabilizada con cal es la barrera que forma para el agua tanto la que proviene del exterior como la capilar por sus cualidades impermeables.

IV.2. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD OPTIMA DE CAL.

A) Pruebas rápidas.

-En función del pH

El pH de una solución es la medida de su acidez o alcalinidad, expresada en términos cuantitativos en una escala que va de 0 a 14. Un pH de 7 corresponde a una solución neutral, las soluciones inferiores a 7 son aquellas de tipo ácido y las mayores a 7 son soluciones de tipo básico presentando una textura jabonosa.

La acidez es una función de la presencia de iones de hidrógeno o iones de hidróxido, así tenemos que, a mayor concentración de iones

menor será la acidez.

a) Equipo necesario:

1. Medidor de pH (Corning Modelo 610 A)
2. Electrodo medidor de pH de vidrio
3. Electrodo de referencia
4. Solución de muestra

b) Procedimiento de prueba.

1. Calibrar el medidor de pH.
2. Secar a menos de 60°C el material que se vaya a emplear y tomar muestras de 20 g. (10.1g) que pasen la malla 40 sin romper granos naturales. Colocar las muestras en botellas de plástico con tapa.
3. Se incorporará cal a las muestras en diversas proporciones en peso (2, 4, 6, 8, 10 por ciento).
4. Añadir agua destilada hasta 100 mililitros.
5. Agitar la botella hasta que no quede material seco en el fondo por un período mínimo de 30 segundos.
6. Agitar la botella 30 segundos cada 10 minutos.
7. Realizar las mediciones de pH con una muestra tomada de la botella después de transcurrida una hora.
8. El porcentaje óptimo de la cal será el que mantenga el pH en 12.3.

-En función de la resistencia a la compresión axial sin confirmar.

a) Equipo necesario:

1. Molde de compactación (Proctor estandar)
2. Pison metálico (Proctor estandar)
3. Regla metálica con arista cortante de 25 cm.
4. Horno con temperatura graduable.
5. Charolas de lámina
6. Probeta graduada de 500 cm³
7. Malla No. 100

b) Procedimiento de prueba:

1. Se procederá a secar el material con una temperatura menor a 60°C.
2. Se muestreará el material que pase la malla No. 100, sin romper granos naturales.
3. Mezclar perfectamente el suelo y la cal en seco hasta tener una mezcla uniforme (diferentes porcentajes de cal en peso 2, 4, 6, 8, 10 por ciento).
4. Agregar agua destilada hasta alcanzar la humedad óptima (previamente determinada).
5. Hacer especímenes en moldes Proctor compactados según norma AASHTO estandar, uno por cada porcentaje de cal.
6. Extraer los especímenes de los moldes y meterlos en recipientes sellados.
7. Secar los especímenes a una temperatura de 60°C durante 72 horas.
8. Probar los especímenes a la compresión sin confinar a una velocidad de 1.27 mm/min (o.5"/min).
9. La cantidad óptima será la que presente una resistencia previamente determinada para la capa del pavimento del que se trate, en este caso es por ser una sub-base de suelo-cal de 7.5 Kg/cm² (100 lb/in²), este resultado se puede observar en la Figura IV.5.

B) Pruebas normales.

-En función del Valor Relativo de Soporte (V.R.S.) (Prueba de California o Porter).

El objeto de esta prueba es determinar la calidad de los suelos en cuanto a valor de soporte se refiere, midiendo la resistencia a la penetración del suelo compactado y sujeto a un determinado período de saturación,

a) Equipo necesario.

1. Un molde cilíndrico de compactación de las siguientes características: diámetro interior 15.75 cm (6.2") y una altura de 20.32 cm (8"), provisto de una base con dispositivo para sujetar el cilindro.
2. Una máquina de compresión con capacidad mínima de 30 toneladas y una aproximación en las lecturas de ± 10 Kg para cargas bajas.
3. Una varilla metálica de 1.9 cm (3/4") de diámetro y 30 cm de longitud con punta de bala.
4. Una placa circular para compactar con un diámetro de 15.05 cm (ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro), que pueda sujetarse a la cabeza de aplicación de la carga.
5. Una placa circular perforada con un bastago desplazable colocado en el centro, sobre el cual se apoyará el pie del extensómetro.
6. Un tripie metálico para sostener el extensómetro durante la saturación.
7. Un tanque de lamina o mamposteria de 30 cm de altura.
8. Dos placas de carga con un diámetro ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro con un orificio central de 5.02 cm (2") y un peso de 6 Kg (13lb).
9. Un cilindro de acero para la prueba de penetración con una sección de 19.35 cm².
10. Un extensómetro de carátula graduado en milésimos de pulgada y con carrera de 2.54 cm (1").
11. Dos mallas del No. 4 una y la otra de 2.54 cm (1").
12. Una balanza de 10 Kg de capacidad mínima y sensibilidad de 1 g.
13. Una balanza con sensibilidad de 0.01 g.
14. Cápsulas de porcelana.
15. Un horno con temperatura constante, comprendida entre 100-110°C.
16. Charolas de lamina galvanizada.
17. Una probeta de 500 cm³.
18. Hojas de papel filtro de 15.7 cm de diámetro.

b) Procedimiento de prueba.

La prueba consiste en medir la resistencia a la penetración de un espécimen compactado a la humedad óptima, con una carga unitaria de 140.6 Kg/cm^2 , aplicada con una máquina de compresión, después de haber sido saturada en agua hasta lograr su máxima expansión. La humedad óptima de compactación se determinará en la forma que a continuación se describe y los pasos necesarios para verificar la prueba se detallan a continuación:

1. La humedad óptima de compactación es la cantidad de agua requerida por un suelo para alcanzar su peso volumétrico seco máximo, cuando es compactado con la carga unitaria de 140.6 Kg/cm^2 . Para determinar el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima se procederá de la siguiente manera:

De una muestra de campo, preparada con el cuidado de secar el material únicamente lo necesario para facilitar su disgregación, tómesese y cribese una cantidad suficiente para obtener una porción de 16 Kg de material que pase la malla de 2.54 cm (1"). Divídase esta porción mediante cuarteo en fracciones representativas con pesos iguales.

Se procederá a incorporar cierta cantidad de agua, cuyo volumen se anotará, a una de las fracciones del suelo previamente obtenida y una vez lograda la distribución homogénea de la humedad se colocará en 3 capas dentro del molde de prueba y a cada una de ellas se le darán 25 golpes con la varilla metálica, al terminar de colocar la tercera capa se compactará el material aplicando carga uniforme y lentamente, de modo que se alcance una carga de 140.6 Kg/cm^2 en un periodo de 5 min., carga que se mantendrá durante un minuto e inmediatamente se procederá a descargar el espécimen lentamente durante el siguiente minuto. Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad del espécimen es inferior a la

óptima, a otra fracción de la muestra se le adicionará una cantidad de agua igual a la del espécimen anterior más 80 cm³ y se repetirá el proceso anteriormente descrito. Si al aplicar la carga máxima se observa humedecimiento en la base del molde por haberse iniciado la expulsión de agua, el material se encontrará con una humedad ligeramente mayor que la óptima de compactación. Para fines prácticos es conveniente considerar que el espécimen se encuentra con su humedad óptima cuando se inicia el humedecimiento de la base del molde. Una vez obtenida la humedad óptima se medirá la altura del espécimen restando la altura total del molde y con este dato se calculará el volumen del espécimen, se pesará este con el molde de compactación y se calculará el peso volumétrico húmedo con la siguiente expresión:

$$Y_w = \frac{P_i - P_t}{V}$$

Donde: Y_w - Peso volumétrico húmedo
 P_i - Peso del espécimen húmedo más peso del molde
 P_t - Peso del molde
 V - Volumen del espécimen

A continuación se extraerá el espécimen del molde y se secará, teniendo cuidado de no perder material en la manipulación, a una temperatura constante de 100° a 110°C hasta peso constante. Se dejará enfriar el material y se pesará nuevamente para calcular la humedad, utilizando la expresión:

$$W = \frac{P_i - P_t - P_s}{P_s} \times 100$$

Donde: W - Contenido de humedad
 P_s - Peso seco
 P_i - Peso del espécimen húmedo más peso del molde
 P_t - Peso del molde

El peso volumétrico seco se calculará con la expresión:

$$Y_s = \frac{Y_w}{100 + W} \times 100$$

Donde: Y_s - Peso volumétrico seco

Y_w - Peso volumétrico húmedo

2. Al espécimen correspondiente a las condiciones de peso volumétrico seco máximo y humedad óptima, se le colocará 1 ó 2 hojas de papel filtro en la cara superior así como la placa perforada y las placas de carga y se introducirá en el tanque de saturación. Sobre los bordes del molde se colocará el tripie con el extensómetro, anotándose la lectura inicial de éste. Se mantendrá el espécimen dentro del agua y se harán lecturas diarias del extensómetro. Cuando se observe que cesa la expansión deberá anotarse la lectura final del extensómetro y se retirará del tanque de saturación.

3. La diferencia de lectura final e inicial del extensómetro expresada en milímetros del espécimen, antes de sujetarlo a la saturación y este cociente multiplicado por 100 expresará el valor de la expansión.

$$\frac{\text{Lectura final} - \text{Lectura inicial}}{\text{Altura del espécimen}} \times 100$$

4. El molde con el espécimen que fue retirado del tanque de saturación, se le retirará el tripie y el extensómetro y con todo cuidado se acostará sin quitar las placas, dejándolo en esta posición durante 3 minutos para que escurra el agua.

5. Se llevará el espécimen a la prensa, se retirarán las placas y el papel filtro y se colocarán nuevamente las 2 placas de carga.

El cilindro de acero para la prueba de penetración deberá pasar a través de los orificios de las placas, hasta tocar la superficie de la muestra; se aplicará una carga inicial que no sea mayor de 10 Kg e inmediatamente después, sin retirar la carga, se ajustará el extensómetro de carátula para registrar el desplazamiento vertical del cilindro y se procederá a la aplicación de cargas en pequeños incrementos continuos, procurando que la velocidad de desplazamiento del cilindro sea de 1.25 mm/min y se anotarán las cargas correspondientes a cada una de las 7 penetraciones indicadas en el siguiente cuadro:

| Tiempo Min. | Penetraciones Pulgadas; m.m. | |
|----------------|---------------------------------|-------|
| 1 | 0.050 | 1.27 |
| 2 | 0.100 | 2.54 |
| 3 | 0.150 | 3.81 |
| 4 | 0.200 | 5.08 |
| 6 | 0.300 | 7.62 |
| 8 | 0.400 | 10.16 |
| 10 | 0.500 | 12.70 |

Una vez terminada la prueba deberá observarse el aspecto que presenta el material en el sitio en que se hizo la penetración y medirse el espesor del material afectado por el agua durante la saturación para tener una idea del peligro que puede representar la presencia de agua en exceso en el material una vez colocado en la obra.

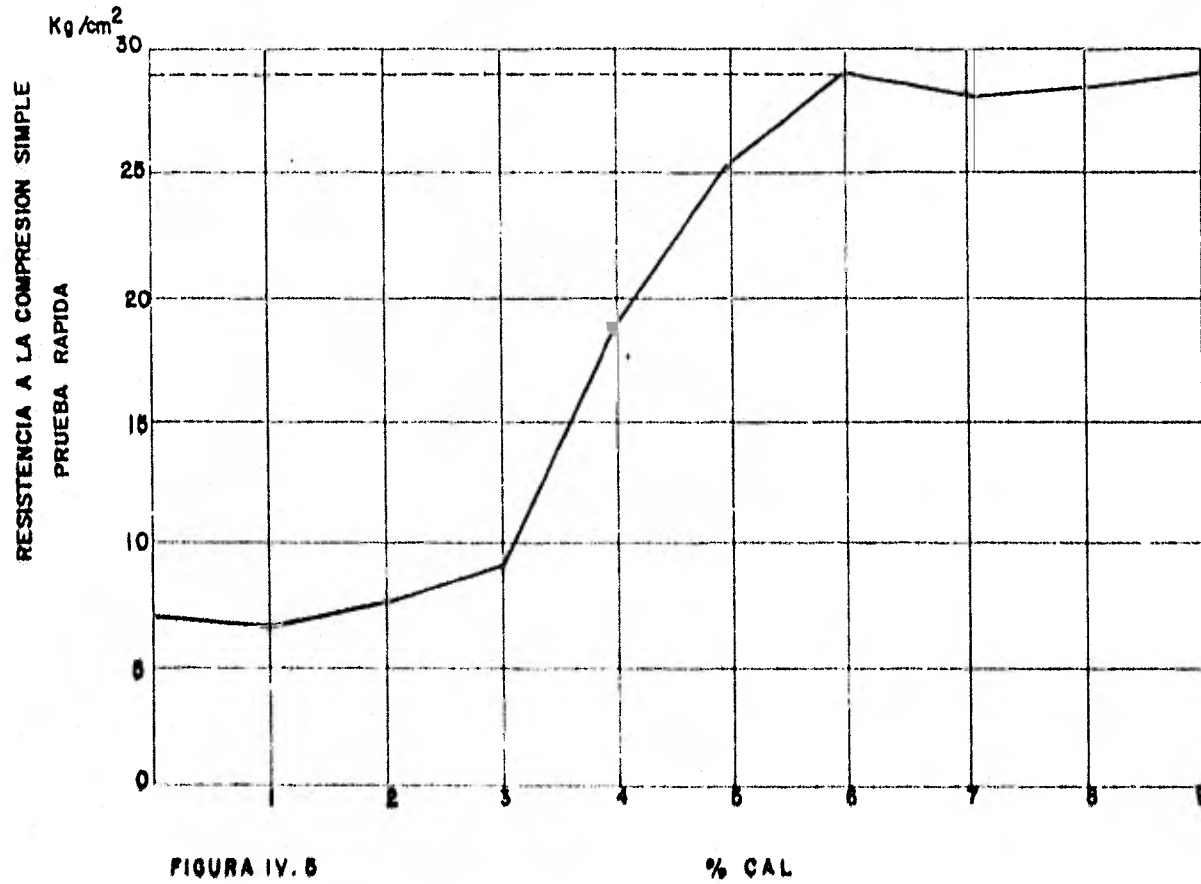
6. La carga registrada para la penetración de 2.54 mm se deberá expresar como un porcentaje de la carga estandar de 1300 kg y si la prueba estuvo bien ejecutado, el porcentaje así obtenido es el Valor Relativo de Soporte (VRS) correspondiente a la muestra ensayada. Con el fin de revisar los resultados

de la prueba se graficará la curva carga-penetración anotando en las abscisas las penetraciones y en las ordenadas las cargas registradas para cada una de las penetraciones, si esta curva presenta irregularidades muy notorias se repetirá la prueba y si tiene una concavidad hacia arriba al inicio de las penetraciones se corregirá de la siguiente manera:

Dibujese una tangente a la curva en el punto de máxima pendiente (punto a), hasta cortar el eje de las abscisas en el punto b, que se tomará como nuevo origen, marquense los puntos c, d y e, que se tomaron como las penetraciones de 2.54, 5.08 y 7.62 mm respectivamente; por lo tanto, las ordenadas c'c, d'd y e'e representarán las cargas corregidas para dichas penetraciones. El Valor Relativo de Soporte de la muestra será el calculado con el valor de la ordenada c'c, expresado como porcentaje de la carga estandar de 1360 Kg, ver la Figura IV.6. y Figura IV.6'.

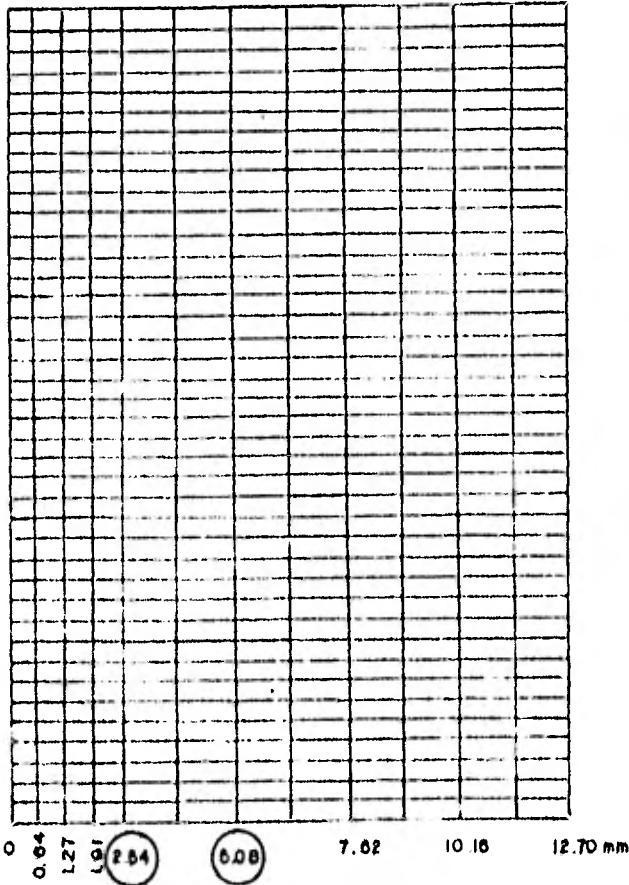
Con el resultado obtenido en esta prueba se clasificará el suelo usando la siguiente Figura IV.7. que indica el empleo que puede darse al material de acuerdo con su VRS.

OBTENCION DEL OPTIMO DE CAL HIDRATADA
CON LA PRUEBA RAPIDA DE COMPRESION



Kg/Cm²

PRESION EN EL PISTON DE PENETRACION



PENETRACION

CORRECCION AL VALOR SOPORTE:

SI LA CURVA TIENE IRREGULARIDADES O CONCAVIDAD HACIA ARRIBA, SE CORRIJE PROLONGANDO LA TANGENTE A LA CURVA EN EL PUNTO DE CAMBIO DE CONCAVIDAD, Y LA INTERSECCION DE LA TANGENTE CON EL EJE DE LAS ABCISAS, MARCA EL NUEVO ORIGEN DE MEDIDA DE LA PENETRACION CON EL NUEVO EJE DE REFERENCIA SE OBTIENE EL VALOR SOPORTE CORREGIDO.

FIGURA IV. 6'

PRUEBA DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE

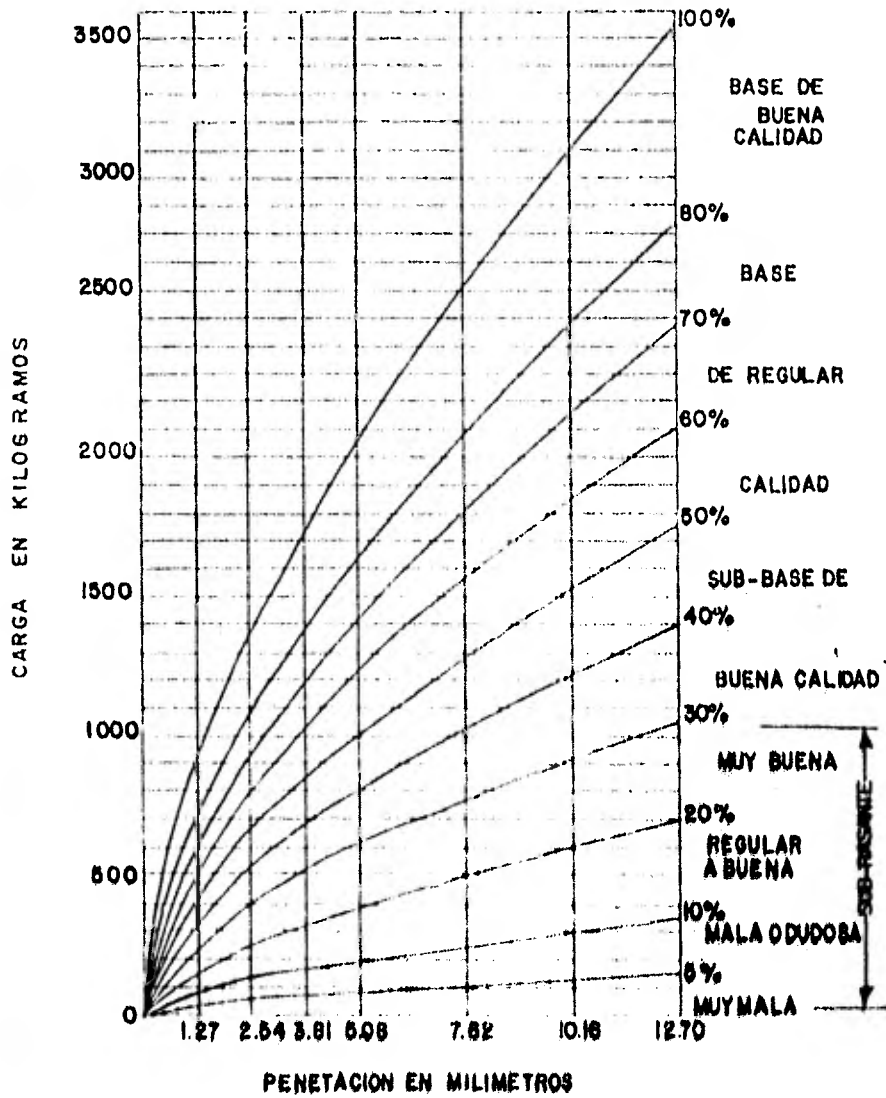


FIGURA IV. 7

SUELOS ARCILLOSOS, MODIFICACION A LOS
LIMITE DE ATTERBERG CON CAL HIDRATADA

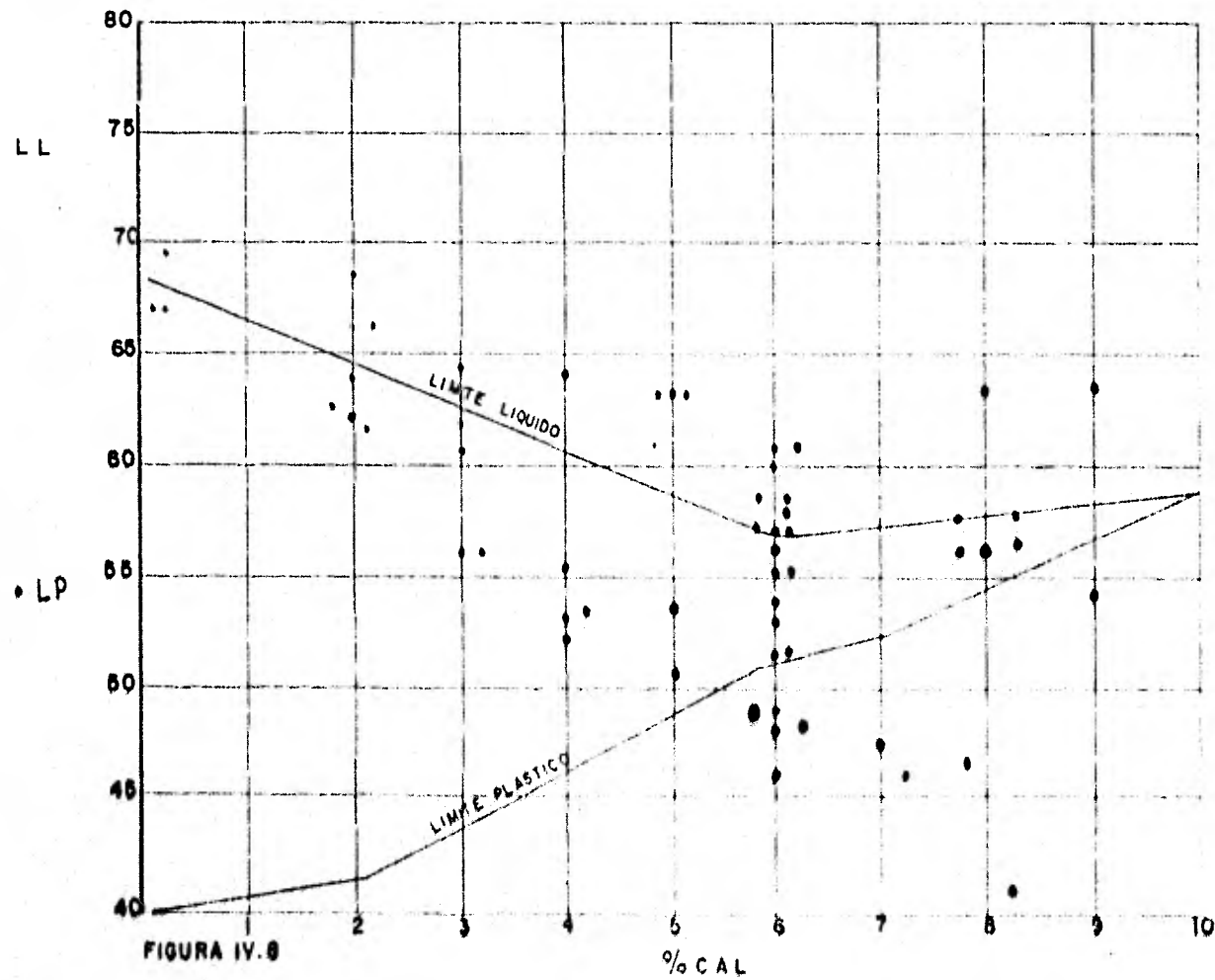
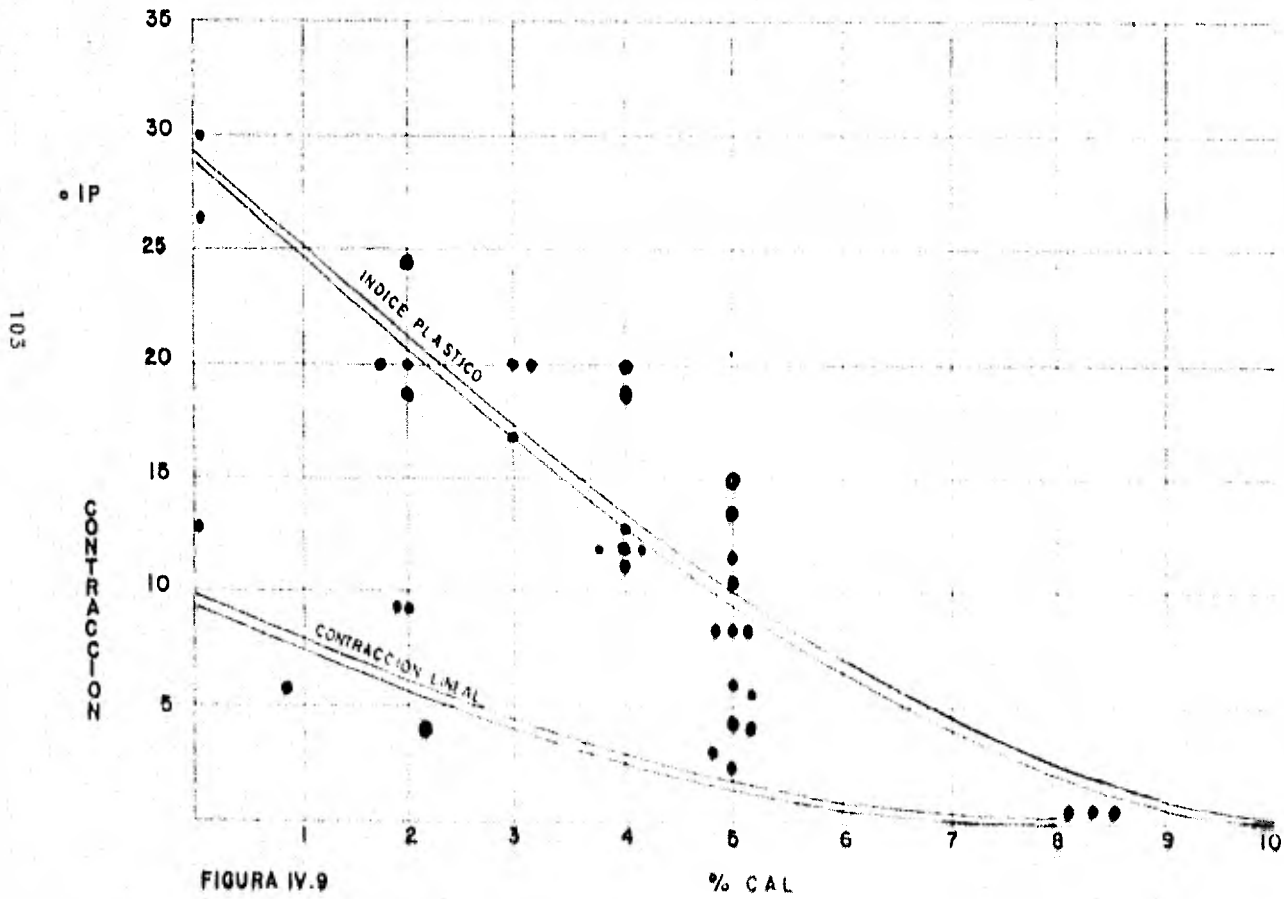


FIGURA IV. 8

102

SUELOS ARCILLOSOS, MODIFICACION AL INDICE PLASTICO
Y A LA CONTRACCION CON CAL HIDRATADA



SUELOS ARCILLOSOS MODIFICADOS CON CAL HIDRATADA

OBSERVACIONES

ESPECIMEN SATURADO •
ESPECIMEN SIN SATURAR •

1- A IGUAL EDAD MAYOR RESISTENCIA CON MAYOR CANTIDAD DE CAL
2- AUMENTO DE LA RESISTENCIA CON EL TIEMPO
3- DISMINUYE LA RESISTENCIA AL SATURAR

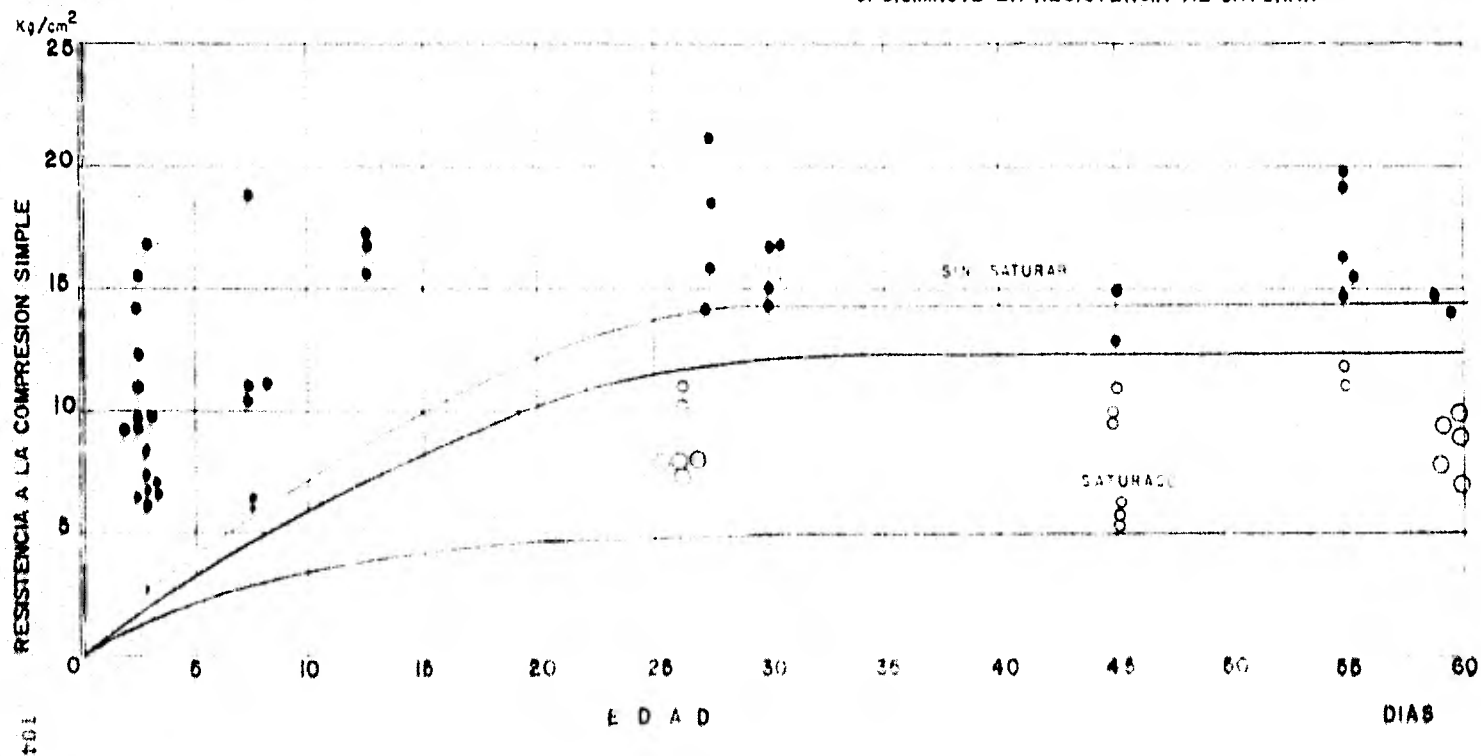
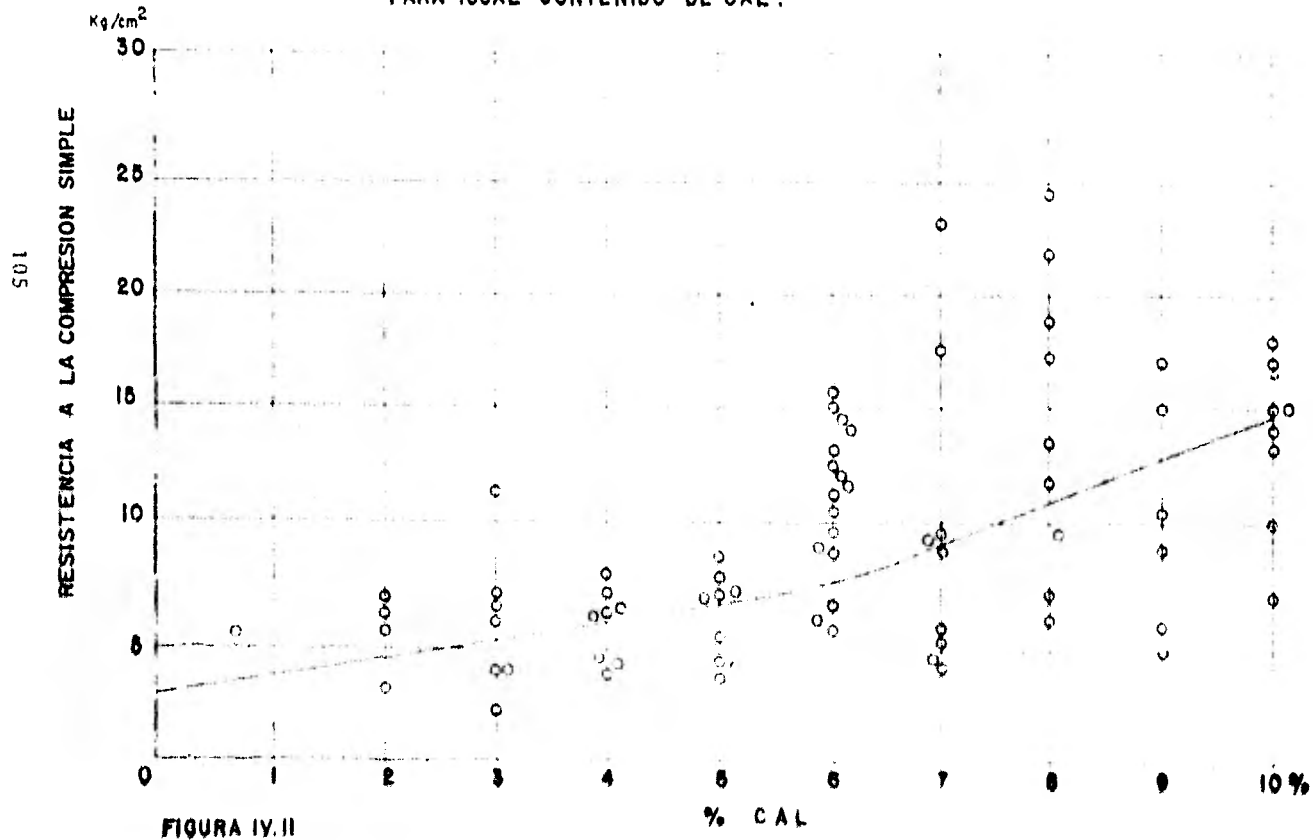


FIGURA IV. 10

SUELOS ARCILLOSOS MODIFICADOS
CON CAL HIDRATADA

- OBSERVACIONES: 1: AL AUMENTAR LA CAL AUMENTA LA RESISTENCIA
2: LOS ESPECIMENES SATURADOS TIENEN MENOR RESISTENCIA QUE LOS NO SATURADOS
3: SE MARCA UNA TENDENCIA A AUMENTAR LA RESISTENCIA CON LA EDAD
PARA IGUAL CONTENIDO DE CAL.



SUELOS ARCILLOSOS MODIFICADOS CON
CAL HIDRATADA

OBSERVACIONES:

1. EL VRS AUMENTA CON LA EDAD
2. PARA IGUAL EDAD EL VRS AUMENTA CON EL % DE CAL
3. LAS MUESTRAS SATURADAS DAN MENOR VRS QUE LAS
NO SATURADAS EN IGUAL DE CONDICIONES

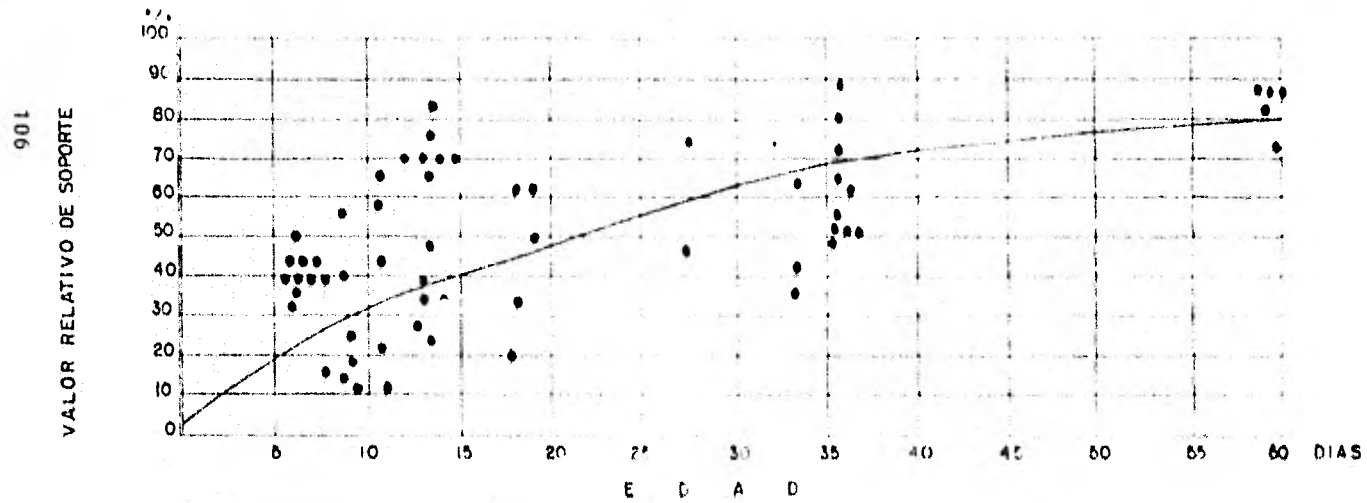
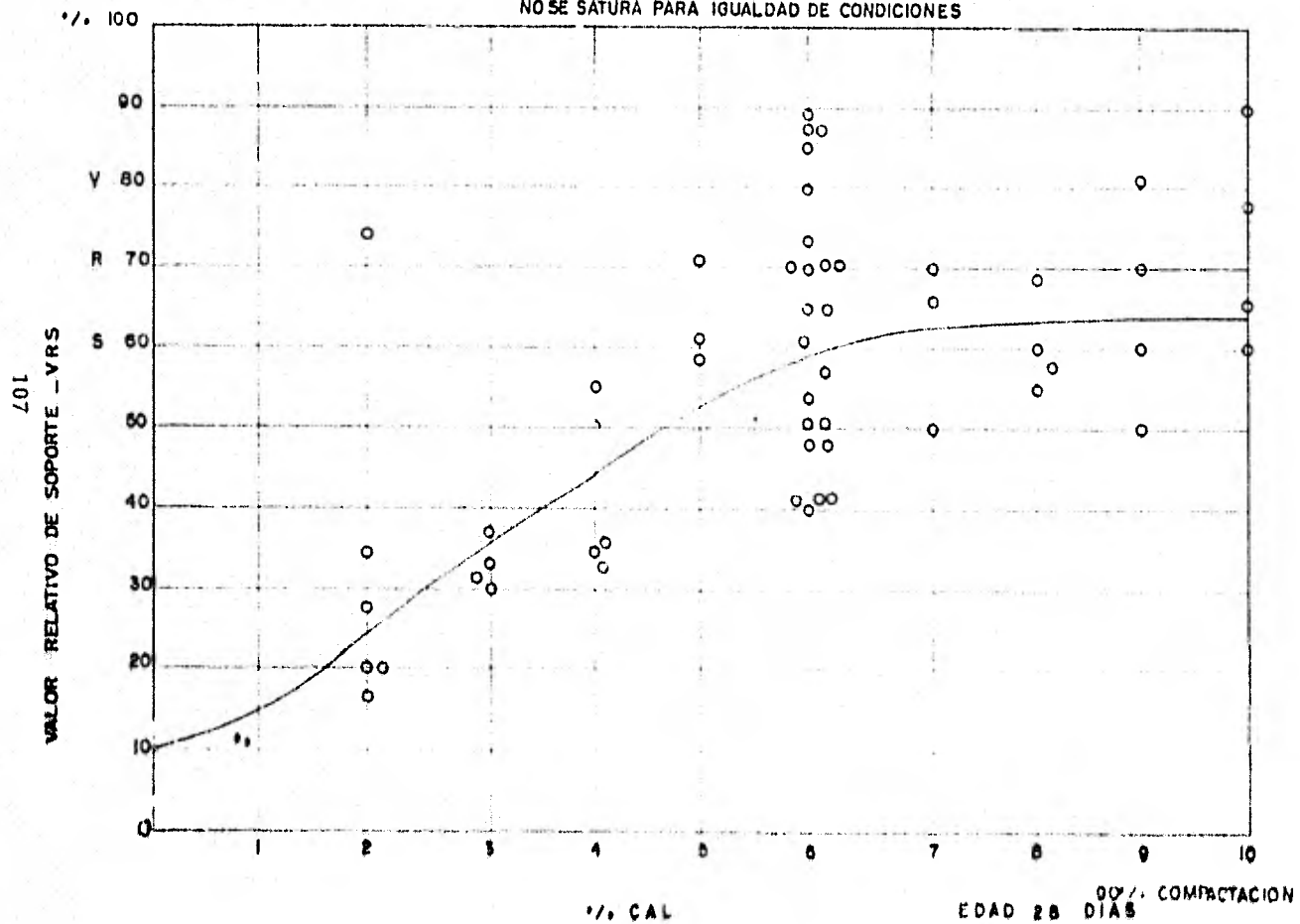


FIGURA IV.12

SUELOS ARCILLOSOS MODIFICADOS CON CAL HIDRATADA

- OBSERVACIONES:
- 1: A MAYOR % DE CAL EL V.R.S AUMENTA
 - 2: PARA IGUAL % DE CAL EL V.R.S AUMENTA CON LA EDAD
 - 3: EL V.R.S DE UNA MUESTRA SATURADA ES MENOR QUE CUANDO NO SE SATURA PARA IGUALDAD DE CONDICIONES

FIGURA IV. 13.



CAPITULO V

DISEÑO DE PAVIMENTOS

-Con suelo estabilizado

-Con capas de material graduado

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.

Guía de Diseño:

Existen varios métodos para diseñar pavimentos, los que son adecuados cuando se encuentran en manos de personal hábil que seguramente no sobrevvalorará la eficiencia de éstos. Generalmente están formulados a través del sistema de capas "pastel" donde intensionalmente cada capa disminuye en resistencia y ocupando un sitio más profundo, de semejante capa se prevendrá su sobrefatigado. Este trabajo es muy bueno hasta que aparecen los problemas de durabilidad, bombeo, drenaje deficiente, cambios de volumen, congelamiento, penetración, etc. A pesar de estas circunstancias, la mayoría de los métodos de diseño son adecuados a una o más de las categorías generales siguientes:

1. Comparación de las características de resistencia del suelo con la capacidad de carga que la experiencia ha mostrado que el material posee.
2. Comparación de las características de resistencia del suelo con el esfuerzo producido con cargas móviles (generalmente empleando las cargas producidas por tránsito pesado o aeroplanos).
3. Deflecciones características de pavimentos existentes como relación a fallas de pavimentos.
4. Empleo de números y coeficientes estructurales en el material.
5. Sistema de análisis donde todo dato pertinente, incluyendo el mayor número posible de factores, alimenta un programa de computadora que investigará un diseño óptimo. Este es el método más racional hasta ahora concebido, pero este requerirá de años de implementación de varios factores antes de su perfeccionamiento.
6. Un método implementado en computadora incluirá:
 - a) Comparación de las características de resistencia del suelo con condiciones de esfuerzo de cargas móviles en varios niveles.
 - b) Capacidad de las capas de la estructura de soportar tanto cargas pesadas como repetitivas.
 - c) Reducción de espesores cuando la resistencia a la tensión de las capas del pavimento se incrementan.
 - d) Espesor mínimo de la carpeta asfáltica.

El criterio de diseño que será presentado aquí es lo más apegado posible al método anterior, los otros 5 métodos no serán comentados. Este método es uno de los que puede ser empleado en la actualidad incorporándole una gran variedad de métodos de prueba y estudios de tránsito.

Resumiendo, este método hace posible cumplir lo siguiente:

1. Emplear el Promedio Diario de Tránsito (Average Daily Traffic, ADT) que estima tanto las cargas pesadas que causan fallas por cortante así como el número de repeticiones de la carga que causará las fallas de cortante y/o de fatiga.
2. Por el empleo de datos de tránsito y alguno de los métodos de resistencia, el diseño del espesor de base y sub-base puede ser elegido por aquel que soportará adecuadamente las cargas móviles y se definirá un número equivalente de repeticiones de carga en ejes sencillos de 18 Kip durante la vida útil del pavimento.
3. Obteniendo una base de alta calidad con 5 - 8 pulgadas de espesor (12.5 - 20cm) se podrá emplear en su diseño tanto capas estabilizadas como agregados triturados controlándolos con un programa de pruebas de estabilidad.
4. De la información del estudio de tránsito y la calidad del material de base se determinará el espesor mínimo de la capa de concreto asfáltico.

Se notará que el método de diseño de espesores es únicamente una guía para condiciones promedio y no intenta desplazar un buen juicio ingenieril y el conocimiento de las condiciones locales y los materiales.

Procedimiento de diseño.

1. Determinación de la resistencia del suelo de acuerdo con alguna de las siguientes pruebas:

- Valor-R por los métodos AASHO T 190 ó ASTM 2844
- Valor Relativo de Soporte (VRS) por los métodos AASHO T 193 ó ASTM 1883
- Prueba Triaxial de Resistencia por el método AASHO T 212

2. Una vez determinado el paso 1. en la Figura V.1. se obtendrá el número de diseño (DVN). Si la resistencia triaxial es conocida, en la proyección elevada de la curva triaxial, a un ángulo de 45° hasta intersectar la línea diagonal, se procede verticalmente hasta obtener el DVN. Si únicamente el VRS esta dado, se procederá horizontalmente hasta la curva triaxial y se procederá de la misma manera que antes; si conocemos el Valor-R, se procederá verticalmente hasta la curva triaxial y proyectaremos de la manera antes descrita.

Si no están disponibles los valores de resistencia y la terracería contiene más del 70 por ciento de cementante (material menor a la malla No. 40) y no es altamente orgánica, se podrá usar una constante del suelo para estimar el número de diseño (DVN) tomando como referencia la siguiente tabulación:

| <u>Indice Plástico</u> | | | <u>Número de Diseño (DVN)</u> |
|------------------------|----|----|-------------------------------|
| 0 | a | 12 | 5.5 |
| 13 | a | 30 | 3.0 |
| 31 | a | 50 | 1.5 |
| más | de | 50 | 1.0 |

Admitiendo que este criterio es conservador y posiblemente en algunos Números de Diseño se incrementan tanto como un 50 por ciento si se comprobará con alguna prueba de resistencia, sin embargo, sin contar con pruebas de resistencia este incremento en el Número de Diseño es una garantía.

3. En la Figura V.2. con el Número de Diseño (DVN) y procediendo a una de las cuatro curvas de tránsito (la que más se asemeje a las condiciones de tránsito dadas), se proyecta horizontalmente al Espesor

FIGURA V-1

CARTA DE RESISTENCIA

NUMERO DE DISEÑO

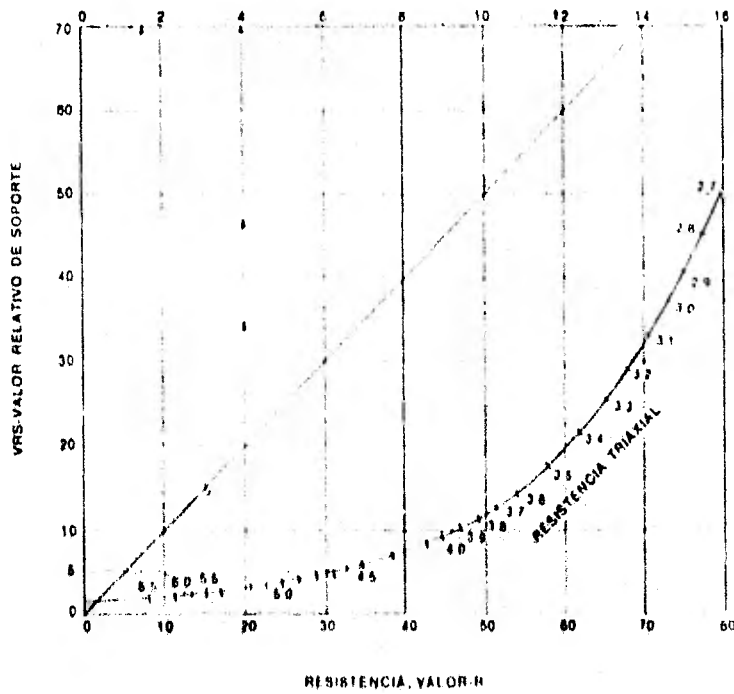
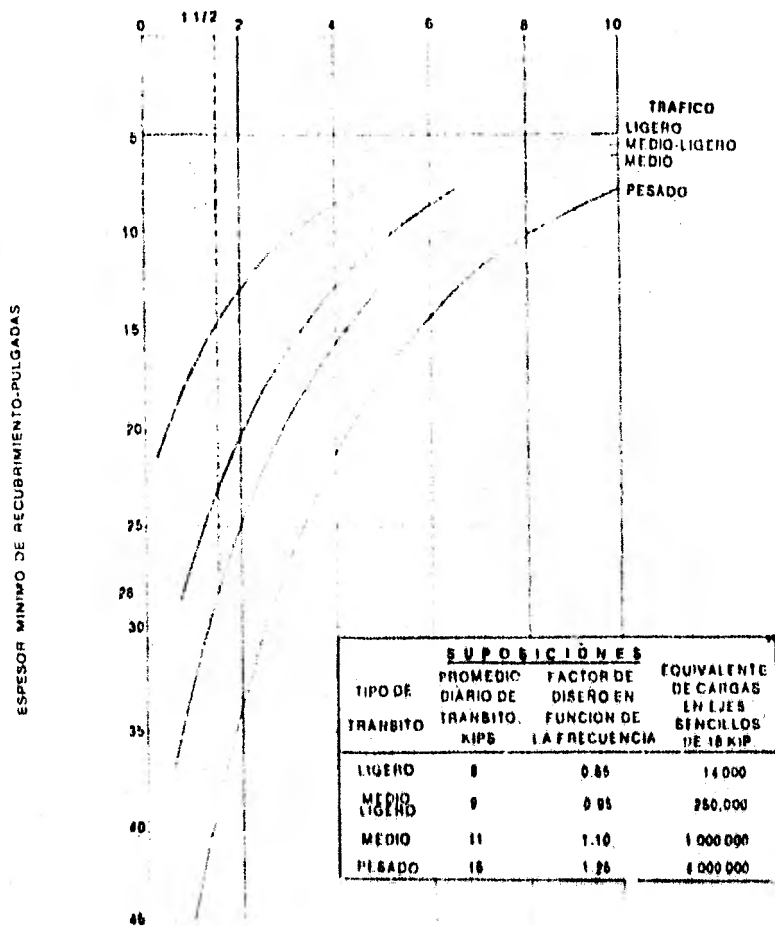


Figura V.1A. Correlación de los valores de VRS, triaxial, valor-R y Número de Diseño (DVN).

| VRS | TRIAxIAL | VALOR-R | NUMERO DE DISEÑO |
|-----|----------|---------|------------------|
| 1 | 6.5 | 8 | 1 |
| 2 | 5.7 | 13 | 1.5 |
| 3 | 5.0 | 25 | 2.8 |
| 4 | 4.7 | 31 | 3.6 |
| 5 | 4.5 | 35 | 4.0 |
| 6 | 4.3 | 38 | 4.4 |
| 7 | 4.2 | 41 | 4.8 |
| 8 | 4.1 | 43 | 5.1 |
| 9 | 4.0 | 45 | 5.4 |
| 10 | 3.9 | 47 | 5.8 |
| 15 | 3.6 | 55 | 7.0 |
| 20 | 3.4 | 60 | 8.0 |
| 25 | 3.3 | 65 | 9.0 |
| 30 | 3.2 | 68 | 9.8 |
| 31 | 3.15 | 69 | 10.0 |
| 35 | 3.0 | 72 | 10.7 |
| 40 | 2.9 | 75 | 11.6 |

FIGURA V-2
 NUMERO DE DISEÑO



de recubrimiento mínimo requerido. La curva a emplearse puede ser determinada de la tabla ahí incluida que jerarquiza las condiciones de tránsito basándose en las cargas y su frecuencia. Es probable que las condiciones de tránsito en cuestión no corresponda exactamente a ninguna de las condiciones especificadas en las cuatro curvas, pero esto no será un problema porque el espesor mínimo mostrado es básico y puede ser corregido por muchas otras condiciones de tráfico, como se verá en los pasos 4 y 5.

4. Si el promedio de Máxima Carga por Rueda (ADTHWL) para una de las curvas dadas en la Figura V.2. es parecida a la carga prevista pero hay un número diferente de carga aplicada por haber empleado previamente la Figura V.2., usaremos el siguiente procedimiento:
 - a) Dividiendo el espesor mínimo obtenido en el paso 3 por el factor de diseño de frecuencia de carga (LFDF), mostrado en la tabla de la Figura V.2. para la curva de tránsito empleada en el paso 3.
 - b) En la Figura V.3. seleccionamos el número del equivalente en ejes de 18 Kip (E18 K SALA) previsto durante la vida del pavimento y se leerá nuevamente el LFDF en las abscisas.
 - c) Para obtener el espesor correcto, multiplicar el espesor obtenido en el paso 4 por el LFDF obtenido en el paso 4, b).

5. Si se desea determinar el espesor de un diferente ADTHWL (Promedio de máxima carga por rueda) de cualquiera de las cuatro curvas mostrada en la Figura V.2., se podrá emplear el siguiente procedimiento:
 - a) Seleccionar una de las curvas de diseño de la Figura V.2. teniendo el ADTHWL bajo la que se desea emplear.
 - b) Determinar el espesor de acuerdo con los pasos 3 y 4, a).
 - c) Multiplicar el espesor obtenido en el paso 5,b) por la raíz cuadrada del producto de la división de ADTHWL usado para diseño entre el ADTHWL de la curva de diseño.
 - d) Se continúa con la corrección del espesor por LFDF como se vio en los pasos 4, b) y c).

Resumiendo sobre los pasos 3, 4 y 5.

Los cálculos necesarios pueden ser incluidos dentro de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Espesor mínimo}}{\text{LFDP}} \text{ de Fig. V.2.} \times \text{LEDF (de Fig. V.3.)} \times \frac{\text{ADWWL empleado en Dis.}}{\text{ADWWL empleado Fig.V2.}}$$

Es necesario hacer notar que esta secuencia es para agregados convencionales, materiales de préstamo y suelos con poca o ninguna resistencia a la tensión.

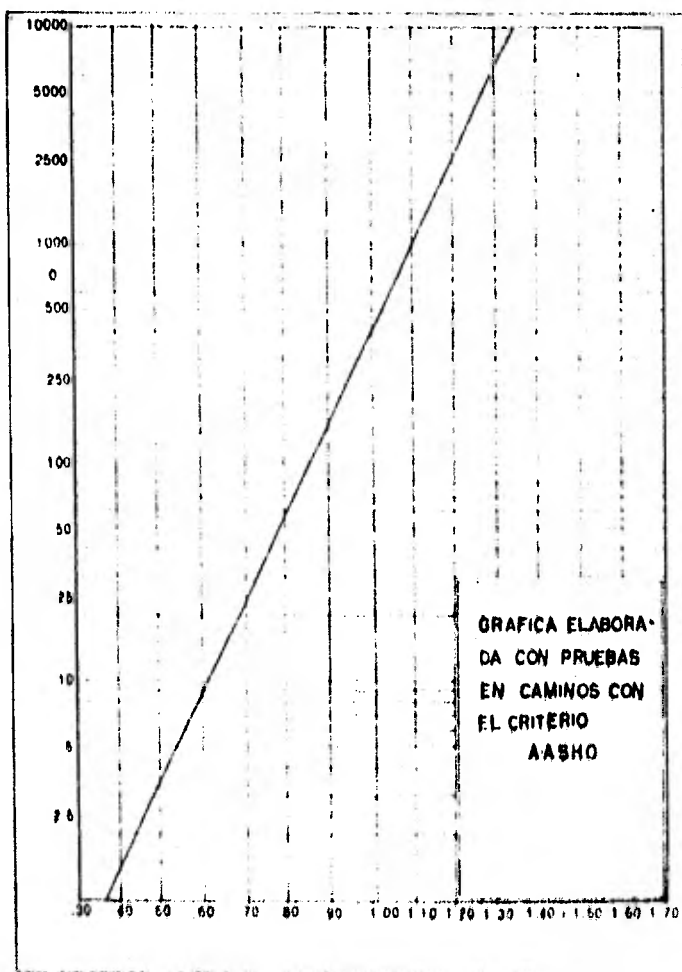
En contraste, si es estabilizado el material que se empleará, éste desarrolla una apreciable resistencia a la tensión debido a la cementación y la acción aglutinante proporcionada por el estabilizante, las siguientes indicaciones pueden hacer tomar la determinación de reemplazar y/o reducir el espesor total del pavimento. De este modo, dos o más diseños pueden ser evaluados.

6. Determinar la resistencia a la tensión por medio de pruebas de flexión, compresión diagonal o del cohesiómetro en especímenes curados o preferentemente en corazones. (Si se emplea la prueba del cohesiómetro se dividirá el resultado entre 45.36 para convertir la resistencia a psi).

Si la información sobre la resistencia a la tensión no está disponible, la resistencia a la compresión sin confinar puede ser usada como una idea general para estimar la resistencia a la tensión empleando un factor de 0.10. Un ciclo de 18 días de curado (AASHTO T 220-66), podrá ser usado para obtener valores reales de la resistencia a la compresión sin confinar. En el caso de mezclas de suelo-cal, el intervalo de la resistencia a la compresión sin confinar varía generalmente de 75 a 250 psi, que corresponderá a valores de resistencia a la tensión de 7.5 a 25 psi, respectivamente.

FIGURA V-3

ETON SALLA
EQUIVALENTE DE CARGAS EN EJES SENCILLOS DE 18 KIP EN MILES (UNA DIRECCION)



L.P.D.F.

FACTOR DE DISEÑO EN FUNCION DE LA FRECUENCIA

7. De la Figura V.4. se determinará el factor de modificación de la resistencia a la tensión (S_t) por entrar como un espesor ordinario de capa (base o sub-base), cualquiera puede tener la mayor resistencia a la tensión. Multiplicando el valor de la resistencia a la tensión del paso 6 por este factor nos dará el valor modificado de la resistencia a la tensión.
8. En la Figura V.5. se pasa de los pasos 4, c) ó 5, d) y la resistencia a la tensión modificada del paso 7 y determinamos la máxima reducción del espesor debido a la resistencia a la tensión. Multiplicando este valor por 0.75 como factor de seguridad.
9. Restando el valor obtenido en el paso 8 del valor registrado en la Figura V.5. Este será el espesor total mínimo de sub-base, base y revestimiento.
10. De la Figura V.6. se determinará el espesor mínimo del revestimiento asfáltico. Restándole este valor al espesor obtenido en el paso 9, dando así el espesor mínimo de base y/o sub-base.

A continuación se diseñará un pavimento para las condiciones expuestas (tanto para una estructura convencional como para capas estabilizadas).

1. Valor Relativo de Soporte (VRS) del terreno natural 3 por ciento.
2. Tránsito
 - Vehículos ligeros por día 1500
 - Vehículos pesados por día 250
3. Resistencia a la tensión del suelo-cal 1 kg/cm²

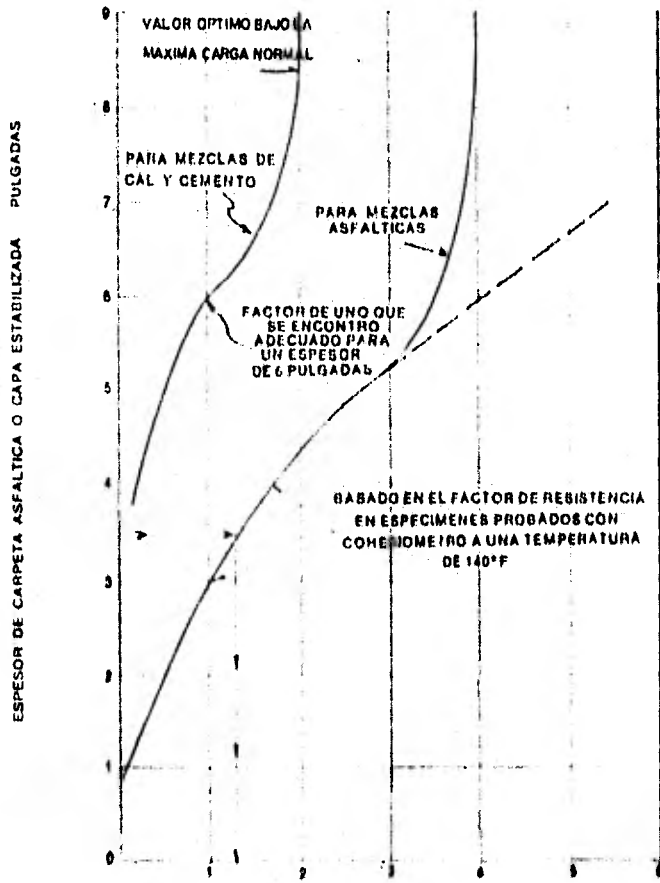
DISEÑO

Análisis del tránsito

*Promedio diario ADT 1750 vehículos.

De la Figura V.7, determinamos el Promedio de máxima carga por rueda ADTHWL que es de 10,5 kip.

FIGURA V-4



FACTOR S1, MODIFICACION POR RESISTENCIA A LA TENSION

FIGURA V-5

CARTA PARA REDUCCION DE ESPESOR EL PAVIMENTO

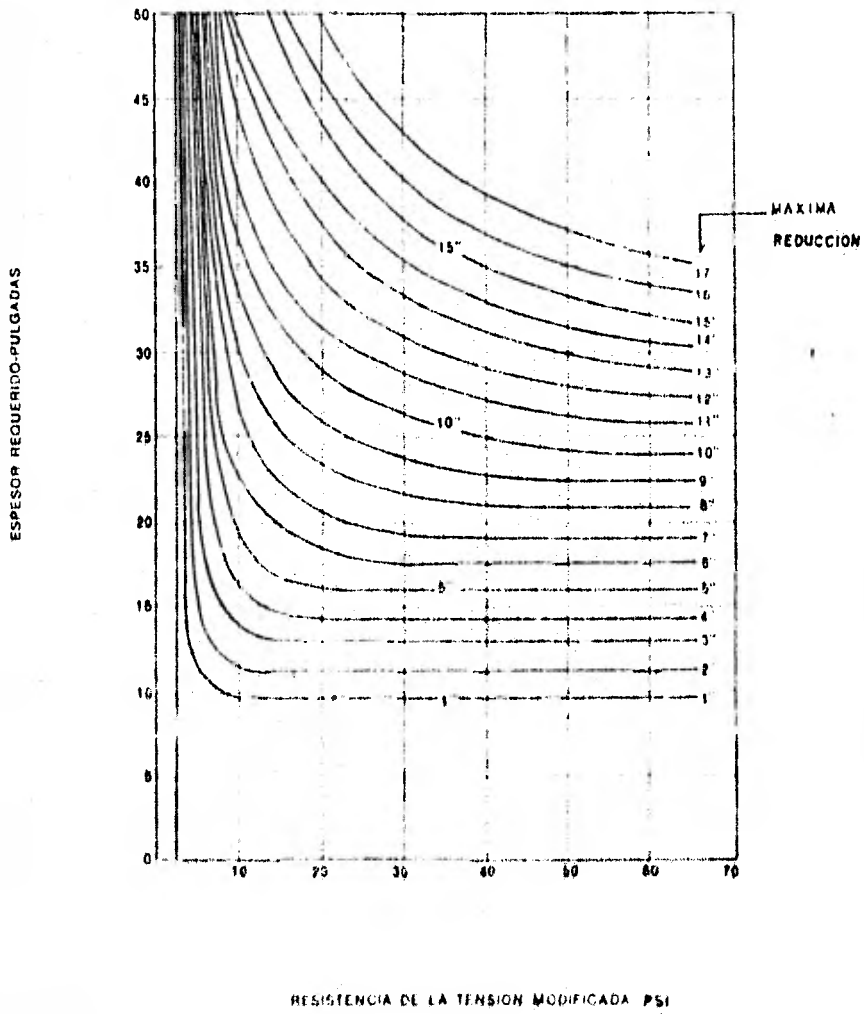


Figura V.6. Espesores sugeridos para la superficie de rodamiento (en pulgadas).

| Equivalente de cargas en ejes sencillos de 18 kip. E 18 K SALA | Cuando el material muestra que cumple las especificaciones de granulometría de los materiales de base (Prueba de Texas Tex-117-E). | | |
|---|--|-------------------------------|-------------------------------|
| | Tipo I | Tipo II | Tipo III ^(a) |
| 14 000 | ST ^(b) | ST | ST |
| 25 000 | ST | ST | ST |
| 38 000 | ST | ST | ST |
| 61 000 | ST | ST | 1 ¹ / ₂ |
| 100 000 | ST | 1 ¹ / ₂ | 2 |
| 150 000 | ST | 1 ³ / ₄ | 2 ¹ / ₂ |
| 250 000 | 1 ¹ / ₄ | 2 | 3 |
| 400 000 | 1 ¹ / ₂ | 2 ¹ / ₄ | 3 ¹ / ₂ |
| 600 000 | 1 ³ / ₄ | 2 ¹ / ₂ | 4 |
| 1000 000 | 2 | 3 | 4 ¹ / ₂ |
| 1500 000 | 2 ¹ / ₂ | 3 ¹ / ₂ | 5 |
| 2500 000 | 3 | 4 | 5 ¹ / ₂ |
| 4000 000 | 3 ¹ / ₂ | 4 ¹ / ₂ | 6 |
| 10000 000 | 4 ¹ / ₂ | 5 ¹ / ₂ | 7 |

(a) Exclusivo de suelos cohesivos.

(b) Superficie tratada.

(c) No se recomienda su empleo excepto donde la disponibilidad de un mejor material de base es muy costoso.

FIGURA V-7

BUNA UNICAMENTE PARA CAMINOS Y CALLES TÍPICAS.
NO INCLUYE ESTACIONAMIENTOS, AEROPISTAS, ETC

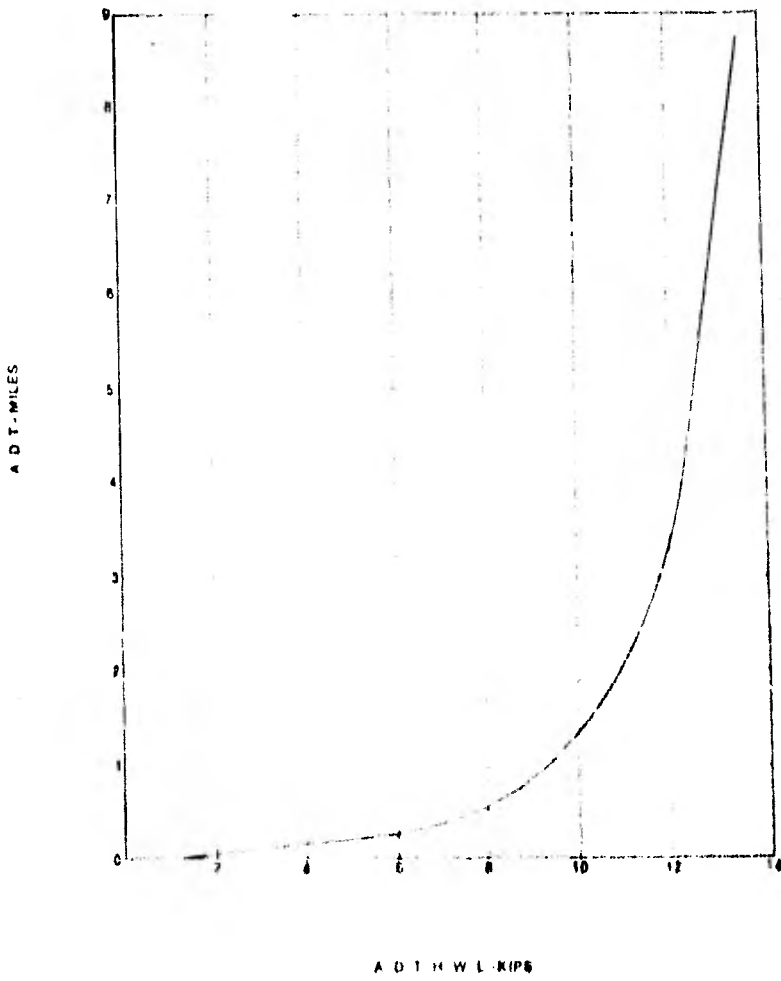
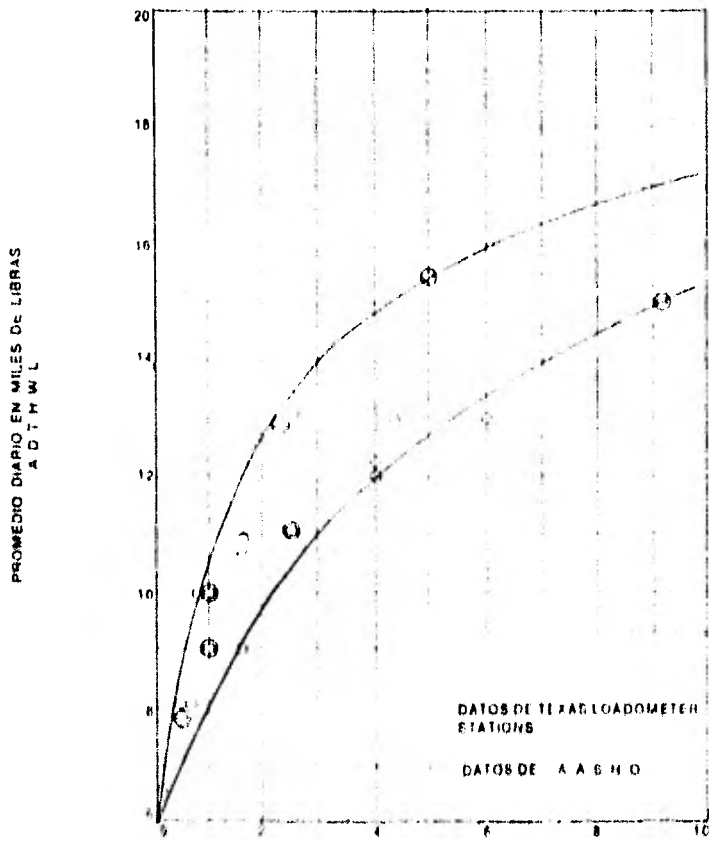


FIGURA V-6

RELACION DE A.D.H.W.L. A EJES DE 18 KIP EQUIVALENTES APLICADOS EN UN PERIODO DE 20 AÑOS



EQUIVALENTE DE CARGAS EN EJES SENCILLOS DE 18 KIP EN MILLONES (UNA DIRECCION)
E IOKSALA

*Conociendo ADTHWL 10.5

De la Figura V.8. determinamos el equivalente en ejes de 18 kip para la repetición de la carga en 20 años. E 18 K SALA que será de 2.5×10^6 (se usó la curva inferior para un factor de diseño de máxima seguridad).

*Conociendo E 18 K SALA 2.5×10^6

De la Figura V.3. determinamos el factor de diseño en función de la frecuencia de la carga. LFDF que será 1.175.

CALCULO DEL ESPESOR DE PAVIMENTO CON MATERIALES CONVENCIONALES.

*Conociendo el Valor Relativo de Soporte obtenemos el Número de Diseño (DVN).

$$VRS = 3\%$$

De la Figura V.1. determinamos DVN que es 2.8

*Conociendo DVN 2.8

De la Figura V.2. determinamos el espesor mínimo del pavimento, emplearemos la curva para ADTHWL de 11,000 lb (pues es la más cercana a 10 500 lb), será de 21.18 in.

*Conociendo el espesor mínimo 21.18 in

Dividiremos el espesor por el valor LFDF de 1.10 dado en la tabla de la Figura V.2. para una curva de tránsito media.

$$\frac{21.18}{1.10} = 19.26 \text{ in}$$

*Multiplicaremos este nuevo espesor por el LFDF obtenido en el análisis de tránsito y por la raíz cuadrada de

$$\frac{\text{ADTHWL diseño}}{\text{ADTHWL empleado en Fig. V.2.}}$$

de donde

$$19.26 \times 1.175 \times \sqrt{\frac{10.5}{11}} = 22.11 \text{ in}$$

+De la Figura V.6. determinamos el espesor mínimo de concreto asfáltico considerando E 18 K SALA de 2.5×10^6 kip agregados Tipo I será de 3".

Por diferencia obtenemos el espesor de base y sub-base de:

$$22.11 - 3 = 19.11 \text{ in}$$

+Para determinar la reducción de espesor de base y sub-base debido a la resistencia a la tensión del concreto asfáltico obtenemos el factor de modificación St Figura V.4., para 3" se tiene St = 1 (la resistencia a la tensión del concreto asfáltico es de 12 psi).

$$\therefore 12 \times 1 = 12 \text{ psi}$$

+Con la resistencia a la tensión modificada 12 psi empleamos la Figura V.5. y obtenemos la máxima reducción posible que es de 6.5 in, multiplicando este resultado por el factor de seguridad de 0.75 obtenemos: $0.75 \times 6.5 = 4.88 \text{ in}$

De dónde obtenemos el espesor para sub-base, base y carpeta

$$22.11 - 4.88 = 17.23 \text{ in}$$

redondeando a 18"

CALCULO DEL ESPESOR DE PAVIMENTO EMPLEANDO UNA SUB-BASE DE SUELO-CAL.

+Proponiendo un espesor de suelo-cal de 20 cm (8 in) obtenemos un St = 2, (Resistencia a la tensión 1 Kg/cm²).

De una resistencia modificada a tensión de:

$$1 \times 2 = 2 \text{ Kg/cm}^2$$

$$2 \times 14.2228 = 28.4456 \text{ lb/in}^2 \rightarrow 28.5 \text{ psi}$$

+De la Figura V.5. obtenemos la máxima reducción posible que es de 8.5 in, por su factor de seguridad obtenemos:

$$8.5 \times 0.75 = 6.38 \text{ in}$$

De dónde obtenemos el espesor para sub-base, base y carpeta:

$$22.11 - 6.38 = 15.73 \text{ in}$$

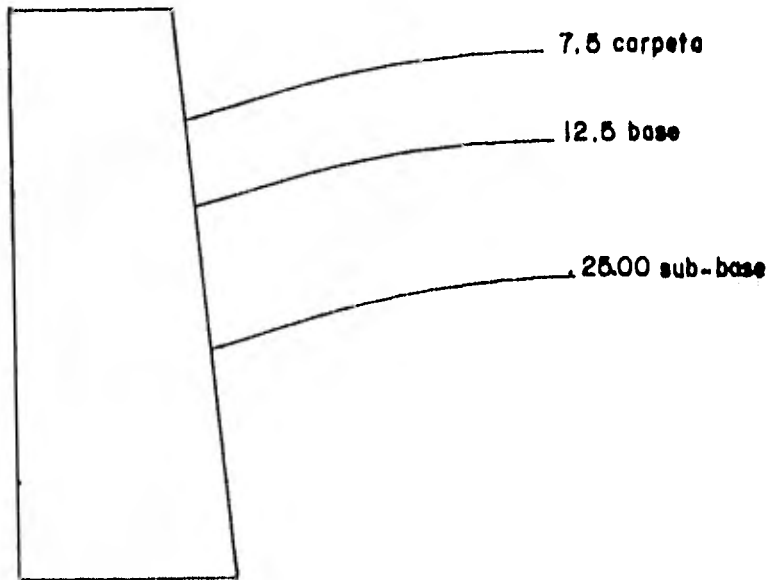
redondeando a 16 in

Basados en las determinaciones hechas podremos proponer dos estructuras diferentes de pavimento:

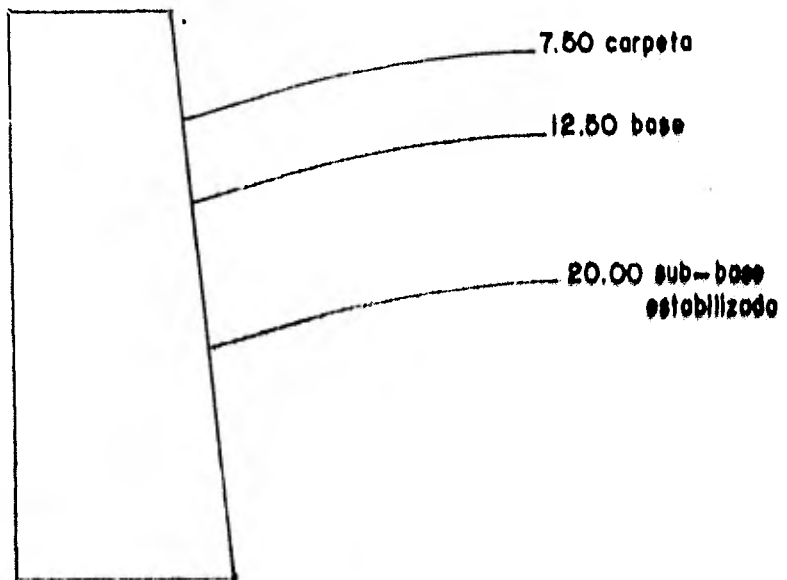
| <u>Convencional</u> | | <u>Con sub-base de suelo-cal</u> | |
|---------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------|
| 3" | 7.5 cm Carpeta | 3" | 7.5 cm Carpeta |
| 5" | 12.5 cm Mat. Base | 5" | 12.5 cm Base |
| 10" | 25.0 cm Mat. Sub-base | 8" | 20.0 cm Sub-base |
| 18" | 45.0 cm | 16" | 40.00cm |

Sección de la calle 12 m.

PAVIMENTO TRADICIONAL



PAVIMENTO CON CAPA ESTABILIZADA



Acotación en centímetros.

CAPITULO VI

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

A continuación se describirá el proceso constructivo para un pavimento que en su estructura incluye una sub-base de arcilla estabilizada con cal

1. TERRACERIA.

a) Excavación:

En toda el área por pavimentar se efectuará la remoción de tierra vegetal, raíces, materia orgánica, grava o gravilla de un diámetro superior a 3" (7.5 cm) y en general cualquier tipo de escombros existentes.

Se efectuará el corte necesario de la caja hasta el nivel de proyecto.

Cuando la excavación de la capa vegetal superficial obligue a que el nivel de la capa subrasante sea inferior al de proyecto, el espesor de la subrasante se verá aumentado hasta conseguir el nivel de proyecto.

En zonas donde el material de la subrasante presente baja resistencia o síntomas de remoldeado que no garanticen un apoyo adecuado al pavimento, se procederá a su remoción y excavación con objeto de sustituirlo por material de buena calidad.

Antes de iniciar la estabilización deberá dejarse la subrasante a nivel y trazo de proyecto.

Equipo: Motoconformadora, tractor con arado de disco o tractor con desgarrador.

b) Ancho de excavación:

Con objeto de asegurar una buena compactación, el ancho de la ex

cavación abarcará toda la sección del pavimento, más 30 cm. adicionales como mínimo hacia cada lado.

c) Pulverización previa del suelo:

La zona excavada será tratada con equipo que permita iniciar la pulverización del suelo.

En caso de que el suelo sea inestable o se dificulte su pulverización inicial, podrá eliminarse este paso, teniendo una mayor supervisión en los pasos subsecuentes.

Equipo: Tractor agrícola con arado de disco o mezclador rotatorio.

II. SUB-BASE DE SUELO-CAL.

a) Espesor:

El espesor de la sub-base de suelo-cal será de 20 cm.

b) Materiales:

Se utilizará una mezcla de la arcilla del sitio estabilizada con cal hidratada. La cantidad de cal agregada al suelo será de 8 por ciento del peso seco del suelo, este porcentaje se podrá modificar de acuerdo con los resultados que se vayan obteniendo en los primeros tramos y con pruebas de laboratorio, pero nunca será menor del 2 por ciento.

c) Esparcido de la cal hidratada:

Se aplicará sobre la superficie de la capa de arcilla disgregada, la cal hidratada en la cantidad antes especificada. De acuerdo con los resultados de laboratorio.

El esparcido de la cal puede hacerse en seco o mediante lechada (Slurry).

d) Procedimiento en seco:

Se colocarán en el área por tratar los sacos de cal hidratada, que previamente hayan sido calculados, conforme una cuadrícula determinada por el Ingeniero. En caso de que se prefiera usar cal a granel, transportada en camiones, el esparcido se hará tomando en cuenta la cantidad de cal especificada por M^2 , y la velocidad de distribución del equipo, ya sea neumático o mecánico.

El esparcido de la cal se hará a mano con ayuda de rastrillos o medios mecánicos pero nunca se deberá utilizar la motoconformadora.

En cualquier caso deberá tenerse especial cuidado en que la distribución se haga en la cantidad exacta especificada y en forma uniforme.

Después de esparcida la cal puede mojarse con pipa para reducir el polvo.

e) Procedimiento con lechada:

En caso de que se utilice el procedimiento de esparcido con lechada, deberá mezclarse en una proporción de 1:2 cal-agua respectivamente en peso, cuidando que el camión distribuidor de la lechada cuente con un agitador para evitar la sedimentación de la cal.

Es importante que, en cualquiera de los dos procedimientos usados (seco o lechada), la cal deberá aplicarse únicamente en aquellas áreas que puedan trabajarse el mismo día; asimismo la cal deberá ser cubierta por el suelo o mezclada con él, para evitar pérdidas por viento o carbonatación.

f) Mezclado preliminar e incorporación de agua:

Con objeto de distribuir en forma uniforme y homogénea la cal

en el suelo, es necesario efectuar un mezclado preliminar en todo el espesor de la capa y en todo el ancho de la sección transversal, hasta lograr que el tamaño máximo de los terrones y grumos del suelo-cal pasen la malla de 2" (5 cm.)

Se procederá en seguida a determinar el contenido de humedad de la mezcla "in situ".

Si la mezcla tiene un contenido de agua superior al óptimo deberá continuarse con el mezclado, hasta lograr uniformidad en la mezcla suelo-cal y airear la mezcla para que elimine la humedad excedente.

Si la mezcla tiene un contenido de agua inferior al óptimo deberá confirmarse la uniformidad y homogeneidad de la misma y continuar con la incorporación de agua en pipas o camiones tanque hasta lograr por lo menos una humedad 5 por ciento sobre la óptima, comprobando previamente en el campo si el suelo admite ese exceso de humedad. Se continuará posteriormente con el mezclado hasta lograr uniformidad y aireación de la misma y obtener la humedad óptima. Una vez que la mezcla tenga la humedad óptima, se compactará ligeramente con equipo de compactación neumático o de rodillos ligeros, no necesita ser pesado.

Equipo: Mezclador rotatorio múltiple o sencillo o tractor agrí- cola con arado de disco, pipa para agua, equipo de compactación ya mencionado.

g) Curado inicial:

Después del mezclado preliminar, deberá darse un curado inicial mediante riego de agua para evitar la evaporación y lograr que la acción química de la cal disgregue todos los grumos de la mezcla. El tiempo de curado inicial varía de 0 a 48 horas. En algu- nos casos se extenderá por varios días más dependiendo de las propiedades del suelo. El tiempo óptimo de curado debera determi

narse a partir de los resultados obtenidos en las primeras etapas.

h) Mezclado y disgregaciones finales:

Después del curado inicial se procederá a una nueva etapa de mezclado de la capa hasta la disgregación y desaparición de todos los grumos de la mezcla, en forma que toda la mezcla suelo-cal pase la malla de 1" y por lo menos el 60 por ciento del material pase la malla No. 4; excepto aquellos materiales identificados previamente como gravas o arenas gruesas. El mezclado deberá hacerse con mezcladora rotatoria múltiple o sencilla, en caso de no contar con este equipo, el mezclado final puede hacerse con tractor agrícola con un arado y rastra de discos.

Debiendo proporcionar a la capa el número de pasadas suficientes hasta cumplir con los requerimientos arriba mencionados. Durante el mezclado, la humedad de la capa deberá mantenerse en la óptima mediante el riego de agua proporcionada por pipas o camiones tanque.

Cuando durante el mezclado preliminar, se logre el disgregado total de los grumos de la mezcla (cumpliendo con la especificación ya mencionada) la etapa de curado inicial así como la de mezclado final pueden eliminarse.

i) Compactación:

La capa de suelo-cal deberá compactarse al 95 por ciento de la prueba Proctor estandar AASHO T 99 6 al 92 por ciento de la prueba Proctor-SAHOP.

La compactación se efectuará después del mezclado final sin que transcurran, por ningún motivo, más de una semana entre estas dos operaciones, debiendo evitarse las pérdidas de humedad.

Equipo: Equipo neumático de más de 20 toneladas o rodillo vibratorio o aplanadora de 12 toneladas y equipo neumático ligero, o rodillo pata de cabra y equipo neumático ligero.

Sólo se permitirá la compactación con equipo neumático ligero cuando el espesor por compactar no excede de 10 cm.

j) Curado final:

Una vez compactada la capa de suelo-cal deberá curarse durante un período variable entre 3 y 7 días a fin de lograr una mayor resistencia, excepto en los casos en que la compactación se haya efectuado con equipo neumático de más de 20 toneladas.

El período óptimo de curado se decidirá mediante los resultados que arrojen las pruebas de resistencia a la compresión sin confinar a diferentes edades realizadas en muestras tomadas de las primeras etapas construídas.

El curado se efectuará mediante riegos de agua proporcionados con pipa o mediante un sello asfáltico construído por asfalto rebajado tipo FR-3 en proporción de no más de 1.2 lts/m², el cual funcionará como membrana impermeable.

En ningún caso deberá permitirse la pérdida de humedad por evaporación en la capa, entre la terminación de ésta y la colocación de la base se recomienda que no transcurran más de 10 días manteniendo siempre los riegos de agua para evitar evaporación.

III. ALMACENAMIENTO DE LA CAL.

En caso de que se use cal en costales, deberá almacenarse en un lugar libre de humedad, con piso de cemento, techado, cerrado y libre de corrientes de aire para no exponer a la cal a la intemperie y a la carbonatación.

Cuando por algún motivo se rompan los costales de cal, se desecharán y no deberán usarse en la estabilización de la base.

IV. CONTROL DE CALIDAD DE LA CAL.

La cal hidratada es un polvo seco obtenido de la hidratación de la cal viva que consiste específicamente de hidróxido de calcio, óxido de magnesio e hidróxido de magnesio y deberá cumplir con los siguientes requisitos:

a) Total de óxidos:

95 por ciento como mínimo del contenido total de óxidos $\text{CaO} + \text{MgO}$ sobre una base de no volátiles.

El hidrato no deberá contener más del 5 por ciento de dióxido de carbono, para muestras obtenidas en planta, ni más del 7 por ciento para muestras tomadas en la obra.

b) Cal disponible:

Deberá tener como mínimo el 90 por ciento de CaO sobre una base de no volátiles.

c) Tamaño de las partículas:

Todas las cales hidratadas deberán cumplir con el siguiente requisito: Cuando menos el 85 por ciento deberá pasar la malla No. 200.

V. BASE.

a) Espesor:

El espesor será de 12.5 cm o el que marque el proyecto.

b) Grado de compactación:

El grado de compactación de la base será como mínimo del 95 por ciento, con respecto a la prueba Porter estandar. Se compactará en una sola capa con aplanadora de rodillos lisos metálicos y

equipo de compactación neumático.

c) Materiales:

Sobre la sub-base terminada se colocará la base la cual estará formada por una mezcla de materiales pétreos y areno-limosos (tepetate).

La granulometría de este material deberá quedar alojada en cualquier de las zonas 1 y 2 especificadas por SAHOP o en parte de ellas. La curva granulométrica no deberá presentar cambios bruscos de pendiente y la relación del porcentaje en peso que pase la malla No. 200 al que pase la malla No. 40 no deberá exceder de 0.65.

El tamaño máximo de las partículas del material no deberá ser mayor de 1.5".

El límite líquido del material no deberá ser mayor que 30 por ciento.

El valor cementante y la contracción lineal del material deberán cumplir con los siguientes valores:

| | ZONA No. 1 | ZONA No. 2 |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Valor Cementante | Mayor que 3.5 Kg/cm ² | Mayor que 3.0 Kg/cm ² |
| Contracción lineal | Menor que 4.5 % | Menor que 3.5 % |

Cuando la curva granulométrica del material se aloje en dos zonas, en la parte correspondiente a las fracciones comprendidas entre las mallas No. 40 y 200, la contracción lineal deberá considerarse para la zona en la cual queda alojada la mayor longitud de dicha parte de la curva, excepto cuando la fracción que pase la malla No. 200 sea menor de 15 por ciento en cuyo caso la zona considerada será aquella en la que se aloje la mayor longitud de la totalidad de la curva. El Valor Relativo de Soporte (VRS) estándar del material de la base será cuando menos del 80 por ciento.

El equivalente de arena de este material será como mínimo de 30 por ciento.

VI. PREPARACION DE LA BASE PARA RECIBIR LA CARPETA.

a) Acabado:

La base terminada deberá estar exenta de surcos, baches, ondulaciones y deberá tener la pendiente transversal de proyecto.

b) Barrido:

Una vez que se verifiquen en la base el espesor, el grado de compactación y el acabado e inmediatamente antes del riego de impregnación, se deberá proceder al barrido de la misma a mano o por medio de barredoras mecánicas, para eliminar polvo y materias extrañas que se encuentren en su superficie.

VII. RIEGO DE IMPREGNACION.

a) Dosificación:

Una vez terminada la construcción de la base, deberá protegerse con un riego de impregnación con asfalto rebajado del tipo FM-1, a razón de 1.2 a 1.5 lts/m², de acuerdo con la textura que se tenga en la base.

b) Procedimiento:

El riego se efectuará por medio de una petrolizadora dotada de equipo de calentamiento, bomba de presión y los aditamentos necesarios para su correcto funcionamiento.

c) Limitaciones:

Deberán transcurrir 24 horas como mínimo antes de proceder con el siguiente riego para lograr una correcta penetración y la pérdida de los solventes.

El riego del producto asfáltico por ningún motivo deberá aplicarse en los siguientes casos: cuando amenace lluvia, cuando la base se encuentre mojada, cuando la intensidad del viento impida la distribución uniforme del producto.

Deberá impedirse el paso de vehículos hasta que el producto asfáltico haya penetrado y fraguado superficialmente, cuando por causas de fuerza mayor sea necesario abrir al tránsito el tramo, podrá cubrirse inmediatamente el riego con arena seca.

VIII. RIEGO DE LIGA.

a) Limpieza:

Antes de aplicar el riego de liga sobre la base impregnada, ésta deberá quedar libre de materias extrañas y polvo.

b) Dosificación:

El riego de liga deberá darse con asfalto rebajado de tipo FR-3 a razón de 0.7 Lts/m^2 como máximo.

c) Procedimiento:

El riego de liga se dará con una petrolizadora del tipo que la mencionada para el riego de impregnación y se colocará en toda la superficie que quedará cubierta por la carpeta.

d) Limitaciones:

Antes del tendido de la carpeta deberán transcurrir dos horas como mínimo para eliminar los solventes.

Con objeto de evitar la presencia de polvo y materias extrañas sobre el riego de liga es conveniente que no se demore el tendido de la carpeta.

IX. CARPETA ASFALTICA.

a) Tipo de carpeta.

La carpeta será de concreto asfáltico elaborado en caliente en planta, con el tipo de asfalto y agregado especificado más adelante.

b) Espesor:

El espesor de la carpeta será de 7.5 cm compactados, o lo señalado por el proyecto.

c) Grado de compactación:

La carpeta asfáltica deberá compactarse como mínimo al 95 por ciento con respecto a la prueba Marshall.

d) Producto asfáltico:

Se utilizará cemento asfáltico No. 6.

e) Agregados:

Los agregados pétreos estarán constituidos por material triturado, con un tamaño de 3/4" y cuya granulometría esté comprendida entre los siguientes tamaños:

| MALLA No. | % QUE PASA |
|-----------|------------|
| 1" | 100- 100 |
| 3/4" | 100- 90 |
| 1/2" | 100- 75 |
| 3/8" | 100- 66 |
| 1/4" | 82- 55 |
| 4 | 70- 48 |
| 10 | 49- 32 |
| 20 | 35- 22 |
| 40 | 26- 16 |
| 60 | 20- 12 |
| 100 | 16- 9 |
| 200 | 10- 6 |

f) Los agregados pétreos para concreto asfáltico deberán cumplir además con los siguientes requisitos:

| | |
|---|-------------|
| - Intemperismo acelerado | 12 % máximo |
| - Desgaste prueba de Los Angeles | 30 % máximo |
| - Partículas alargadas y/o en forma de laja | 35 % máximo |

g) Fabricación del concreto asfáltico:

El concreto asfáltico se hará en una planta que cumpla con todos los requisitos indicados en las especificaciones correspondientes de la SAIOP,

La mezcla asfáltica deberá cumplir con los siguientes requisitos:

| | |
|--|--------------------|
| - Estabilidad | 450 Kg como mínimo |
| - Flujo | 2 a 4 milímetros |
| - Por ciento de vacíos | 3 a 5 |
| - Por ciento de vacíos ocupados por el asfalto | 75 a 82 |

En caso de que alguno de los requisitos antes mencionados no se cumplan, deberá de hacerse una investigación del concreto asfáltico en laboratorio.

h) Transporte y tendido de la carpeta asfáltica:

Deberá efectuarse de acuerdo a las especificaciones correspondientes de la SAIOP.

i) Permeabilidad:

Ningún punto de la carpeta asfáltica deberá tener una permeabilidad mayor que 1 por ciento comprobándolo antes de colocar el riego de sello.

En zonas locales donde por dificultades constructivas la permeabilidad exceda de 10 por ciento se podrá hacer la comprobación después de haber colocado el riego de sello sin que el valor de la permeabilidad en este caso, sea mayor que 10 por ciento.

X. RIEGO DE SELLO.

a) Limpieza:

Sobre la carpeta deberá colocarse un riego de sello, cuando así lo indique el proyecto o lo ordene la supervisión.

Antes de su colocación, la superficie de la carpeta deberá quedar exenta de materias extrañas y polvo.

b) Dosificación:

El riego de sello deberá darse con asfalto rebajado tipo FR-3 de aproximadamente 1 Lt/m^2 , cubriéndolo con material pétreo constituido por gravilla de $3/16''$ a razón de 8 Lts/m^2 , aproximadamente.

Para complementar todo proceso constructivo se deben de efectuar pruebas de control de calidad, en este caso se mencionarán algunas pruebas de laboratorio para la sub-base de suelo-cal.

1. PRUEBA DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE.

a) Especímenes:

De muestras de suelo-cal, tomadas conforme a las normas establecidas de muestreo de suelos, por las especificaciones generales de construcción de la SAHOP, se elaboran especímenes para pruebas de VRS, en cilindros Porter.

Deberán hacerse tres especímenes por muestra de material ya procesado, antes de compactar.

b) Curado:

Los especímenes serán mantenidos en un ambiente de 100 por ciento de humedad relativa durante un período de 28 días. Al cumplirse este plazo se procederá a realizar la prueba (Criterio SAHOP).

c) Resultados:

El Valor Relativo de Soporte se determinará promediando los resultados de los tres especímenes, deberá obtener un valor de 50 por ciento.

Nota. En caso de tener que descimbrar los especímenes, deberá hacerse después de 8 días y antes de efectuar la prueba introducirlos nuevamente en el cilindro Porter, calafateando con azufre fundido o yeso de París. Los especímenes que se vean afectados por esta operación deberán ser eliminados.

2. PRUEBA DE COMPRESION AXIAL SIN CONFINAR.

2.1. Prueba Rápida:

a) Especímenes:

De muestras de suelo-cal, tomadas conforme a las normas establecidas de muestreo de suelos, por las especificaciones generales de construcción de la SAHOP, antes de compactar.

Siguiendo el procedimiento para elaborar especímenes de la prueba Proctor estandar, se elaboran tres especímenes de cada muestra en moldes proctor estandar de 4" de diámetro. Se mantendrán dentro de los cilindros durante 48 horas, se descimbran a continuación teniendo cuidado de no alterarlos y se colocarán dentro de recipientes herméticos. Inmediatamente se colocan en un horno durante 72 horas a una temperatura de 60°C.

b) Prueba:

Se sujetarán a continuación las probetas a carga de compresión axial sin confinar hasta producir la falla de los mismos, tomando lectura de la carga máxima registrada,

c) Resultados:

Se promedian los resultados de los especímenes de cada muestra, la capacidad a la compresión deberá ser mayor de 7.5 Kg/cm^2 (100 lb/in^2).

2.2. Prueba a 18 días:

a) Especímenes:

Los especímenes se elaborarán igual que en el caso de la prueba rápida. Si se pretende descimbrarlos antes de los 18 días, podrá hacerse después de transcurridas 48 horas. El espécimen deberá ser protegido con parafina o algún otro producto que evite la pérdida de humedad y la carbonatación.

b) Prueba:

Se seguirá igual procedimiento que en la prueba rápida.

c) Resultados:

Igual que en la prueba rápida.

Nota: Las probetas serán cabeceadas con azufre fundido antes de ser probadas para evitar una concentración de esfuerzos.

3. PRUEBA DE TENSION.

a) Especímenes:

Se tomarán muestras de suelo-cal según las normas de las especificaciones generales de construcción de la SAHOP, de suelo ya procesado, antes de compactar.

Los especímenes se elaborarán acorde a lo establecido en la parte novena de las especificaciones generales de construcción de la SAHOP o las del AASHO o ASTM, para determinar la resistencia a la tensión por flexión o la compresión diagonal o a la prueba del Cohesímetro.

Los especímenes deberán ser protegidos de pérdida de humedad y carbonatación durante 18 días.

b) Prueba:

Se realizarán conforme las especificaciones SAHOP o AASHO o ASTM.

c) Resultados:

La resistencia a la tensión deberá ser como mínimo $0,75 \text{ Kg/cm}^2$ (10 lb/in^2).

CAPITULO VII

COMPARACION ENTRE PAVIMENTOS CON Y SIN CAPAS ESTABILIZADAS

- Factor de incremento al sueldo base
- Análisis de maquinaria
- Análisis de precios unitarios
- Comparación económica

FACTOR DE INCREMENTO AL SUELDO BASE

Salario Mínimo.

-Días no laborables:

| | |
|--|------------------|
| a) Domingos | 52.00 días |
| b) Descanso por ley: (1° enero, 5 febrero, 21 marzo, 1° mayo, 16 septiembre, 20 noviembre, 1° diciembre (1/6), 25 diciembre). | 7.17 días |
| c) Descanso por costumbre: (viernes y sábado santo, 3 mayo, 2 noviem- bre, 12 diciembre). | 5.00 días |
| d) Vacaciones | <u>6.00 días</u> |
| Total. | 70.17 días |

-Días trabajados: $365 - 70.17 = 294.83$

-Erogación anual para salario mínimo.

| | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| a) Salario base | 365.00 días |
| b) Prima vacacional (25% de 6 días) | 1.50 días |
| c) Aguinaldo | <u>15.00 días</u> |
| Total | 381.50 días |
| d) Cuota IMSS | 19.69 |
| e) Cuota INFONAVIT | 5.00 |
| f) Guarderías | 1.00 |
| g) Impuesto suplementario | <u>1.00</u> |
| | 26.69 |
| | $26.69 \times 381.50 = 101.82$ |
| Total | 483.32 días |

•Factor de incremento para determinar el salario real es:

$$\frac{483.32}{294.83} = 1.6393$$

FACTOR DE INCREMENTO AL SUELDO BASE

Salario superior al mínimo

-Días no laborables:

| | |
|--|------------------|
| a) Domingos | 52.00 días |
| b) Descanso por ley: (1° enero, 5 febrero, 21 marzo, 1° mayo, 16 septiembre, 20 noviembre, 1° diciembre (1/6), 25 diciembre). | 7.17 días |
| c) Descanso por costumbre: (viernes y sábado santo, 3 mayo, 2 noviem- bre, 12 diciembre). | 5.00 días |
| d) Vacaciones | <u>6.00 días</u> |
| Total. | 70.17 días |

-Días trabajados: $365 - 70.17 = 294.83$

-Erogación anual para salario superior al mínimo.

| | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| a) Salario base | 365.00 días |
| b) Prima vacacional (25% de 6 días) | 1.50 días |
| c) Aguinaldo | <u>15.00 días</u> |
| Total | 381.50 días |
| d) Cuota IMSS | 15.94 \$ |
| e) Cuota INFONAVIT | 5.00 \$ |
| f) Guarderías | 1.00 \$ |
| g) Impuesto suplementario | <u>1.00 \$</u> |
| | 22.94 \$ x 381.50 = <u>87.52</u> |
| Total | 469.02 días |

-Factor de incremento para determinar el salario real (superior al mínimo) es:

$$\frac{469.02}{294.83} = 1.5908$$

TABULACION DE SALARIOS

| Sueldo base | Factor incremento | Sueldo real |
|-------------------------|-------------------|-------------|
| \$ 163.00 (mínimo) | 1.6393 | \$ 267.21 |
| \$ 180.00 (ayudante) | 1.5908 | \$ 286.34 |
| \$ 260.00 (operador) | 1.5908 | \$ 413.61 |
| \$ 300.00 (cabo) | 1.5908 | \$ 477.24 |
| \$ 230.00 (chofer) | 1.5908 | \$ 365.88 |
| \$ 400.00 (sobrestante) | 1.5908 | \$ 636.32 |

Datos del suelo de Culhuacán:

P.V.S.M. 1100 Kg/m³

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Extendedora de asfalto

UNIDAD
HORA

METODO: SARI

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 1.704,656.60
 VIDA ECONOMICA 5 AÑOS DE 2000 HRS/AÑO
 MOTOR de diesel DE 90 H.P.
 FACTOR DE OPERACION 70 %
 POTENCIA DE OPERACION 63 H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$ 8,940.42
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 1.695,716.18

CARGOS FIJOS.

| | | |
|---|---|-------------|
| a).- DEPRECIACION = | = | 20 % |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18 + 3 + 1.5 + 2.5 = | = | 25 % |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. = | = | 15 % |
| | | <u>60 %</u> |

COSTO/HRA = $\frac{\$ 1.695,716.18}{2000 \text{ HRS/AÑO}} = 508.72$

CONSUMOS.

| | | |
|----------------------------|---|--------------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x H.P. x \$ | = \$ |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x 63 H.P. x \$ | = \$ 9.53 |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = 0.402 LTS/HRA. x \$ | = \$ 11.82 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = 0.11 LTS/HRA. x \$ | = \$ 3.18 |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = 0.04 LTS/HRA. x \$ | = \$ 1.16 |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = 0.01 LTS/HRA. x \$ | = \$ 0.29 |
| g).- GRASA | = 0.01 KG/HRA. x \$ | = \$ 0.30 |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. x \$ | = \$ 7.50 |
| i).- LLANTAS | = $\frac{\$ 8940.42}{3000 \text{ HRA.}}$ x 1.15 | = \$ 3.43 |
| | | <u>37.21</u> |

OPERACION

OPERADOR = \$ 413.61
 AYUDANTE = \$ 286.34
699.95 / TURNO

COSTO/HORA = $\frac{\$ 699.95}{8 \text{ HRA/TURNO}} = \$ 87.49$

C. D. = \$ 633.42 /HORA

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Cajón neumático remolcable
 METODO: SARI

UNIDAD
 HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 816,960.00
 VIDA ECONOMICA 7 AÑOS DE 2000 HRS/ARO
 MOTOR de diesel DE 62 H.P.
 FACTOR DE OPERACION 70 %
 POTENCIA DE OPERACION 43.40 H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$ 54,000.00
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 762,960.00

CARGOS FIJOS.

| | | | |
|-----------------------------|---|--------------|----|
| a).- DEPRECIACION | = | 14.29 | \$ |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. | = | 25 | \$ |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. | = | 12 | \$ |
| | | <u>51.29</u> | \$ |

COSTO/HORA = $\frac{\$ 0.5129 \times 762960}{2000}$ = 195.66 HRS/ARO

CONSUMOS.

| | | | |
|----------------------------|-------------------------|--------------|--|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x H.P. x | | |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x 43.50 H.P. x | 1.00 | |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = 0.352 LTS/HRA. x | 29.40 | |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = 0.04 LTS/HRA. x | 28.93 | |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = 0.04 LTS/HRA. x | 28.93 | |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = 0.04 LTS/HRA. x | 28.93 | |
| g).- GRASA | = 0.01 KG/HRA. x | 30.24 | |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. x | 1500.00 | |
| i).- LLANTAS | = \$54000.00 x 1.15 | 20.70 | |
| | 3000 HRA. | <u>48.31</u> | |

OPERACION

OPERADOR = \$ 413.61
 AYUDANTE = \$
413.61 / TURNO

COSTO/HORA = $\frac{\$ 413.61}{\text{HRA/TURNO}}$ = \$ 51.70

C. D. = \$ 295.67 /HORA

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Traxcavo Caterpillar 955-L.
 METODO: SARI

UNIDAD
 HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 2'331,938.30
 VIDA ECONOMICA 5 AÑOS DE 2000 HRS/AÑO
 MOTOR diesel DE 100 H.P.
 FACTOR DE OPERACION 70 %
 POTENCIA DE OPERACION 70.00 H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 2'331,938.30

CARGOS FIJOS.

a).- DEPRECIACION = 20 %
 b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18+3+1.5+2.5 = 25 %
 c).- TALLER DE REP. Y MANT. = 15 %

 60 %

$$\text{COSTO/HORA} = \frac{\$0.60 \times 2'331,938.30}{2000 \text{ HRS/AÑO}} = 699.58$$

CONSUMOS.

| | | | | | |
|----------------------------|------------|------------|------|---------|-------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x | H.P. | x \$ | | |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x | 70.00 H.P. | x \$ | 1.00 | 10.60 |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = 0.402 | LTS/HRA. | x \$ | 29.40 | 11.82 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = 0.11 | LTS/HRA. | x \$ | 28.93 | 3.18 |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = 0.04 | LTS/HRA. | x \$ | 28.93 | 1.16 |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = 0.01 | LTS/HRA. | x \$ | 28.93 | 0.29 |
| g).- GRASA | = 0.01 | KG/HRA. | x \$ | 30.24 | 0.30 |
| h).- FILTROS | = 0.005 | PZA/HRA. | x \$ | 1500.00 | 7.50 |
| i).- LLANTAS | = | | x \$ | 1.15 | |
| | | | | HRA, | 34.85 |

OPERACION

OPERADOR = \$ 413.61
 AYUDANTE = \$ 413.61

 827.22 / TURNO

$$\text{COSTO/HORA} = \frac{\$ 413.61}{8 \text{ HRA/TURNO}} = \$ 51.70$$

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Camión para transporte de agua Chevrolet (Pipa) activa
(8000 Lt).
METODO: SANI
DATOS BASICOS.

UNIDAD
HORA

PRECIO DE ADQUISICION \$ \$417,476.36
VIDA ECONOMICA 5 AÑOS DE 2000 HRS/AÑO
MOTDR de gasolina DE 172 H.P.
FACTOR DE OPERACION 50 %
POTENCIA DE OPERACION 86 H.P.
EQUIPO EXTRA \$ el precio incluye la bomba
- COSTO DE LAS LLANTAS \$ 31,380.00
COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 386,096.36

CARGOS FIJOS.

| | |
|---|------|
| a).- DEPRECIACION = | 20 % |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18+3+1.5+2.5 | 25 % |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. = | 12 % |
| | 57 % |

COSTO/HORA = $\frac{\$0.57 \times 386,096.36}{2000 \text{ HRS/AÑO}} = 110.04$

CONSUMOS.

| | | |
|----------------------------|---|----------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x 86 H.P. x \$ 2.80 | \$ 54.66 |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x H.P. x \$ | \$ |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = 0.388 LTS/HRA. x \$ 29.40 | 11.41 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = 0.04 LTS/HRA. x \$ 28.93 | 1.16 |
| e).- ACEITE DE MANOD FINAL | = LTS/HRA. x \$ | \$ |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = LTS/HRA. x \$ | \$ |
| g).- GRASA | = 0.01 KG/HRA. x \$ 30.24 | 0.30 |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. x \$ 1125.00 | 5.63 |
| i).- LLANTAS | = $\frac{\$31380.00}{3000 \text{ HRA.}}$ x 1.15 | 12.03 |
| | | \$ 85.19 |

OPERACION

OPERADOR = \$ 365.88
AYUDANTE = \$ 286.34

652.22 / TURNO

COSTO/HORA = $\frac{\$ 652.22}{8 \text{ HRA/TURNO}} = \$ 81.53$

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Camión para transporte de agua Chevrolet (Pipa) Ociosa
(8000 Lts)
METODO: SARI
DATOS BASICOS.

UNIDAD
HORA

PRECIO DE ADQUISICION \$ 417,476.36
VIDA ECONOMICA 5 AÑOS DE 2000 HRS/AÑO
MOTOR de gasolina DE 172 H.P.
FACTOR DE OPERACION 50 %
POTENCIA DE OPERACION 86 H.P.
EQUIPO EXTRA \$ el precio incluye la bomba
- COSTO DE LAS LLANTAS \$ 31,380.00
COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 386,096.36

CARGOS FIJOS.

| | | |
|---|---|-------|
| a).- DEPRECIACION = | = | 20 % |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18+3+1.5+2.5 | = | 25 % |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. = | = | 12 % |
| | | <hr/> |
| | | 57 % |

COSTO/HRA = $\frac{\$0.57 \times 386,096.36}{2000} = 110.04$
HRS/AÑO

CONSUMOS.

| | | | |
|----------------------------|------------------|---------------|-------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x | H.P. x \$ | = \$ |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x | H.P. x \$ | = \$ |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = | LTS/HRA. x \$ | = \$ |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = | LTS/HRA. x \$ | = \$ |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = | LTS/HRA. x \$ | = \$ |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = | LTS/HRA. x \$ | = \$ |
| g).- GRASA | = | KG/HRA. x \$ | = \$ |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. | x \$ | = \$ |
| i).- LLANTAS | = \$ | x 1.15 | = \$ |
| | | HRA. | <hr/> |

OPERACION

OPERADOR = \$ 365.88
AYUDANTE = \$ 286.34

652.22 / TURNO

COSTO/HORA = $\frac{\$652.22}{6 \text{ HRA/TURNO}} = \81.53

153

C. D. = \$ 191.57 /HORA

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Diopactor Seaman-Gunnison 10-30 R.D.
 METODO: SANI

UNIDAD
 HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 1'420,547.18
 VIDA ECONOMICA 7 AÑOS DE 2000 HRS/AÑO
 MOTOR diesel DE 76 H.P.
 FACTOR DE OPERACION 70 %
 POTENCIA DE OPERACION 53.20 H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$ 128,192.00
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 1'292,355.18

CARGOS FIJOS.

| | | |
|---|---|----------|
| a).- DEPRECIACION = | = | 14.29 \$ |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18+3+1.5+2.5 | = | 25.00 \$ |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. = | = | 15.00 \$ |
| | | <hr/> |
| | | 54.29 \$ |

COSTO/HORA = $\frac{\$0.5429 \times 1'292,355.18}{2000 \text{ HRS/AÑO}} = 350.81$

CONSUMOS.

| | | |
|----------------------------|-------------------------------|------------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x H.P. x \$ | = \$ |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x 53.20 H.P. x \$ | = \$ 8.06 |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = 0.1495 LTS/HRA. x \$ | = \$ 4.40 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = 0.04 LTS/HRA. x \$ | = \$ 1.16 |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = 0.04 LTS/HRA. x \$ | = \$ 1.16 |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = 0.04 LTS/HRA. x \$ | = \$ 1.16 |
| g).- GRASA | = 0.01 KG/HRA. x \$ | = \$ 0.30 |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. x \$ 1500.00 | = \$ 7.50 |
| i).- LLANTAS | = $\frac{\$128,192.00}{1.15}$ | = \$ 49.14 |
| | 3000 HRA, | <hr/> |
| | | 72.88 |

OPERACION

OPERADOR = \$ 413.61
 AYUDANTE = \$ 286.34

 699.95 / TURNO

COSTO/HORA = $\frac{\$699.95}{\$ \text{ HRA/TURNO}} = \$ 87.49$

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Travel Mixer Whit Oliver 2-115
 METODO: SARI

UNIDAD
 HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 1'400,089.00
 VIDA ECONOMICA 5 AROS DE 2000 HRS/AÑO
 MOTOR diesel DE 115 H.P.
 FACTOR DE OPERACION 70 %
 POTENCIA DE OPERACION 80.50 H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$ 118,922.62
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 1'281,166.38

CARGOS FIJOS.

| | | |
|---|---|-------|
| a).- DEPRECIACION = | = | 20 % |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18+3+1.5+2.5 | = | 25 % |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. = | = | 15 % |
| | | <hr/> |
| | | 60 % |

$$\text{COSTO/HORA} = \frac{\$0.60 \times 1'281,166.48}{2000 \text{ HRS/AÑO}} = 384.35$$

CONSUMOS.

| | | |
|----------------------------|----------------------------|------------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x H.P. x \$ | = \$ |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x 80.50 H.P. x \$ | = \$ 12.19 |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = 0.30 LTS/HRA. x \$ | = \$ 8.82 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = 0.04 LTS/HRA. x \$ | = \$ 1.16 |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = 0.11 LTS/HRA. x \$ | = \$ 3.18 |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = 0.08 LTS/HRA. x \$ | = \$ 2.31 |
| g).- GRASA | = 0.03 KG/HRA. x \$ | = \$ 0.91 |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. x \$ | = \$ 7.50 |
| i).- LLANTAS | = \$118922.68 / 1.15 | = \$ 45.59 |
| | 3000 HRA. | <hr/> |
| | | 81.66 |

OPERACION

OPERADOR = \$ 413.61
 AYUDANTE = \$ _____
 413.61 / TURNO

$$\text{COSTO/HORA} = \frac{\$ 413.61}{\text{HRA/TURNO}} = \$ 51.70$$

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Arado Agrícola Rome R-32
 METODO: SARH

UNIDAD
 HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 60,959.44
 VIDA ECONOMICA 5 AÑOS DE 1400 HRS/AÑO
 MOTOR DE H.P.
 FACTOR DE OPERACION %
 POTENCIA DE OPERACION H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 60,959.44

CARGOS FIJOS.

| | | |
|-------------------------------|--------------|--------------|
| a).- DEPRECIACION = | | 20 \$ |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. = | 18+3+1.5+2.5 | 25 \$ |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. = | | 10 \$ |
| | | <u>55 \$</u> |

$$\text{COSTO/HRA} = \frac{\$0.55 \times 60,959.44}{1400} = 23.95 \text{ HRS/AÑO}$$

CONSUMOS.

| | | | | |
|----------------------------|------------------|------------|----|-------------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x | H.P. x | \$ | |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x | H.P. x | \$ | |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = | LTS/HRA. x | \$ | |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = | LTS/HRA. x | \$ | |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = | LTS/HRA. x | \$ | |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = | LTS/HRA. x | \$ | |
| g).- GRASA | = | KG/HRA. x | \$ | |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. | x | \$ | |
| i).- LLANTAS | = \$ | x 1.15 | \$ | |
| | | | | <u>HRA.</u> |

OPERACION

OPERADOR = \$ _____
 AYUDANTE = \$ _____
 / TURNO

$$\text{COSTO/HORA} = \frac{\$ \text{ } / \text{ TURNO}}{\text{HRA/TURNO}} = \$ \text{ }$$

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Rastra Agrícola Rome 111W-20-24
 METODO: SARI

UNIDAD
 HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 60,959.24
 VIDA ECONOMICA 5 AÑOS DE 1400 HRS/ARO
 MOTOR DE H.P.
 FACTOR DE OPERACION %
 POTENCIA DE OPERACION H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 60,959.24

CARGOS FIJOS.

a).- DEPRECIACION = 20 %
 b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18+3+1.5+2.5 = 25 %
 c).- TALLER DE REP. Y MANT. = 10 %
 55 %

$$\text{COSTO/HRA} = \frac{\$0.55 \times 60,959.24}{1400} = 23.95 \text{ HRS/ARO}$$

CONSUMOS.

| | | | |
|----------------------------|------------------|---------------|------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x | H.P. x \$ | = \$ |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x | H.P. x \$ | = \$ |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = | LTS/HRA. x \$ | = \$ |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = | LTS/HRA. x \$ | = \$ |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = | LTS/HRA. x \$ | = \$ |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = | LTS/HRA. x \$ | = \$ |
| g).- GRASA | = | KG/HRA. x \$ | = \$ |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. | x \$ | = \$ |
| i).- LLANTAS | = | \$ x 1.15 | = \$ |
| | | HRA. | |

OPERACION

OPERADOR = \$
 AYUDANTE = \$ _____
 / TURNO

$$\text{COSTO/HORA} = \frac{\$ \text{ } / \text{TURNO}}{6 \text{ HRA/TURNO}} = \$$$

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Tractor Agrícola International 523
 METODO: SARI

UNIDAD
 HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 298,990.00
 VIDA ECONOMICA 5 AÑOS DE 2000 HRS/AÑO
 MOTOR diesel DE 47 H.P.
 FACTOR DE OPERACION 70 %
 POTENCIA DE OPERACION 32.90 H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$ 16,400.00
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 282,590.00

CARGOS FIJOS.

| | | |
|---|---|-------|
| a).- DEPRECIACION = | = | 20 \$ |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18+3+1.5+2.5 | = | 25 \$ |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. = | = | 15 \$ |
| | | <hr/> |
| | | 60 \$ |

COSTO/HORA = $\frac{\$11.60 \times 282,590.00}{2000 \text{ HRS/AÑO}} = 84.78$

CONSUMOS.

| | | |
|----------------------------|---|-----------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x H.P. x \$ | = \$ |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x 32.90 H.P. x \$ 1.00 | = \$ 4.98 |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = 0.2375 LTS/HRA. x \$ 29.40 | = \$ 6.98 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = 0.04 LTS/HRA. x \$ 28.93 | = \$ 1.16 |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = LTS/HRA. x \$ | = |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = LTS/HRA. x \$ | = |
| g).- GRASA | = 0.01 KG/HRA. x \$ 30.24 | = \$ 0.30 |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. x \$ 1125.00 | = \$ 5.63 |
| i).- LLANTAS | = $\frac{\$16,400.00 \times 1.15}{3000 \text{ HRA.}}$ | = \$ 6.29 |
| | | <hr/> |
| | | \$25.34 |

OPERACION

OPERADOR = \$ 413.61
 AYUDANTE = \$

 413.61 / TURNO

COSTO/HORA = $\frac{\$ 413.61}{8 \text{ HRA/TURNO}} = \$ 51.70$

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Petrolizadora Seaman-Gunnison 1580 SR
 METODO: SARI

UNIDAD
 HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 1'043,340.86
 VIDA ECONOMICA 5 AÑOS DE 2000 HRS/AÑO
 MOTOR gasolina DE 180 H.P.
 FACTOR DE OPERACION 50 %
 POTENCIA DE OPERACION 90 H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$ 31,380.00
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 1'011,960.86

CARGOS FIJOS.

| | | | |
|-----------------------------|---|--------------|-------|
| a).- DEPRECIACION | = | = | 20 \$ |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. | = | 18+3+1.5+2.5 | 25 \$ |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. | = | | 15 \$ |
| | | | <hr/> |
| | | | 60 \$ |

$$\text{COSTO/HRA} = \frac{\$0.60 \times 1'011,960.86}{2000 \text{ HRS/AÑO}} = 303.59$$

CONSUMOS.

| | | | | | | |
|----------------------------|---|-----------------|------|---------|---|----------|
| a).- GASOLINA | = | 0.227 x 90 H.P. | x \$ | 2.80 | = | \$ 57.20 |
| b).- DIESEL | = | 0.1514 x H.P. | x \$ | | = | |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = | 0.388 LTS/HRA. | x \$ | 29.40 | = | 11.41 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = | 0.04 LTS/HRA. | x \$ | 28.93 | = | 1.16 |
| e).- ACEITE DE MANO FINAL | = | LTS/HRA. | x \$ | | = | |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = | LTS/HRA. | x \$ | | = | |
| g).- GRASA | = | 0.01 KG/HRA. | x \$ | 30.24 | = | 0.30 |
| h).- FILTROS | = | 0.005 PZA/HRA. | x \$ | 1125.00 | = | 5.63 |
| i).- LLANTAS | = | \$31,380 x 1.15 | | | = | 12.03 |
| | | 3000 HRA. | | | = | \$ 87.73 |

OPERACION

OPERADOR = \$ 413.01
 AYUDANTE = \$ 286.34

 699.95 / TURNO

$$\text{COSTO/HORA} = \frac{\$699.95}{\text{HRA/TURNO}} = \$87.49$$

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Mtoconformadora Caterpillar 120-B
 METODO: SAH1

UNIDAD
HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 1'993,349.20
 VIDA ECONOMICA 5 AÑOS DE 2000 HRS/AÑO
 MOTOR diesel DE 125 H.P.
 FACTOR DE OPERACION 60 %
 POTENCIA DE OPERACION 75 H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$ 67,260.00
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 1'926,089.20

CARGOS FIJOS.

| | | |
|---|---|------|
| a).- DEPRECIACION = | = | 20 % |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18+3+1.5+2.5 | = | 25 % |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. = | = | 15 % |
| | | 60 % |

COSTO/HRA = $\frac{\$ 0.60 \times 1'926,089.20}{2000 \text{ HRS/AÑO}} = 577.83$

CONSUMOS.

| | | | | | |
|----------------------------|------------|--------------------------------------|----|---------|-------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x | H.P. x | \$ | | |
| b).- DIESEL | = 0.1614 x | 75 H.P. x | \$ | 1.00 | 11.36 |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = 0.474 | LTS/HRA. x | \$ | 29.40 | 13.94 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = 0.08 | LTS/HRA. x | \$ | 28.93 | 2.31 |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = 0.04 | LTS/HRA. x | \$ | 28.93 | 1.16 |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = 0.04 | LTS/HRA. x | \$ | 28.93 | 1.16 |
| g).- GRASA | = 0.01 | KG/HRA. x | \$ | 30.24 | 0.30 |
| h).- FILTROS | = 0.006 | PZA/HRA. x | \$ | 1500.00 | 7.50 |
| i).- LLANTAS | = | $\frac{\$ 67,260}{3000} \times 1.15$ | | | 25.78 |
| | | 3000 HRA. | | | 63.51 |

OPERACION

OPERADOR = \$ 413.61
 AYUDANTE = \$ 286.34

 699.95 / TURNO

COSTO/HORA = $\frac{\$ 699.95}{\text{HRA/TURNO}} = \$ 87.49$

160

C. O. = \$ 728.83 /HORA

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Aplanadora de 3 rodillos Huber Warco (10-12 Ton.)
 METODO: SARI

UNIDAD
HORA

DATOS BASICOS.

PRECIO DE ADQUISICION \$ 1'125,997.40
 VIDA ECONOMICA 7 AÑOS DE 2000 HRS/ARO
 MOTOR diesel DE 85 H.P.
 FACTOR DE OPERACION 70 %
 POTENCIA DE OPERACION 59.50 H.P.
 EQUIPO EXTRA \$
 - COSTO DE LAS LLANTAS \$
 COSTO NETO A DEPRECIAR \$ 1'125,997.40

CARGOS FIJOS.

| | | |
|---|---|-----------------|
| a).- DEPRECIACION = | = | 14.29 \$ |
| b).- INT. SEG. IMP. ALM. = 18+3+1.5+2.5 | = | 25.00 \$ |
| c).- TALLER DE REP. Y MANT. = | = | 12.00 \$ |
| | | <u>51.29 \$</u> |

$$\text{COSTO/HRA} = \frac{\$ 0.5129 \times 1'125,997.40}{2000 \text{ HRS/ARO}} = 288.76$$

CONSUMOS.

| | | |
|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| a).- GASOLINA | = 0.227 x H.P. x \$ | = \$ |
| b).- DIESEL | = 0.1514 x 59.50 H.P. x \$ | 1.00 = \$ 9.01 |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = 0.332 LTS/HRA. x \$ | 29.40 = \$ 9.76 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = 0.04 LTS/HRA. x \$ | 28.93 = \$ 1.16 |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = 0.04 LTS/HRA. x \$ | 28.93 = \$ 1.16 |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = 0.04 LTS/HRA. x \$ | 28.93 = \$ 1.16 |
| g).- GRASA | = 0.01 KG/HRA. x \$ | 30.24 = \$ 0.30 |
| h).- FILTROS | = 0.005 PZA/HRA. x \$ | 1500.00 = \$ 7.50 |
| i).- LLANTAS | = \$ x 1.15 | = \$ |
| | <u>HRA.</u> | <u>\$ 30.05</u> |

OPERACION

OPERADOR = \$ 413.61
 AYUDANTE = \$ 286.34
699.95 / TURNO

$$\text{COSTO/HORA} = \frac{\$ 699.95 / \text{TURNO}}{8 \text{ HRA/TURNO}} = \$ 87.49$$

ANALISIS DE MAQUINARIA

MAQUINA: Motobomba centrífuga de 3" de diámetro
 METODO: SPP

UNIDAD
 HORA

DATOS BASICOS.

| | | | | | |
|------------------------|----------------------------------|--|---------|---|---------|
| PRECIO DE ADQUISICION | \$ | 41,250.00 | | | |
| VIDA ECONOMICA | 5 AÑOS DE | 1200 | HRS/ARO | | |
| MOTOR | de gasolina | DE 12 | H.P. | | |
| FACTOR DE OPERACION | | 80 | % | | |
| POTENCIA DE OPERACION | | 9.60 | H.P. | | |
| EQUIPO EXTRA | | \$ 2,369.30 (niples, abrazaderas, mangueras) | | | |
| - COSTO DE LAS LLANTAS | | \$ 43,629.30 | | | |
| COSTO NETO A DEPRECIAR | | \$ 43,629.30 | | | |
| VALOR DE RESCATE 5% | | \$ 2,181.47 | | | |
| CARGOS FIJOS. | | | | | |
| DEPRECIACION | $D = \frac{Va - Vr}{Ve}$ | $\frac{43629.30 - 2181.47}{6000}$ | | | \$ 6.91 |
| INVERSION | $I = \frac{Va + Vr}{2 \cdot Ha}$ | $\frac{43629.30 + 2181.47}{2 \times 1200}$ | 0.18 | = | \$ 3.44 |
| SEGUROS | $S = \frac{Va + Vr}{2 \cdot Ha}$ | $\frac{43629.30 + 2181.47}{2 \times 1200}$ | 0.0136 | = | \$ 0.26 |
| ALMACENAJE | $A = Ka \cdot D$ | 0.025 X 6.91 | | = | \$ 0.17 |
| MANTENIMIENTO | $M = QD$ | 1.00 X 6.91 | | = | \$ 6.91 |
| | | | | | \$17.69 |

CONSUMOS.

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---|--------|---|-----------|------|----|-------|--|---|----|------|
| a).- GASOLINA | = | 0.227 | x | 9.60 H.P. | x | \$ | 2.87 | | = | \$ | 6.25 |
| b).- DIESEL | = | 0.1514 | x | H.P. | x | \$ | | | = | \$ | |
| c).- ACEITE DEL MOTOR | = | 0.04 | | LTS/HRA. | x | \$ | 32.24 | | = | \$ | 1.29 |
| d).- ACEITE DE TRANSMISION | = | | | LTS/HRA. | x | \$ | | | = | \$ | |
| e).- ACEITE DE MANDO FINAL | = | | | LTS/HRA. | x | \$ | | | = | \$ | |
| f).- ACEITE HIDRAULICA | = | | | LTS/HRA. | x | \$ | | | = | \$ | |
| g).- GRASA | = | 0.01 | | KG/HRA. | x | \$ | 33.26 | | = | \$ | 0.33 |
| h).- FILTROS | = | 0.005 | | PZA/HRA. | x | \$ | | | = | \$ | |
| i).- LLANTAS | = | | | x | 1.15 | \$ | | | = | \$ | |
| | | | | | | | HRA, | | | | 7.87 |

OPERACION

OPERADOR = \$ 286.34
 AYUDANTE = \$ _____
286.34 / TURNO

COSTO/HORA = \$ $\frac{286.34}{8 \text{ HRA/TURNO}}$ = \$ 35.79

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

OBRA: _____ UBICACION: _____
 CONCURSO: _____ CLIENTE: _____
 FECHA: Marzo/80 No DE OBRA: _____ HOJA No: _____ DE _____

| | | |
|--------------|--|--------------------------|
| ANALISIS No. | Agua acarreada de banco a obra a una distancia aproximada de 2.5 Km. | UNIDAD M ³ |
|--------------|--|--------------------------|

MATERIALES

| | U | CANTIDAD | C D | IMPORTE |
|----------------------------------|---|----------|-----|---------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| COSTO TOTAL DE MATERIALES | | | | |

MANO DE OBRA

| | U | CANTIDAD | C D | IMPORTE |
|------------------------------------|---|----------|-----|---------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA | | | | |

EQUIPO

| | U | CANTIDAD | C D | IMPORTE |
|-------------------------------------|----------------|----------|--------|---------------|
| Carga Pipa activa | M ³ | 0,0356 | 191.57 | 6.83 |
| Acarreo (ida y regreso) Pipa ociosa | M ³ | 0,0865 | 276.76 | 23.94 |
| Descarga Motobomba /3" | M ³ | 0,0231 | 61.35 | 1.42 |
| COSTO TOTAL DEL EQUIPO | | | | \$2.19 |

HERRAMIENTA

| | U | CANTIDAD | C D | IMPORTE |
|-----------------------------------|---|----------|-----|---------|
| | | | | |
| | | | | |
| COSTO TOTAL DE HERRAMIENTA | | | | |

VARIOS

| | U | CANTIDAD | C D | IMPORTE |
|------------------------------|---|----------|-----|---------|
| | | | | |
| COSTO TOTAL EN VARIOS | | | | |

C.D. per litro 0,032 \$/lt.

| | |
|------------------------|---------------|
| COSTO TOTAL | \$2.19 |
| INDIRECTOS Y UTILIDAD | % |
| PRECIO UNITARIO | |

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

OBRA: _____ UBICACION _____
 CONCURSO: _____ CLIENTE _____
 FECHA: _____ No. DE OBRA _____ HOJA No _____ DE _____

| | | |
|---------------------|--|---------------------------------|
| ANALISIS No. | Estabilización de sub-base de 20 cm. de espesor compactado al 95% prueba Proctor estándar ASTM 199 | UNIDAD M ³ |
|---------------------|--|---------------------------------|

MATERIALES

| | U | CANTIDAD | C D | IMPORTE |
|---|----------------|----------|------|---------|
| Cal | M ³ | 91.96 | 1.45 | 133.34 |
| 81 X 1100 Kg/m ³ X 0.25 X 1.10 1/2 cal P.V.S.M. Comp. desp. | | | | |
| COSTO TOTAL DE MATERIALES. | | | | 133.34 |

MANO DE OBRA

| Fabricación y colocación (Esparcido, despedrado) | | | | |
|--|-----|--------|----------|----------|
| 0.5 cabo | | 477.24 | | 238.02 |
| 4 peones | | 267.21 | | 1,068.34 |
| | jor | 0.0052 | 1,307.02 | 6.80 |
| COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA | | | | 6.80 |

EQUIPO

| | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------------|----------|------|----------|
| 1 Pipa | 276.76 | 1 Duplicador | 511.18 | | |
| 1 Motoconformadora | 728.83 | | | lora | 0.4154 |
| 1 Travel-Mixer | 517.71 | | 2,406.02 | | 2,406.02 |
| 2 Tractor Agrícola | 323.64 | | | | |
| 1 Arado Agrícola | 23.95 | | | | |
| 1 Rastra Agrícola | 23.95 | | | | |
| COSTO TOTAL DEL EQUIPO | | | | | 99.94 |

HERRAMIENTA

| | | | | |
|-----------------------------------|-----|------|------|------|
| 5 % sobre la mano de obra | M.O | 0.03 | 6.80 | 0.20 |
| COSTO TOTAL DE HERRAMIENTA | | | | 0.20 |

VARIOS

| | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|
| COSTO TOTAL DE VARIOS | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|

COSTO TOTAL
 2407.28

Análisis para acarreo de agua

1. Tiempo de carga:

Gasto bomba / 3" 900 Lt/min (SARH)

-Llenado

$$\frac{8000 \text{ Lt}}{900 \text{ Lt} \times 0.80} = 11.11 \text{ min.}$$

-Espera y maniobras de acomodo $\frac{6.00 \text{ min}}{17.11 \text{ min}}$

$$\frac{17.11 \text{ min}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ Hora}}{8 \text{ m}^3} = 0.0356 \text{ hora/m}^3$$

2. Acarreo:

-Ida (V = 15 Km/Hra) $\frac{2.5 \text{ Km}}{15 \text{ Km/Hra}} = 0.167 \text{ Hra.}$

-Regreso (V = 20 Km/Hra) $\frac{2.5 \text{ Km}}{20 \text{ Km/Hra}} = 0.125 \text{ Hra.}$

-Descarga (Q = 333 Lt/Min.) $\frac{8000}{300} = \frac{24.02 \text{ min} = 0.40 \text{ Hra}}{0.692 \text{ Hra}}$

$$\frac{0.692 \text{ Hra}}{8 \text{ m}^3} = 0.0865 \text{ Hra/m}^3$$

3. Cargo por motobomba:

$$\frac{11.11 \text{ min}}{8 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ Hra}}{60 \text{ min}} = 0.0231 \text{ Hra/m}^3$$

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

OBRA: _____ **UBICACION:** _____
CONCURSO: _____ **CLIENTE:** _____
FECHA: Marzo/80 **No DE OBRA:** _____ **HOJA No:** _____ **DE:** _____

| | | |
|---------------------|--|---------------------------------|
| ANALISIS No. | Sub-base de grava cementada de 25 cm. de espesor compactada al 95% de su peso volumétrico seco máximo. | UNIDAD M ³ |
|---------------------|--|---------------------------------|

MATERIALES

| | U | CANTIDAD | C D | IMPORTE |
|---|----------------|----------|--------|---------------|
| Material de sub-base (40% abundamiento y 10% desperdicio) | M ³ | 1.500 | 285.00 | 427.50 |
| Agua | M ³ | 0.200 | 32.19 | 6.44 |
| COSTO TOTAL DE MATERIALES | | | | 433.94 |

MANO DE OBRA

| | | | | |
|------------------------------------|-----|--------|----------|-------------|
| Despedrando material | | | | |
| -0.5 Cabo | | 477.24 | 238.62 | |
| -4 peones | | 267.21 | 1,068.84 | |
| | | | 1,307.46 | |
| | hor | 0.005 | 1,307.46 | 6.54 |
| COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA | | | | 6.54 |

EQUIPO

| | | | | |
|--------------------------------------|------|--------|--------|--------------|
| Motoconformadora (Extendido y afine) | hora | 0.0125 | 728.83 | 9.11 |
| Plancha (Anado) | hora | 0.025 | 406.30 | 10.16 |
| Compactor (Cerrado y compactación) | hora | 0.025 | 511.18 | 12.78 |
| COSTO TOTAL DEL EQUIPO | | | | 19.27 |

HERRAMIENTA

| | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|-------------|
| 3.3 sobre la mano de obra | M.O. | 0.03 | 6.54 | 0.20 |
| COSTO TOTAL DE HERRAMIENTA | | | | 0.20 |

VARIOS

| | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|
| | | | | |
| COSTO TOTAL DE VARIOS | | | | |

| | |
|--|---------------|
| COSTO DIRECTO TOTAL MATERIALES Y EQUIPO PRECIO UNITARIO | 459.95 |
|--|---------------|

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

OBRA: _____ UBICACION: _____
 CONCURSO: _____ CLIENTE: _____
 FECHA: Marzo/80 No. DE OBRA: _____ HOJA No. _____ DE _____

| | | |
|--------------|---|--------------------------|
| ANALISIS No. | Base de grava cementada de 12.50 cm. de espesor compactada al 95% de su peso volumétrico seco máximo. | UNIDAD M ³ |
|--------------|---|--------------------------|

MATERIALES

| | U | CANTIDAD | C D | IMPORTE |
|----------------------------------|----------------|----------|--------|---------------|
| Material de base | M ³ | 1.500 | 310.00 | 465.00 |
| Agua | M ³ | 0.200 | 32.19 | 6.44 |
| COSTO TOTAL DE MATERIALES | | | | 471.44 |

MANO DE OBRA

| | | | | |
|------------------------------------|-----|--------|-----------------|-------------|
| Despedrando material | | | | |
| -0.5 Cabo | | 477.24 | 238.62 | |
| -4 peones | | 267.21 | <u>1,068.84</u> | |
| | | | 1,307.46 | |
| | jor | 0.005 | 1,307.46 | 6.54 |
| COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA | | | | 6.54 |

EQUIPO

| | | | | |
|--|------|--------|--------|--------------|
| Motoconformadora (Extendido y afinado) | hora | 0.0167 | 728.83 | 12.17 |
| Plancha (Armado) | hora | 0.0333 | 406.30 | 13.53 |
| Compactor (Cerrado y compactación) | hora | 0.0333 | 511.18 | 17.02 |
| COSTO TOTAL DEL EQUIPO | | | | 42.72 |

HERRAMIENTA

| | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|-------------|
| 3% sobre la mano de obra | M.O. | 0.03 | 6.54 | 0.20 |
| COSTO TOTAL DE HERRAMIENTA | | | | 0.20 |

VARIOS

| | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|
| | | | | |
| COSTO TOTAL DE VARIOS | | | | |

| | |
|--|---------------|
| COSTO PRECIO TOTAL MATERIALES Y MANO DE OBRA PRECIO UNITARIO | 520.90 |
|--|---------------|

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

OBRA: _____ UBICACION: _____
 CONCURSO: _____ CLIENTE: _____
 FECHA: Marzo/80 No. DE OBRA: _____ HOJA No. _____ DE _____

| | | |
|---------------------|--|----------------|
| ANALISIS No. | Carpeta asfáltica de 7.50 cm. de espesor compactado, incluyendo riego de liga o impregnación | UNIDAD |
| | Acarreo hasta 20.00 Km. | M ² |

MATERIALES

| | U | CANTIDAD | C O | IMPORTE |
|---|------|----------|--------|--------------|
| Acarreo | Ton. | 0.219 | 49.50 | 10.84 |
| Concreto asfáltico | Ton. | 0.219 | 277.50 | 60.77 |
| Asfalto rebajado F.M. 1 (30% desperdicio) 1.5 X 1.3 | Lt. | 1.95 | 1.60 | 3.12 |
| Asfalto rebajado F.R. 3 (30% desperdicio) 1.0 X 1.3 | Lt. | 1.30 | 1.60 | 2.08 |
| COSTO TOTAL DE MATERIALES. | | | | 76.81 |

MANO DE OBRA

| | | | | |
|------------------------------------|-----|----------|----------|-------------|
| Extendido de material | | | | |
| - 1 cabo | | 477.24 | 477.24 | |
| - 2 rastrilleros | | 267.21 | 534.42 | |
| - 2 manteando | | 267.21 | 534.42 | |
| - 2 escoba | | 267.21 | 534.42 | |
| | | 2,080.50 | | |
| | jor | 0.001 | 2,080.50 | 2.08 |
| COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA | | | | 2.08 |

EQUIPO

| | | | | |
|--|------|-------|---------------|--------------|
| Extendedora de concreto asfáltico | hora | 0.008 | 633.42 | 5.07 |
| Aplanadora (Armado) | hora | 0.008 | 406.30 | 3.25 |
| Compactor (cerrado de carpeta, compactación) | hora | 0.004 | 511.18 | 2.05 |
| Tractor agrícola y cajón neumático (complementar compact.) | hora | 0.004 | 161.82+295.67 | 1.85 |
| Petrolizadora (riegos de liga o impregnación) | hora | 0.006 | 478.81 | 2.87 |
| COSTO TOTAL DEL EQUIPO | | | | 15.07 |

HERRAMIENTA

| | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|-------------|
| 10 % sobre la mano de obra | M.O. | 0.10 | 2.08 | 0.21 |
| COSTO TOTAL DE HERRAMIENTA | | | | 0.21 |

VARIOS

| | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|
| | | | | |
| COSTO TOTAL DE VARIOS | | | | |

| | |
|------------------------|--------------|
| Costo directo total | 94.17 |
| Indirectos y utilidad | 0.00 |
| PRECIO UNITARIO | 94.17 |

Análisis para carpeta asfáltica

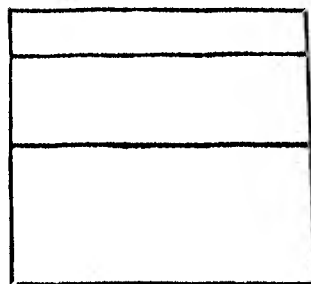
Km. Ton/Km Imp.
Acarreo 20.00 X \$2.34 X 1.04 = 49.50 Ton.

Asfalto (concreto)

0,075 m X 1.00 m² X 2.25 Ton/m³ X 1.20 X 1.08 = 0.219 Ton.
espesor área peso asfalto abund. desp.

Con los análisis anteriores podemos concluir:

Costo directo de un pavimento con capas constitutivas de material graduado (m^2).



7.50 cm. carpeta.

12.50 cm. base

25.00 cm. sub-base

carpeta de concreto asfáltico ₡ 94.17

base de grava cementada ₡ 65.11

$$1.00 \times 0.125 = 0.125 m^3$$

$$0.125 \times 520.90 = 65.11$$

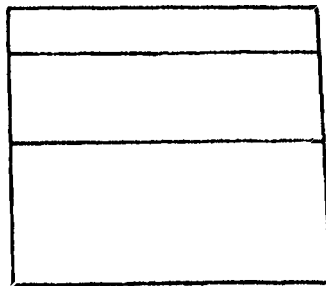
sub-base de grava cementada ₡ 1149.9

$$1.00 \times 0.25 = 0.250 m^3$$

$$0.250 \times 459.95 = 114.99$$

TOTAL = 274.27

Costo directo de un pavimento con capas constitutivas de material estabilizado. (m^2).



7.50 cm carpeta

12.50 cm. base
grava cementada

20.00 cm. sub-base
suelo-cal.

carpeta de concreto asfaltico ₡ 94.17

base de grava cementada ₡ 65.11

sub-base de suelo-cal ₡ 48.06

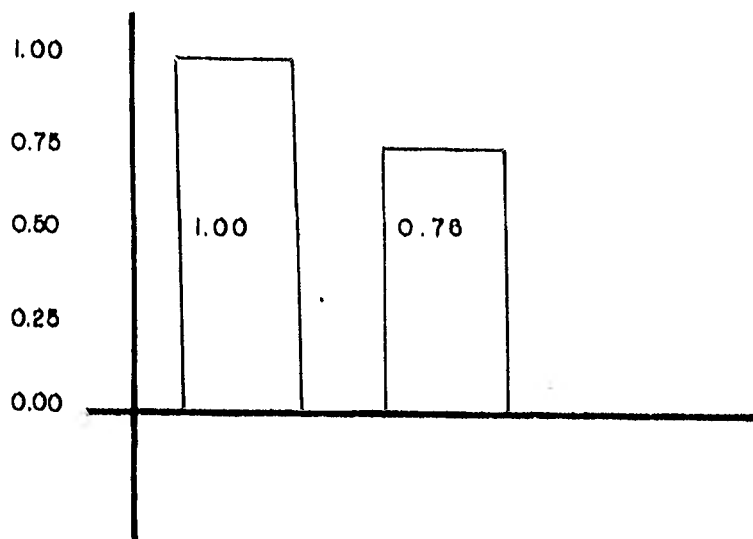
$$1.00 \times 0.20 = 0.20 \text{ m}^3$$

$$0.20 \times 240.28 = 48.06$$

TOTAL ₡ 207.34

Comparando ambos importes encontramos que el pavimento mas economico es aquel donde interviene la capa de suelo estabilizado

Dando un valor igual a la unidad al tipo convencional, los costos comparativos arrojan los siguientes valores;



CAPITULO VIII

Conclusiones.

Después de haber desarrollado este trabajo se pueden advertir las ventajas del uso de la cal para mejorar los suelos, la diversidad de suelos que son susceptibles de reaccionar y la facilidad en su aplicación nos proporciona una alternativa adecuada en diferentes tipos de trabajo.

Al ser México un país donde las soluciones económicas son una necesidad, la cal se presenta como un material ideal para ser empleado exitosamente en obras donde es necesario un material estabilizante.

La gran cantidad de arcillas existentes en la república vienen a reforzar las razones para emplearla, los resultados presentados en el capítulo IV son el reflejo del mejoramiento experimentado por este tipo de suelos.

Se observa también que durante su proceso constructivo se emplea equipo de fácil adquisición en el mercado nacional, lo que simplifica su compra y mantenimiento de dicho equipo, con esto los costos disminuyen.

La comparación económica entre pavimentos tradicionales y de capas estabilizadas resulta claramente favorable al de estructura estabilizada.

En suma podemos asegurar que las bondades presentadas por la cal la hacen un material de trabajo insuperable y una alternativa que no se debe olvidar.

B I B L I O G R A F I A

1. Ingles, O.G. y Metcalf, J.B. Soil Stabilization: Principles and practice, Butterworths. Sydney, 1972.
2. Lambe, T.W. Foundation Engineering. The McGraw-Hill Book Co., Inc., 1962.
3. Neville, A.M. Tecnología del Concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, 1977.
4. American Hoist and Derrick Company, Handbook of soil stabilization, USA, 1978.
5. Velázquez, M. Asfaltos, Dossat, S.A., Madrid, 1961.
6. Rico, A. y Del Castillo, H. La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, LIMUSA, México, 1977.
7. The Asphalt Institute, Manual del Asfalto, España, 1973.
8. Soiltest, Ensayo de Suelos Fundamentales para la Construcción, USA.
9. Boyton, R.S. Chemistry and Technology of Lime and Limestone, Wiley, 1966.
10. Highway Research Record, Number 351 (1971)
Soil Stabilization: Asphalt, Lime, Cement,
10 Reports
-Soil Stabilization: A mission oriented approach, J.A. Epps, Texas A And M University, College Station; and D.D. Currin, U.S. Department of the Air Force, Kirtland, Air Force Base, New Mexico.
11. Manual de compactacao vibratoria, DYNAPAC, Brasil.

12. National Lime Association, Lime Stabilization Construction, Manual Bulletin 326.
13. Highway Research Board, Bulletin 262.
14. National Lime Association, Lime Stabilization of Road, Bulletin 323.
15. National Lime Association, Lime Handling, Application and Storage, Bulletin 213.
16. Thompson, Marshall R. The Significance of Soil Properties in Lime Soil Stabilization, University of Illinois.
17. McDowell, Chester "Flexible Pavement Design Guide", The National Lime Association, Bulletin 327.
18. The Asphalt Institute, Soil Manual for Design of Asphalt Pavement Structures, Manual Series No. 10 (MS-10), The American Association of State Highway Officials.
19. Urquhart, L.C. Civil Engineering Handbook, McGraw-Hill Book Company, USA, 1959.
20. Escario, J.L. Caminos, P.E.T.S.I.C., Tomo 1, Madrid, 1967.
21. The Asphalt Institute, Asphalt Paving Manual, USA, 1965.
22. Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, Especificaciones Generales de Construcción.
23. Woods, Kenneth B. Highway Engineering Handbook, McGraw-Hill Book Company, USA, 1960.
24. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidraulicos, Manual de Precios Unitario de Trabajos de Construcción.