



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

267
54

**APUNTES DE LA MATERIA "SISTEMAS DE
TRANSPORTE TERRESTRE" PARTE TERCERA**

TRABAJO ESCRITO

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a :

David Ramón Corral Valenzuela

México, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

INDICE

	Pág.
1. TERRACERIAS DE LAS CARRETERAS	1
1.1 Características y Propiedades de los suelos	1
1.1.1 Pruebas en Suelos	3
1.1.2 Clasificación de Suelos	7
1.2 Trabajos topográficos	9
1.3 Terracerias	12
1.3.1 Volúmenes y movimiento de tierras	15
1.3.2 Curva Masa	21
1.3.3 Acarreos del material	23
2. SUPERESTRUCTURA DE LAS CARRETERAS	25
2.1 Estructura de una Carretera	25
2.1.1 Pavimentos Flexibles	26
2.1.2 Métodos de Diseño	29
2.2 Pavimentos de suelos estabilizados	45
2.2.1 Estabilización por mezclas de Suelos	45
2.2.2 Diseño de una mezcla	49
2.2.3 Estabilización por Adición de Sust. Químicas	50
2.3 Sub-base	51

2.4	Base	54
2.4.1	Bases Granulares	54
2.4.2	Bases Tratadas	55
2.4.2.1	Bases tratadas con asfalto	55
2.4.2.2	Bases Tratadas con cemento	58
2.5	Pavimentos bituminosos	63
2.5.1	Asfaltos	63
2.5.1.1	Cementos asfálticos	64
2.5.1.2	Asfaltos diluidos	64
2.5.1.3	Asfaltos emulsionados	65
2.5.2	Alquitranes	66
2.5.3	Propiedades y especificaciones de los agregados	67
2.5.4	Diseño de una mezcla	74
2.6	Carpetas	79
2.6.1	Carpeta por sistema de riegos	80
2.6.2	Carpeta de mezcla asfáltica	84
2.6.3	Carpeta de concreto asfáltico	85
2.6.3.1	Asfaltos laminares	86
2.6.3.2	Concretos bituminosos de graduación fina	87
2.6.3.3	Concretos bituminosos de graduación gruesa	89
2.6.4	Estabilidad de las mezclas	90

1. TERRACERIAS DE LAS CARRETERAS

Antes de empezar con lo que son las terracerías de un camino, recordaremos algunas de las características, pruebas y propiedades de los suelos que pueden constituirlos.

1.1 Características y propiedades de los suelos

Los suelos en su mayoría se componen de minerales, los cuales proceden de la descomposición lograda por el intemperismo, sobre los diferentes tipos de roca que existen (igneas, sedimentarias y metamórficas). Dependiendo de los agentes del intemperismo que actúen sobre una roca, se formará un suelo con características individuales por partícula, las cuales definirán el comportamiento de una masa del mismo. Dichas características son:

a) Tamaño de las partículas. Independientemente de las divisiones en el tamaño de cada una de las partículas, todas las agencias dedicadas al estudio de carreteras, clasifican a un suelo por el tamaño de sus partículas. La clasificación más usada, es la de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales (A.A.S.H.O.), y es la siguiente:

Clase	Diámetro de partículas			Tipo de mallas A través de Retenido en	
Grava	76.2	a	2.0 mm	7.62 cm.	# 10
Arena gruesa	2.0	a	0.42 mm	# 10	# 40
Arena fina	0.42	a	0.074 mm	# 40	# 200
Sedimentos	0.074	a	0.005 mm	# 200	----
Arcilla	0.005	a	0.001 mm	----	----
Arcilla coloidal menores de			0.001 mm	----	----

Como podemos ver, esta clasificación tiene varios tipos de suelo, y cada uno de ellos se comporta de una manera distinta; pero lo más importante de ello, es que las características de los suelos granulares como lo son: La grava y la arena, están relacionadas con la acción de la gravedad sobre su masa. Debido al poco peso que tienen los suelos finos, como las arcillas, su comportamiento no está regido por la acción de la gravedad sobre su masa; ya que ésta es muy pequeña.

Dado que las partículas de arcilla poseen carga eléctrica, éstas se repelen unas a otras, cuando la carga es igual, y debido a su forma exageradamente alargada dan origen a suelos floculentos.

b) Forma de las partículas. La forma de las partículas en un suelo, tiene mucho que ver en su comportamiento; ya que una partícula que se ha recogido de una corriente de agua y de forma redondeada, decimos que ésta, ha sufrido un proceso de desgaste y probablemente sea muy fuerte. Una partícula plana, quizá no ha tenido una prueba como para decir que sea fuerte, sino que, quizá sea débil y desmenuzable.

c) Textura superficial. El tipo de textura superficial de un suelo granular, influye bastante en sus propiedades mecáni--

cas, así como en su comportamiento. Por ejemplo: Los suelos -- como los loes, médanos y cuarzos triturados, tienen un coeficiente de fricción bajo entre sus partículas, por lo cual, son suelos que tienen poca resistencia a la deformación con la aplicación de una carga.

d) Composición química y carga eléctrica superficial. Los suelos en los que influye la composición química y la carga superficial, son aquellos en los que el volumen de la partícula -- es muy pequeño comparado con su área superficial.

Las partículas de estos suelos son exageradamente largas, y el tipo de carga eléctrica que generalmente tienen, es negativa en los lados y positiva en los extremos; por lo cual en estado natural estos suelos presentan estructuras floculentas.

Debido a la composición química de las arcillas, algunas de -- ellas absorben más agua que otras, dando origen a cambios volumétricos; debidos a los cambios de humedad que puedan presentarse en dicho suelo.

e) Densidad. La densidad de un suelo es muy importante, -- ya que nos da idea de la porosidad, relación de vacíos y grados de compactación; que son muy importantes para la resistencia y consolidación bajo la carga.

1.1.1 Pruebas en suelos

Para conocer las características que posee un determinado suelo, y las propiedades mecánicas del mismo, se han desarrollado una serie de pruebas; las cuales se describen a continuación:

a) Tamaño de las partículas. Ya se mencionó que el tamaño de las partículas de un suelo es importante, por lo cual, se --

han propuesto una serie de mallas de diferentes tamaños por las cuales se hace pasar una muestra, y así poder determinar en porcentajes, los diferentes tamaños de partículas del mismo. El tamaño normal de las diferentes mallas para la A.A.S.H.O. es el sig.:

Malla por números	# 4	# 10	# 40	# 200					
Malla en milímetros	50.8	38.1	25.4	19.1	9.52	4.76	2.0	0.42	.074

Este análisis por medio de mallas para determinar los diferentes tamaños de partículas, solo se utiliza para suelos granulares. Para los suelos de tamaño menor de 0.074 mm, como sedimentos y arcillas, se analizan por medio de la ley de Stokes; en la cual se observa la rapidez de sedimentación de las partículas de un suelo en un fluido. Esta prueba se realiza en un aparato llamado hidrómetro, y a la cual se denomina prueba hidrométrica.

b) Límites de plasticidad. Como ya se mencionó, la humedad de un suelo es de gran importancia para medir la consistencia del mismo; dando origen a los diferentes estados de plasticidad, como lo son: El estado sólido, semi-sólido, plástico y líquido. El contenido de humedad de un suelo con el cual éste pasa de un estado plástico a uno semi-sólido, es lo que conocemos como límite plástico.

El contenido de humedad con el cual un suelo cambia de su estado líquido a un estado plástico, es lo que se conoce como límite líquido.

La forma de obtener el límite plástico es la sig.: con una muestra de suelo y sobre una hoja de papel seco o placa de vidrio, se rola un rollito de 3 mm de diámetro; si éste no se agrieta, se deshace para repetir el proceso hasta que a los 3 mm de diámetro exactamente, éste se agriete en partes. Va que se ha logra

do lo anterior, se determina rápidamente el contenido de humedad a la muestra; el cual representará el límite plástico de dicho suelo.

El límite líquido se obtiene de la prueba realizada en la copa de casagrande, y es como sigue: sobre una copa de bronce de 5.4 cm de radio y 0.2 cm de espesor, se remoldea una muestra, a la cual se le hace una ranura trapecial de 2.0 mm en la parte inferior y 11 mm en la parte superior; el espesor de la muestra en el punto de la ranura es de 8 mm. Ya con la muestra preparada, se hace funcionar la copa, mediante un dispositivo excéntrico que la hace caer periódicamente desde 1 cm de alto. El contenido de agua para el cual la ranura se cierra 1.27 cm en 25 caídas o golpes de la copa, es lo que conocemos como límite líquido.

c) Índice de plasticidad. El índice de plasticidad se ha definido como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Dándose éste como un porcentaje del peso en seco del suelo. Físicamente, este valor indica, la interrelación de las fuerzas de atracción que tienden a mantener juntas las partículas de arcilla.

d) Factores de contracción. Estos valores como su nombre lo indica, son pruebas que se le hacen a una muestra de suelo para medir los cambios de volumen al variar el contenido de humedad de la misma. Estos factores son: límite de contracción, cambio volumétrico y contracción lineal, los cuales se definen a continuación.

El límite de contracción, es el contenido de humedad en el cual cesa el cambio de volumen de un suelo, aunque se siga bajando el contenido de humedad; expresándose éste, como un porcentaje del peso en seco.

El cambio volumétrico, como su nombre lo indica, es el cambio de volumen que presenta un suelo, cuando a éste se le varía el contenido de humedad, hasta alcanzar su límite de contracción; expresándose éste, como un porcentaje del volumen en seco.

La contracción lineal, es el porcentaje de disminución de un suelo, cuando a éste se le hace variar el contenido de humedad, hasta su límite de contracción.

e) Densidad de un suelo. La densidad de un suelo, es uno de los factores de los cuales dependen la resistencia y deformación del mismo. La densidad relativa de las partículas de un suelo varía de 2.0 a 3.3 ton./m³, pero la mayoría de ellas, se encuentran entre 2.6 y 2.7 ton/m³; por lo cual, si pudiera existir una partícula de 1 m³, ésta pesaría de 2.6 a 2.7 ton. Comúnmente un suelo está formado de partículas mucho menores de la mencionada, por lo cual, la forma en que se encuentran distribuidas en una masa, ocasiona que se presenten huecos que se llenan de agua o aire; los cuales presentan densidades menores que la de las partículas, por lo cual la densidad del suelo baja.

La forma de las partículas, también influye en la densidad de un suelo, debido a que, si éste presente partículas angulares y afiladas, aguantarán el cambio de estado suelto a compacto, mientras que partículas en forma de escamas, son difícil de compactar; lo cual ocasiona una disminución en la densidad.

La humedad de un suelo es otro de los factores que influye en la densidad, por la sig. razón: Si un suelo contiene poca cantidad de agua, la fricción que puede desarrollarse entre sus partículas es alta; motivo por el cual a la hora de compactar dicho suelo, éste presenta resistencia al reacomodo de sus partículas. Si la cantidad de agua se va aumentando, ésta empieza a tener un efecto lubricante.

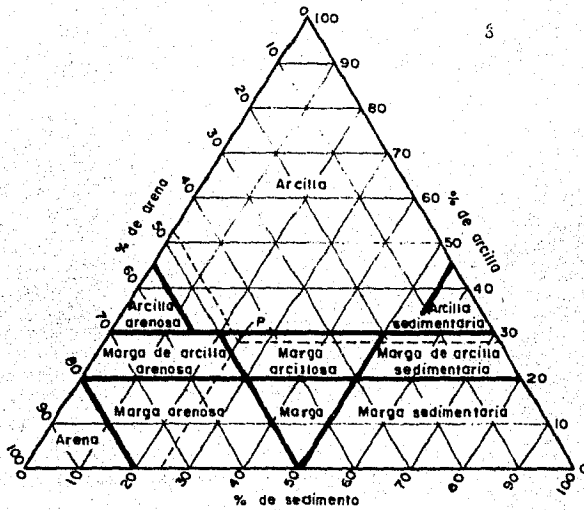
Si el contenido de agua se sigue aumentando hasta que esta llena todos los huecos, obtendremos la densidad del suelo más alta y el contenido de humedad óptimo; aunque es casi imposible, ya que siempre quedan pequeños huecos llenos de aire que no son ocupados por el agua, aún, aumentando un poco más el contenido de agua; lo cual ocasiona una disminución en la densidad, ya que esta empieza a desplazar las partículas del suelo.

1.1.2 Clasificación de suelos

La clasificación de los suelos, siempre ha sido una preocupación para todas las asociaciones dedicadas al estudio del comportamiento de los mismos. Se han elaborado diferentes clasificaciones que van desde la más simple; como lo es la clasificación por contextura, hasta las más detalladas; como lo son aquellas en las que se aplica una gran variedad de pruebas físicas.

La clasificación de los suelos preocupa a todos los ingenieros dedicados a ellos, ya que siempre tratará de ubicar un suelo, dentro de una clasificación, para así tener idea del comportamiento del mismo; ya que este se comportará de una manera similar, y sus propiedades mecánicas pueden ser predichas, el compararlo con el comportamiento de otros suelos conocidos del mismo grupo. A continuación se presentan algunas de las clasificaciones que se han propuesto:

a) Clasificación por contextura. Esta clasificación está basada únicamente, en la cantidad que contiene de c/u de las partículas que forman dicho suelo. Las distintas partículas pueden ser: arena, sedimento y arcilla, las cuales deben darse como porcentaje de una muestra. Ya con los valores anteriores y aprovechando el triángulo de la fig. 1, clasificamos dicho suelo.



Tamaño de las Partículas
 Granulación Milímetros
 Arena gruesa 2.0 a 0.25
 Arena fina 0.25 a 0.05
 Sedimento 0.05 a 0.005
 Arcilla Menor de 0.005

Fig. 1. Clasificación por textura

TABLA #1. Clasificación de suelos de la A.A.S.H.O. con los subgrupos sugeridos

Clasificación General	Materiales Granulados (35% ó menos a través del tamiz N.200)				Materiales de arcilla sedimentaria (más del 35% a través del tamiz N. 200)							
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Clasificación de Grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5, A-7-6	
Análisis de Tamiz % de paso: N° 10 N° 40 N°200	50 max 30 max 15 max	50 max 25 max	51 min 10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min	
Características de fracción que pasa el N° 40 Limite líquido índice de plasticidad	6 max		NP	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min *	
índice de grupo	0		0	0				4 max	8 max	12 max	16 max	20 max
Tipos usuales de materiales esenciales	Fragmentos de piedra arena y grava		Arena fina	Grava de azolve o arcillosa y arena				Terrenos de azolve		Terrenos arcillosos		
Calificación general como material para infraestructura	Excelente a bueno							Regular a malo				

* El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual ó menor que LL menos 30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30.

b) *Clasificación A.A.S.H.O.* Esta clasificación, fue una revisión y adaptación de la clasificación de la Administración de Caminos Públicos; la cual se obtuvo de una gran variedad de pruebas e investigaciones, clasificando a éstos por la estabilidad bajo la carga. La tabla 1, muestra los tipos de suelo, así como las características de c/u de ellos.

c) *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.).* En esta clasificación, el análisis mecánico y las pruebas de límite líquido y plástico, son los datos básicos para la designación de c/u de los suelos. La tabla 2, muestra los diferentes tipos de suelo, así como c/u de sus características.

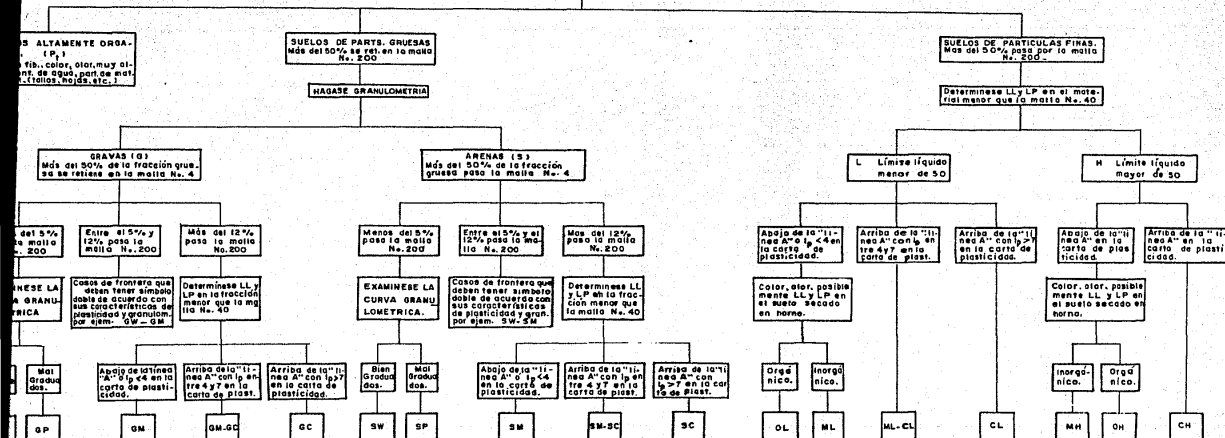
1.2 Trabajos Topográficos

Reconocimiento preliminar. Estos trabajos de reconocimiento -- preliminar, empiezan con la búsqueda de mapas y en especial los del servicio geológico, para poder así tratar las alternativas que sean factibles. Todas estas alternativas deben de cumplir con puntos obligados como lo son: Las terminales del camino, la localización única de un puente para cruzar un río, un solo paso para atravesar una montaña; cascadas, lagos, barrancas, bosques, etc.

Claro está, que existen diferentes puntos obligados para cada tipo de carretera a construir; por ejemplo, un pequeño poblado para una carretera principal, sería un punto ignorado, mientras que para una carretera secundaria, éste podría ser un punto obligado. Para las carreteras principales los factores de economía como lo son: El tipo de suelo que se tiene, las cantidades de corte y terraplenes necesarios para los alineamientos y las pendientes satisfactorias, son puntos secundarios dada la gran importancia de ésta.

PROCEDIMIENTO AUXILIAR PARA IDENTIFICACION DE SUELOS
EN EL LABORATORIO
S. U. C. S.

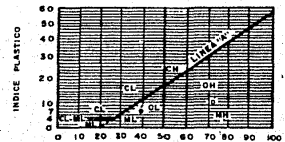
HAGASE UN EXAMEN VISUAL DEL SUELO PARA DET.
SI ES ALTAMENTE ORGANICO DE PARTICULAS GRUESAS
O DE PARTICULAS FINAS EN LOS CASOS DE FRONTERA
DETERMINESE LA CARTA QUE PASA LA MALLA N.º 200



NOTA. Los tamaños de los mallas son de la U. S. Estándar

SÍMBOLO DEL SUELO	NOMBRES TÍPICOS
GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arenas, con poco o nada de limos.
GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos.
GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.
GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.
SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos.
SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con poco o nada de finos.
SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.
ML	Limos inorgánicos, salvo de baja, limos arenosos o arcillosos, básicamente plásticos.
CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas orgánicas, arcillas limosas, arcillas pobres.
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos siltosos.
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.
OH	Arcillas orgánicas de alta a media plasticidad, limos orgánicos de media plast.
P _z	Turba y otros suelos altamente orgánicos.

COMPARANDO SUELOS A IGUAL LIMITE LIQUIDO LA TENACIDAD Y LA RESISTENCIA EN ESTADO SECO AUMENTAN CON EL INDICE DE PLASTICIDAD.



LIMITE LIQUIDO
CARTA DE PLASTICIDAD
PARA CLASIFICACION DE SUELOS DE PARTICULAS FINAS EN EL LABORATORIO

Cuando la carretera a construir deba hacerse sobre un terreno montañoso, una de las alternativas más factibles, sería buscar las corrientes de agua principales, para que por cualquier lado de esta pueda ir dicha carretera; ya que el agua al escurrir, siempre busca los puntos más bajos del terreno. A veces, la pendiente del escurrimiento excede los valores admisibles de la carretera, por lo cual deberá aumentarse la longitud del camino en los lados de la montaña.

Trazos topográficos. Anteriormente se hacía un reconocimiento de la zona a pie por un trazador, el cual se ayudaba por mapas topográficos de la zona. El objeto de esto, era fijar posibles rutas y determinar los primeros problemas, como pudieran ser montañas, cruce en ríos, zonas pantanosas. Para el reconocimiento de las rutas accesibles, el trazador a pie tomaba las pendientes grandes con un nivel de mano y estacaba la línea para cuando se hicieran los estudios topográficos a mayor detalle. Después de tener la línea estacada u otra alternativa, se procedía a la medición de ángulos y longitudes con tránsito y cinta, tomando un perfil por nivelación diferencial. Por último en el gabinete y sobre un plano, se vaciaban las posibles alternativas que al ser estudiadas por el ingeniero, marcaba el trazo final.

Va con el trazo final, se hacía el trazo definitivo sobre el terreno, y sobre el cual, se obtenían las secciones transversales y los desagües.

Hoy en día se hace exactamente lo mismo, solo que para ello se está aprovechando la topografía aérea, y chequeando los puntos en los que las fotografías no muestran información clara del mismo.

Topografía preliminar. Después de que el trazador ha recorrido la zona, éste prepara un informe, en el cual marca todos los puntos obligados y secundarios, así como las pendientes desfavorables.

rables, la naturaleza de las construcciones existentes y las -- condiciones del suelo a lo largo del camino.

Ahora que ya tenemos el informe anterior, y con ayuda de la fotogrametría, se prueban diferentes trazos con alineamientos vertical y horizontal distintos; y haciendo un análisis técnico-económico de cada uno de ellos, se selecciona el mejor.

Trazo definitivo. Ya con el trazo seleccionado, se procede al trazo definitivo; el cual consiste en el estacado de la línea central, permitiendo pequeños cambios en la alineación, ajustes de pendiente y relocalización de drenajes. Este trazo definitivo puede retrasarse, cuando se aprovechan los métodos fotogramétricos; ya que con ellos pueden darse a conocer las características topográficas del terreno, lo cual permite un ahorro del tiempo que tardará en dar comienzo la obra.

Teniendo el trazo definitivo, es buena costumbre hacer nuevos - el perfil y las secciones transversales, para obtener con mayor exactitud, los volúmenes de obra a pagar a la compañía constructora.

1.3 Terracerías

El movimiento de tierras necesario para dejar una superficie sobre la cual puede desplantarse la estructura de un camino, es - lo que conocemos con el nombre de terracerías. Siendo los espesores de corte y terraplen, el desnivel que haya entre el nivel de terreno natural y el nivel de las terracerías o subrasante.

El costo del movimiento de tierras anterior, es parte importante del costo total de la obra, motivo por el cual, es necesario buscar el movimiento de tierras mínimo que cumpla con las especificaciones geométricas del proyecto, que el alineamiento horizontal sea definitivo y que su elevación sea la suficiente para

evitar la humedad perjudicial, tanto a las terracerías como a la estructura del camino.

Como las terracerías están en función del nivel que se determine para la subrasante, es muy importante tener en cuenta los siguientes elementos:

- a) Condiciones topográficas
- b) Condiciones geotécnicas
- c) Subrasante mínima
- d) Costo de las terracerías

Las condiciones topográficas son importantes, ya que éstas obligan al proyecto a cumplir con ciertas características. Los diferentes tipos de terreno sobre el cual puede ir un camino son: plano, lomerío y montañoso.

En terreno plano, el nivel de subrasante deberá estar arriba -- del nivel de terreno natural, ya que de no ser así, se tendrían problemas de inundación, paso de alcantarillas y la humedad del mismo suelo. Dado lo anterior, el proyecto de la subrasante -- siempre será en terraplen y sin tener problemas de visibilidad.

Para los terrenos en lomerío la elección del nivel de la subrasante, está en función de las pendientes especificadas y aprovechando que el material de corte sea usado para los terraplanes de junto.

En este tipo de terrenos no se presenta ningún problema para -- alojar alcantarillas y puentes, tratándose de niveles. Una de las cosas importantes aquí, es que si se toma en cuenta la visibilidad de rebase, la cantidad de tierra a mover se incrementará.

En terrenos montañosos el volúmen de tierra a mover es muy grande, además de hacer uso de varias especificaciones al límite.

También se puede disponer de espacio para alojar las alcantarillas, puentes y no olvidar que si se quiere tomar en cuenta la visibilidad de rebase el costo se eleva en gran medida.

Las condiciones geotécnicas del terreno sobre el cual se localiza el proyecto de la subrasante, es de gran importancia, ya que las propiedades de los materiales, la clasificación de los mismos y el tratamiento a darles para la construcción de terraplenes influyen en gran medida, económica y constructivamente hablando.

En México los diferentes tipos de suelos, se han clasificado en 3 tipos: A, B, y C. Los materiales tipo "A", son aquellos suelos poco o nada cementados con partículas de 7.5 cms. máximo, los cuales pueden ser atacados con pico, pala de mano o pala mecánica.

Los materiales tipo "B", son aquellos suelos que contienen piedras de 7.5 a 75 cms. los cuales pueden ser atacados con arado o explosivos ligeros.

Los materiales tipo "C". son aquellos suelos que solo pueden ser atacados mediante el uso de explosivos.

El nivel de terracerías mínimo, es la elevación que resulta de respetar tanto los puntos obligados del proyecto como los de la seguridad para la estructura. Los elementos que rigen los puntos anteriores, son los siguientes: obras menores, puentes, zonas de inundación e intersecciones.

Las obras menores generalmente tienen importancia en cuanto a la elevación de las terracerías, solo cuando el camino se en-

cuentra en terreno plano. Estas obras están destinadas al buen funcionamiento de la canalización de las aguas pluviales.

Los puentes en un camino, obligan la elevación de las terracerías a un cierto nivel, ya que es necesario respetar el nivel de aguas máximas extraordinarias que se presente al cruzar el puente, así como el espacio necesario para dar libre paso a los cuerpos flotantes.

Las zonas de inundación también fijan una elevación mínima para las terracerías, ya que es necesario tener una sobre-elevación sobre el nivel de aguas máximas extraordinarias, y además, asegurar la estabilización de los terraplenes y estructura del camino.

Las intersecciones que tendrá el camino con caminos o vías de ferrocarril existentes, son puntos que fijan la elevación de las terracerías y deberán de tomarse en consideración para dicha determinación.

Va que el costo de c/u de los conceptos que intervienen en las terracerías o mov. de tierras, no depende del nivel de las terracerías sino del tipo de material por mover, lo importante será calcular lo más aproximado posible, los volúmenes de material, determinando así, el costo de las mismas.

1.3.1 Volúmenes y Mov. de Tierras

Antes de tratar el cálculo de los volúmenes y el mov. de los materiales, hablaremos de las secciones transversales o de construcción sobre los cuales se basa el cálculo de los mismos. En las figuras (2 y 3) podemos ver 2 tipos de sección de construcción, así como los espesores de corte y terraplen necesarios para dar el nivel de terracerías.

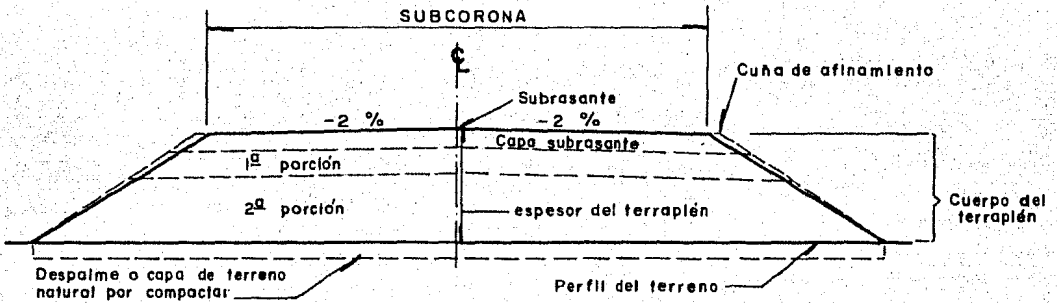


Fig. 2. Sección de construcción de un terraplén en tangente

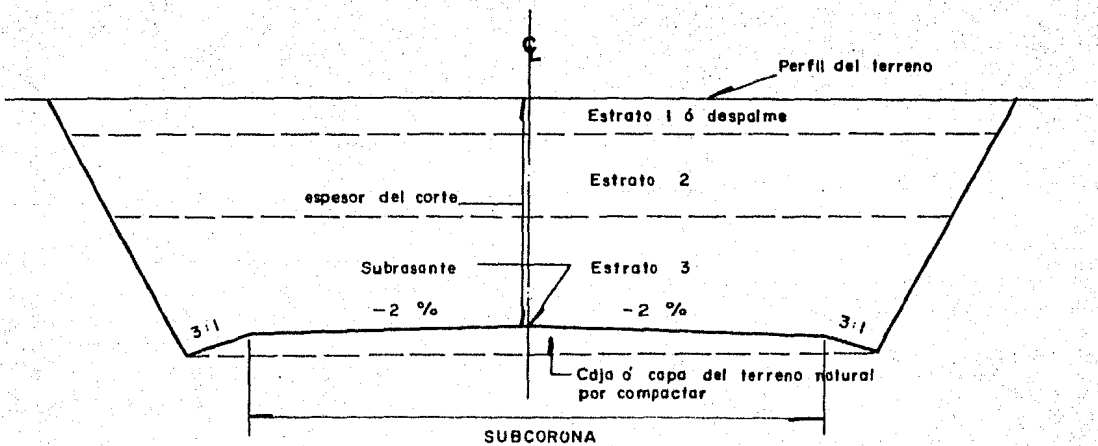


Fig. 3. Sección de construcción de un corte en tangente

Existen varios métodos para el cálculo del área de una sección de construcción, a continuación mencionaremos los 3 más utilizados:

- a) Método analítico
- b) Método gráfico
- c) Método del planímetro

El método analítico se basa en la descomposición de una sección, en figuras geométricas regulares como se muestra en la fig. 4, - en la cual podemos ver que se trata de una sección en corte, y referida a un sistema de ejes cartesianos. De la misma fig. podemos ver, que el área de la sección de construcción es como sigue:

$$A_x = A \{ajkca\} + A \{ckldc\} + A \{dlmf d\} - \left[A \{ajgba\} + A \{bgheb\} + A \{ehmfe\} \right]$$

$$A_x = \frac{y_3 + y_2}{2} (x_3 - x_2) + \frac{y_4 + y_3}{2} (x_4 - x_3) + \frac{y_5 + y_4}{2} (x_5 - x_4) - \left[\frac{y_1 + y_2}{2} (x_1 - x_2) + \frac{y_6 + y_1}{2} (x_6 - x_1) + \frac{y_5 + y_6}{2} (x_5 - x_6) \right]$$

$$A_x = \frac{1}{2} \left[x_2 y_1 + x_3 y_2 + x_4 y_3 + x_5 y_4 + x_6 y_5 + x_1 y_6 - (x_1 y_2 + x_2 y_3 + x_3 y_4 + x_4 y_5 + x_5 y_6 + x_6 y_1) \right]$$

La fórmula anterior, para la determinación del área, puede expresarse matricialmente como sigue; y puede ser muy aprovechable cuando se tiene la ayuda de una computadora.

$$A_x = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_1 \end{vmatrix}$$

El método gráfico se basa en la formación de una serie de trapezios y triángulos sobre la sección de construcción, como se muestra en la fig. 5. Basandonos en esta fig. el área de la sección será:

$$A_x = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \dots + A_{n-1} + A_n$$

$$A_x = A_1 + \frac{a+b}{2} S + \frac{b+c}{2} S + \frac{c+d}{2} S + \dots + \frac{j+k}{2} S + \frac{k+l}{2} S + A_n$$

$$A_x = A_1 + \left\{ \frac{a}{2} + b + c + d + \dots + j + k + \frac{l}{2} \right\} S + A_n$$

La fórmula anterior, nos dará el área de la sección de construcción, tomando en cuenta, que mientras más pequeña sea "S", seguiremos con mayor exactitud la configuración de la sección, y los resultados serán más reales. Los valores de A₁ y A_n, están en función de los valores que se le den a "S"; ya que son las áreas de cierre de la sección. El valor de "S", comúnmente usado en México es de 1.0 mts.

El método del planímetro es utilizado para calcular áreas de figuras irregulares, y dada la rapidez con la cual opera y la precisión requerida para el cálculo de las áreas es el método más usado. Este método está basado en un instrumento de medición mecánico denominado planímetro, existen varios tipos de éstos, pero el más utilizado es el tipo polar el cual se describe a continuación:

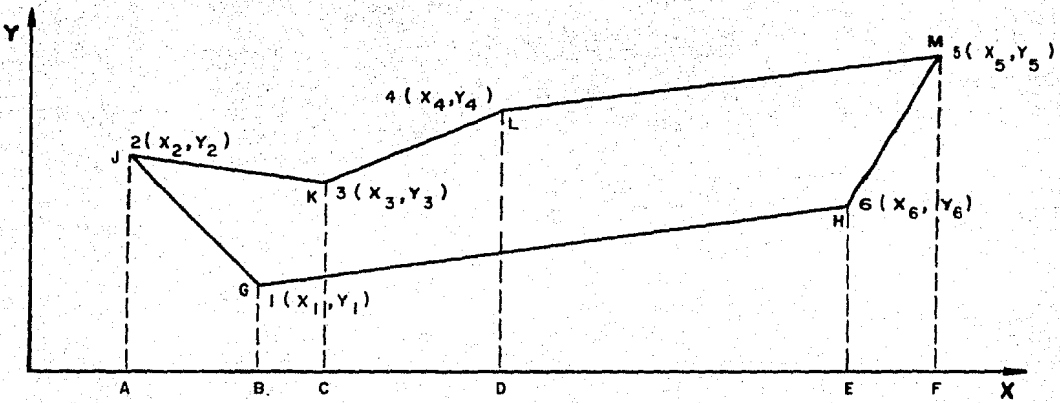


Fig. 4. Determinación de áreas, método analítico

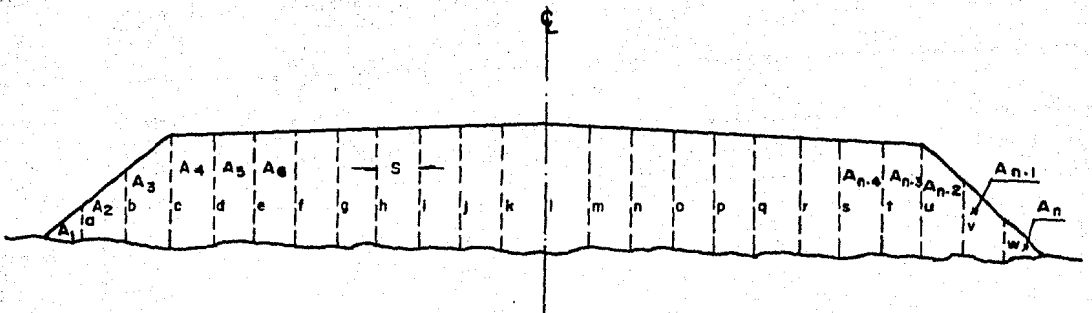


Fig. 5. Determinación de áreas, método gráfico

El instrumento se apoya sobre una mesa en 4 puntos, de los cuales 3 de ellos se encuentran sobre el brazo trazador: la rueda de deslizamiento, la guía trazadora con la cual se sigue el contorno del área en estudio y el tambor graduado sobre el cual se toman las lecturas; este tambor tiene un nonio al lado, el cual aproxima las lecturas a décimas de unidad. El cuarto punto de apoyo es el polo, el cual queda fijo sobre la mesa por una punta de aguja localizada en el brazo polar. Ambos brazos el trazador y el polar se unen por medio de una articulación en el soporte; sobre el cual se encuentra el tambor, el nonio y el disco graduado para tomar lectura. El brazo trazador, está graduado para colocarlo de tal manera, que las lecturas estén acordes con la escala del dibujo.

El uso del aparato es como sigue: se coloca sobre la mesa fijando el polo en un punto conveniente, enseguida se coloca la guía trazadora en un punto predeterminado, y estando el aparato en esa posición se toma una lectura inicial, para después seguir el contorno del área en estudio con la guía trazadora hasta llegar al punto de partida; en esta segunda posición se toma una lectura final. La diferencia de lecturas multiplicada por una constante del aparato, nos dará como resultado el área de la sección en estudio. Para comprobar el valor obtenido debe repetirse la operación.

Ya que se tienen las áreas de c/u de las secciones de construcción, se procede al cálculo de los volúmenes de material, con la ayuda del método de la media de áreas extremas; el cual supone que el volumen de material será igual al promedio de las áreas extremas multiplicada por la distancia entre ellas, medida horizontalmente a lo largo del eje del camino.

O sea:

$$V = \frac{L}{2} (A_1 + A_2)$$

Donde V: Es el volumen de material

A_1 y A_2 : Son el área de c/u de las secciones de construcción

L: Separación entre las secciones de construcción.

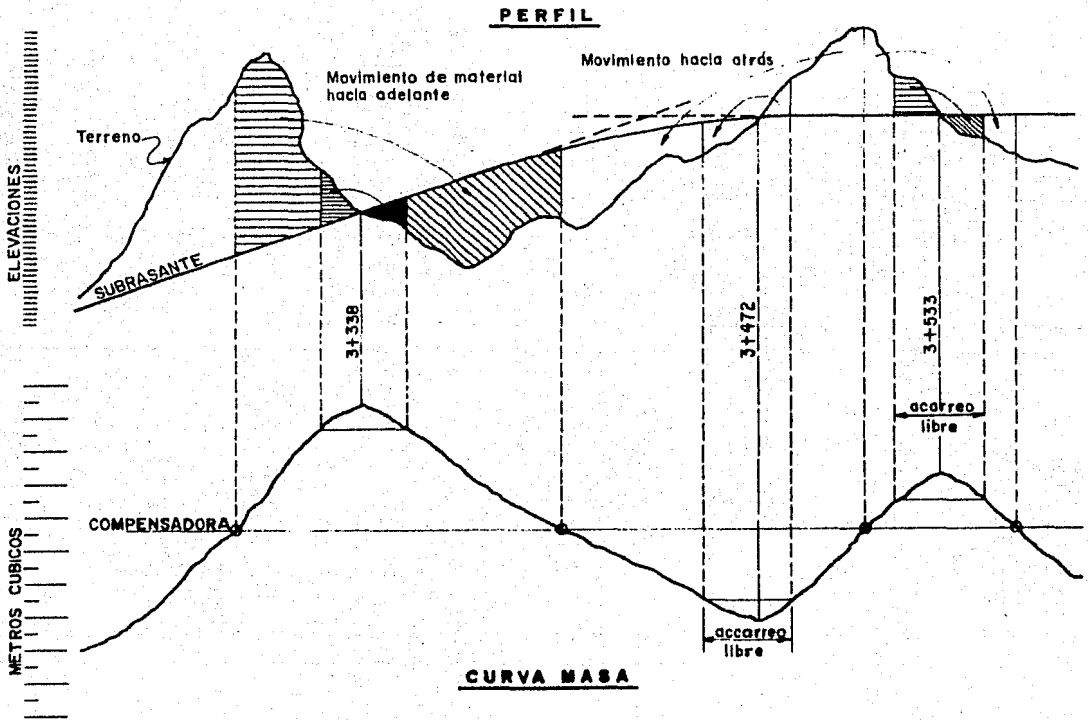
1.3.2 Curva Masa

Va que se ha calculado el volumen de terracerías a mover, se --
procede al cálculo del movimiento de estos materiales mediante--
la ayuda de un diagrama denominado "Curva Masa"; el cual se for--
ma con la ayuda de un sistema de ejes cartesianos, en el cual --
las abscisas representan el cadenamamiento del eje del camino, y--
las ordenadas representan el volumen de corte o terraplen acumu--
lado a dicho cadenamamiento.

En el método gráfico de la curva masa, ésta se dibuja junto con
el perfil de la rasante y el de terreno natural, en el cual el--
cadenamamiento de cada uno de ellos debe de ir coincidiendo. Ade--
más, la convención utilizada para el dibujo de la misma, es --
ascendente (+) cuando se trata de cortes y descendente (-) cuan--
do sea terraplen. Lo anterior, puede verse en la fig. (6).

Es práctica común, que en la misma hoja sobre la cual se dibuja
ron tanto la curva masa, el perfil de la rasante como el de te--
rreno natural, se incluya una tabla la cual contiene: Las eleva--
ciones del terreno natural y la rasante, los espesores de corte
y terraplen, además de las ordenadas de la curva masa.

Ahora que ya tenemos la gráfica de la curva masa, mencionaremos
las propiedades que esta posee:



VOLUMEN ACUMULADO																		
VOLUMEN DE TERRAPLEN																		
VOLUMEN DE CORTE																		
AREA DE TERRAPLEN																		
AREA DE CORTE																		
COTA DE LA RASANTE																		
COTA DEL TERRENO																		
CADENAMIENTO	3+300	320	340	360	380	3+400	420	440	460	480	3+500	520	540	560	580			

Fig. 6.

a) Una excavación a lo largo del perfil de la rasante, marcará en el diagrama que la curva asciende de izquierda a derecha y descenderá, cuando se trate de un terraplen.

b) Dada la propiedad anterior, el cambio de un corte a terraplen origina un máximo en la curva, y un mínimo cuando el cambio sea de terraplen a corte.

c) Cualquiera línea horizontal que corta a la curva en 2 o más puntos, recibe el nombre de compensadora; ya que dichos puntos, tienen la misma ordenada o material acumulado a dicho cadenamiento. Lo anterior indica, que el volumen de corte por encima o por abajo de la compensadora, igual al volumen de terraplen en el mismo tramo, por lo cual se dice que éste está compensado.

d) La diferencia de ordenadas entre 2 estaciones o puntos cualesquiera de la curva, representará el volumen de corte o terraplen que existe entre esos 2 puntos.

e) Cuando la curva masa queda encima de una línea horizontal compensadora, el volumen de corte localizado atrás del punto máximo de la misma deberá transportarse hacia adelante para llevar a cabo la compensación. Cuando la curva queda por abajo de la compensadora, el corte adelante del punto mínimo de la curva, se transporta hacia atrás para llevar a cabo la compensación.

1.3.3 Acarreos de Material

Antes de calcular las longitudes de acarreo de material, mencionaremos los tipos de acarreo que se utilizan en México: acarreo libre, sobre acarreo, acarreo corto y acarreo largo.

El acarreo libre. Es la distancia máxima a la que puede trans-

portarse el material producto de cortes sin hacer un pago adicional; ya que dicho costo está incluido en la excavación del mismo.

En México la distancia de acarreo libre se ha fijado en 20 mts. para no encarecer el costo de la excavación.

En el diagrama de curva masa, esta distancia se encuentra próxima a los puntos máximos y mínimos de la misma.

Los sobre acarreos, acarreos cortos y acarreos largos, son longitudes de acarreo que en México se han fijado para el uso adecuado de la máquina de acarreo, por ejemplo; los sobreacarreos de 20 a 120 mts. se hacen con tractor; los acarreos cortos, de 120 a 520 mts. con motoescropa y los acarreos largos mayores de 520 mts. con camiones. Dado lo anterior, el costo unitario por M^3 de material acarreado, no es el mismo para un sobre acarreo que para un acarreo corto o para un acarreo largo.

Las longitudes de acarreo para cada uno de los casos anteriores, se da en base a la separación del centro de gravedad del corte, al centro de gravedad del terraplen y es como sigue:

Acarreo Libre	(de 0 a 20 mts.)		
Sobre Acarreo	(de 20 a 120 mts)	$\frac{\text{C.G. Corte} - \text{C.G. Terr.}}{20}$	Resultado Estaciones.
Acarreo Corto	(de 120 a 520 mts)	$\frac{\text{C.G. Corte} - \text{C.G. Terr.}}{100}$	Resultado Hectometros Hm.
Acarreo Largo	(>520 mts)	$\frac{\text{C.G. Corte} - \text{C.G. Terr.}}{1000}$	Resultado kilometros Km

2. SUPERESTRUCTURA DE LAS CARRETERAS

2.1 Estructura de una Carretera

Una carretera, es una estructura artificial lisa en su superficie, cuyo objetivo es transmitir los efectos de cargas estáticas o en movimiento al terreno sobre el cual descansa, resistiendo los efectos destructivos del tránsito, así como los agentes atmosféricos.

Existen varios puntos de vista para la clasificación de la estructura de una carretera, pero las más importantes son:

- a) De acuerdo a la forma en que transmiten la carga.
- b) De acuerdo a los materiales de que está constituida.

De acuerdo a la forma en que transmiten la carga, éstas pueden ser:

- a) Flexibles ✓
- b) Rígidas
- c) Mixtas

De acuerdo a los materiales de que están constituidas, éstas pueden ser:

- a) Suelos estabilizados
- b) Pavimentos bituminosos
- c) Pavimentos de concreto

En la fig. 7 podemos ver 2 tipos de estructura, una rígida y -

otra flexible; la diferencia entre ellas es que la estructura rígida transmite la carga que recibe de una manera uniforme, en una área considerable y a una distancia apreciable de su punto de aplicación. En una estructura flexible, la transmisión de la carga que reciben es en una zona muy próxima al punto de aplicación de la misma.

A continuación trataremos las estructuras de tipo flexible e inmediatamente después hablaremos ampliamente de los suelos -- estabilizados y pavimentos bituminosos.

2.1.1 Pavimentos Flexibles

De aquí en lo adelante entenderemos por pavimento, a lo que hemos estado llamando la estructura de una carretera; a la cual podemos ver esquemáticamente en la fig. 8; esta fig. nos muestra un corte transversal de un pavimento flexible, en el cual podemos ver una variante que sería, de pavimento simple a pavimento compuesto (mitad derecha, mitad izquierda respectivamente).

Antes de comenzar con el diseño de un pavimento, hablaremos de las partes que lo componen, las fallas que se presentan en estos y las causas que las provocan.

Un pavimento está formado por una serie de capas como lo son:

La subrasante, La subbase, La base y La carpeta; donde la subrasante hace las veces de la infraestructura del pavimento y la subbase, base y carpeta, hacen las veces de la superestructura del mismo.

La capa subrasante es una capa de material seleccionado para resistir las cargas impuestas por el tránsito, y que pasan a -

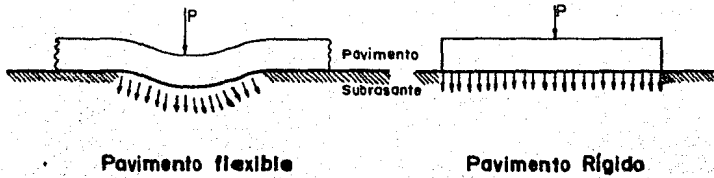


Fig. 7.

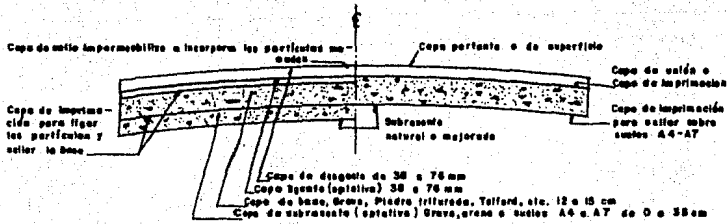
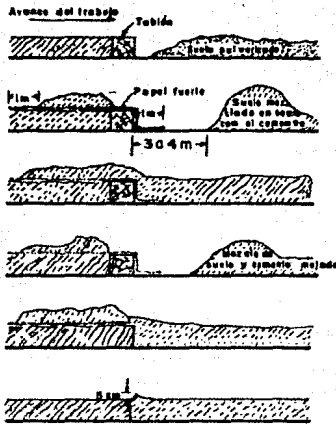


Fig. 8. Corte transversal de pavimento flexible



El fojo del día se termina colocando un tablón de la altura exacta del firme.

Se mezcla el suelo con el cemento, sin acercarse más de 30.4 m a la obra terminada; interponiendo un papel fuerte, se extiende parte de la mezcla en seco sobre el firme viejo.

Se extiende la mezcla en seco y se riega.

Se separa a mano la mezcla del tablón y se quita este

Se extiende a mano la mezcla húmeda, uniéndola con la que cubre el firme; las operaciones de nivelación y apisonado se realizan sobre la junta.

En el apisonado se deja el firme nuevo en la junta 5cm sobre la rasante; terminado el apisonado, la niveladora quita este exceso; dejando el firme nuevo en la rasante exacta.

Fig.15. Procedimiento recomendable para juntas de construcción

travez de la carpeta, base y subbase del pavimento. Para esta capa que generalmente es de 30 cm. de espesor, puede utilizarse el material del mismo camino, siempre y cuando cumpla con -- las características deseadas; si no es así, se procede a la estabilización del mismo. Lo anterior lo estudiaremos en el capítulo de suelos estabilizados.

La subbase es una capa de material seleccionado y no capilar, para evitar que el agua de las terracerías suba a la estructura del camino; la cual se encuentra encima de la capa subbase.

La capa base es una capa de material extremadamente bueno, ya que las cargas que recibe son muy altas; debido a que ésta se encuentra inmediatamente abajo de la carpeta o superficie de rodamiento.

La carpeta es una capa producto de la mezcla de materiales asfálticos e inertes, la cual recibirá los efectos abrasivos del tránsito, así como los agentes atmosféricos. Esta capa que se construye encima de la capa base, debe de ser estable y resistente para distribuir las cargas que recibe a las capas inferiores.

Las especificaciones y tipos de subbase, bases y carpetas, serán estudiadas en los capítulos correspondientes a cada una de ellas en este mismo trabajo.

Las fallas que se presentan en cada una de estas capas, son debidas en su mayoría, al volumen de tránsito a que están sujetas, y el peso del mismo; produciendo deformaciones de tipo -- elástico, plástico y por consolidación, las cuales pueden observarse esquemáticamente en la fig. 9. Las deformaciones -- elásticas se presentan en la estructura, cuando la carga de la

rueda deforma momentaneamente los materiales de la misma, y si éstas son pequeñas, no causarán daño a ésta.

La deformación plástica se presenta cuando al pasar la carga de la rueda, ésta induce esfuerzos cortantes sobre las capas y presión sobre el agua que éstas contienen, los cuales al combinarse producen el desplazamiento del material lateral. En la fig. 10 podemos ver la deformación plástica de una estructura, y en particular la capa sobre la cual se está presentando; también podemos observar que mientras más profunda se encuentra la capa afectada, la superficie o línea de falla es mayor, por lo cual, los esfuerzos cortantes inducidos son menores y dicha capa se puede construir de un material menos resistente.

La deformación por consolidación se presenta cuando al pasar la carga de la rueda, ésta induce esfuerzos cortantes en cada una de las capas y presión en el agua que éstas contienen, de tal manera, que la combinación de esfuerzos que se produce, es resistida por las capas, pero la presión en el agua hace que ésta sea expulsada, dando origen a la consolidación.

Como acabamos de ver anteriormente, las fallas en la estructura de una carretera son debidas en su mayoría a las deformaciones que éstas presentan, motivo por el cual, el problema de diseño atriba en proponer el tipo de material y el espesor de cada una de las capas óptimo para su buen comportamiento. A continuación veremos varios de los métodos usados en el diseño de pavimentos.

2.1.2 Métodos de Diseño

a) Método del índice de grupo. El índice de grupo es un valor basado en el funcionamiento de cada uno de los suelos, el cual nos da mucha idea de las propiedades mecánicas de los-

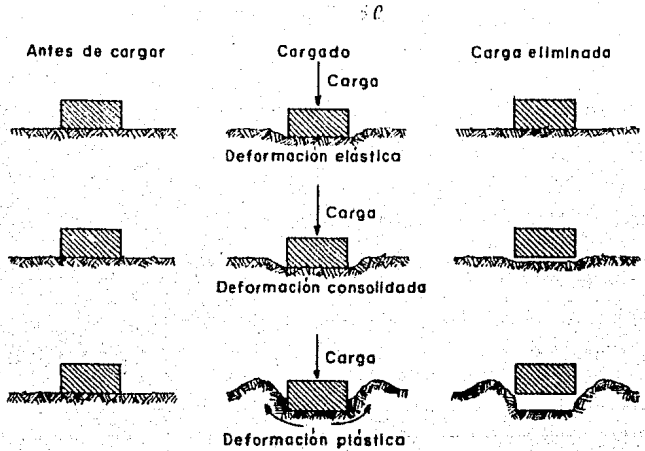


Fig. 9. Diagrama que muestra la deformación del suelo bajo las cargas de las ruedas

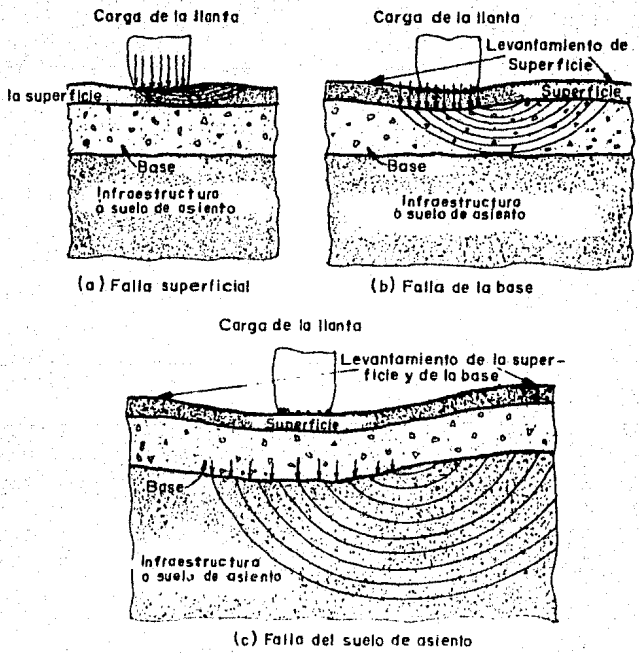


Fig. 10. Resultados de la deformación plástica en el suelo de asiento, la base, o la capa superficial (según F.N. Hveem)

mismos. Este valor propuesto por la clasificación AASHO, se utiliza para determinar el espesor del pavimento combinado con el cemento; y se define por medio de la ecuación empírica - - sig.:

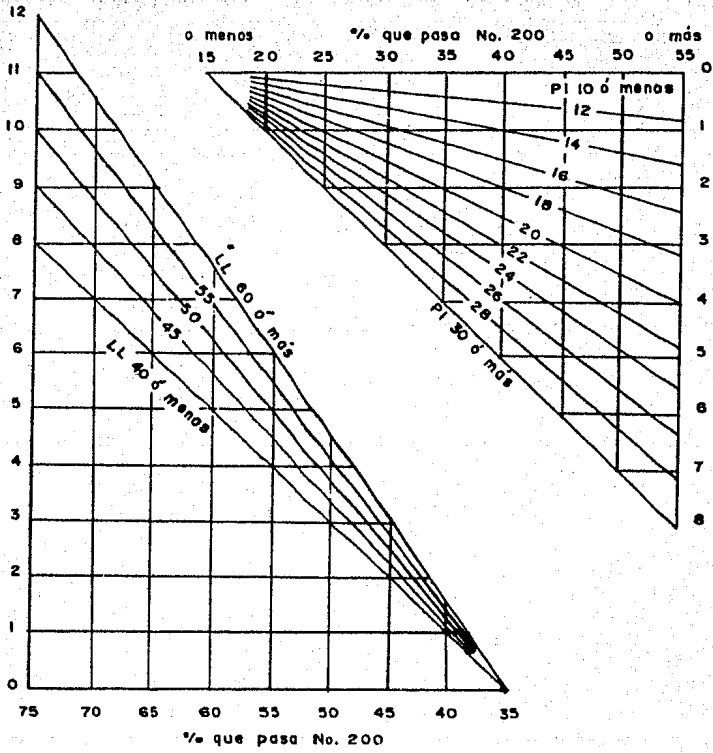
$$\text{Indice de grupo} = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

- a Porcentaje de material que pasa la malla # 200 que excede del 35% y sin pasar del 75%. (número positivo del 1 al 40).
- b Porcentaje de material que pasa la malla # 200 que excede del 15% y sin pasar del 55%. (número positivo del 1 al 40).
- c Valor del límite líquido que excede de 40 y sin pasar de 60 (número positivo del 1 al 20).
- d Valor del índice de plasticidad que excede de 10 y sin pasar de 30 (número positivo del 1 al 20).

La gráfica #1 nos da los valores del índice de grupo directamente, conociendo el porcentaje de material que pasa la malla # 200, el límite líquido y el índice de plasticidad, sumando simplemente las lecturas en la escala vertical de cada figura.

Va teniendo el valor del índice de grupo, la cantidad de camiones y autobuses que van a circular por día, entramos a la gráfica # 2 de diseño, la cual nos da los espesores de cada una de las capas que formarán la estructura del camino.

El grado de compactación exigido para la subrasante por este método, es del 95% de la densidad normal AASHO y 100% para la base y subbase.



Gráfica para determinar el índice de grupo

GRAFICA # 1

b) *Método de relación de resistencia de california.* Este método desarrollado por la división de carreteras de California y denominado frecuentemente "CBR", se basa fundamentalmente en la comparación de una prueba de penetración sobre una muestra de suelo a utilizar y una muestra de suelo muy resistente; al cual se le da un valor CBR de 100.

La prueba de penetración que se le hace a los suelos la podemos ver esquemáticamente en la fig. 11, y es como sigue:

PASO 1.- Se escogen varias muestras de suelo alterado de aproximadamente 4 Kg. y diferentes contenidos de humedad, para compactar en un molde de 15.24 cm. de diámetro y 20.32 cm. de altura. Las muestras compactadas por medio de carga estática o martillos de impacto, quedan de 10.16 cm. de altura aproximadamente.

PASO 2.- Ya teniendo las muestras compactadas, se obtiene la densidad seca de cada una de ellas para trazar la curva de humedad en función de la densidad, y seleccionar la muestra que presente el mayor valor.

PASO 3.- La muestra aún en el molde, se sumerge en el agua durante 4 días para simular la saturación que podría tener en el terreno natural.

PASO 4.- Por un anillo de sobrecarga (4.536 Kg.) que se coloca sobre la muestra para simular el efecto del pavimento, se hace pasar un émbolo cilíndrico de 19.35 Cm². de sección, con el cual se obtienen los datos para trazar una gráfica de carga en función de la deformación, mientras este va penetrando en la muestra. La fig. 12 muestra la gráfica de carga deformación para distintos tipos de suelos, de las cuales puede obtenerse el valor CBR para estos o aprovechando los datos de car-

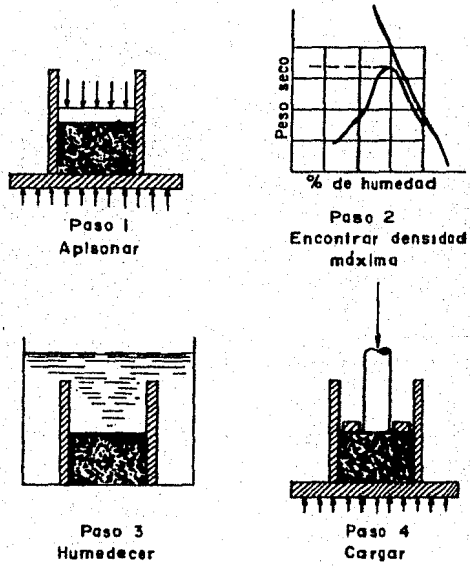


Fig.II. Procedimiento de laboratorio para encontrar la relación de resistencia de California en un suelo

Valorización general de la infraestructura (materiales naturales en el plano de nivel)	Índice de grupo	Volumen diario de tránsito de camiones y autobuses					Espesores y tipos de capas	Parte Sup.
		Muy ligero	Ligero	Mediano	Pesado	Muy pesado		
(A) Excelente (B) Muy bueno (C) Buena (D) Regular (E) Mala (F) Muy mala		50	250	500	750	20.3 cm 15.2 cm 10.2 cm 5.1 cm	Capa superior bituminosa o PCC Tipo y espesor de acuerdo con los camiones	Infraestructura
					0"	Cimiento granulado de 10.18 cm.		
						10.2 cm	Infrabase de material seleccionado	Infraestructura
						20.3 cm	Los espesores varían con las características del material natural	
						30.5 cm	(subrasante)	
						40.6 cm	Material natural firmemente apretado	

Gráfica de diseño de índice de grupo

GRAFICA # 2

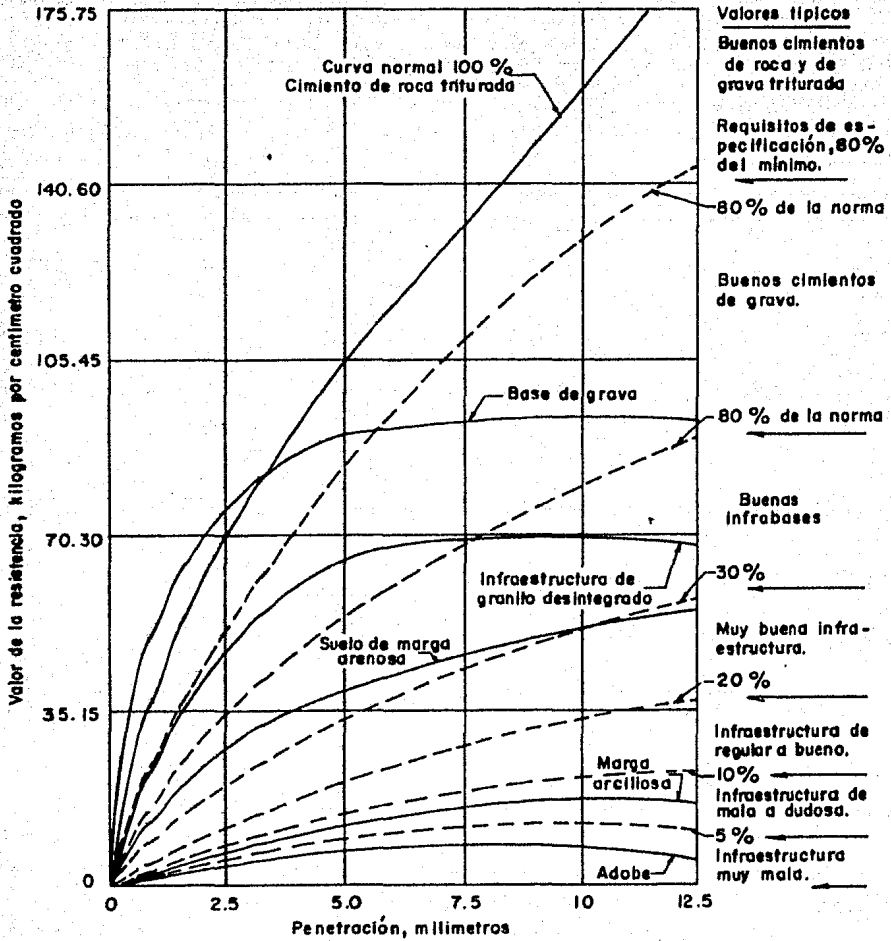


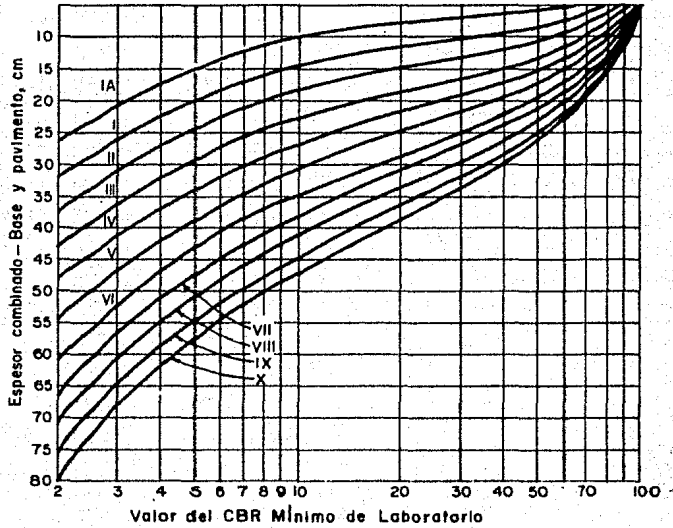
Fig. 12. Curvas de carga en función de la penetración para suelos típicos, probados por el método CBR. (según O. J. Porter)

ga deformación de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Relación de resistencia de California CBR}}{\text{carga soportada por la prueba - de muestra con una penetración de 0.254 cm.}} = \frac{\text{carga soportada por la roca de cemento triturada con una penetración normal de 0.254 cm. del émbolo.}}{(100)}$$

Ya con el valor de la relación de resistencia de California -- CBR por medio de la gráfica o la fórmula anterior, se procede al cálculo del espesor total del pavimento; mediante el uso de la gráfica # 3 de origen empírico, usada por el departamento de carreteras de California y otros. También nos encontramos que otras agencias de carreteras, han modificado el procedimiento de la prueba, como por ejemplo, el método de compactación; unas compactan con métodos estáticos y otras con métodos de im pacto. Además, algunas agencias obtienen el valor del CBR de la prueba con una penetración del émbolo de 5 mm. en lugar de 2.5 mm., como podemos ver, el hacer las modificaciones anteriores pueden cambiar seriamente los resultados.

Mediante este método, también podemos encontrar los espesores de cada una de las capas, fijando un valor CBR para cada una de ellas; con los cuales sobre la gráfica # 3, encontramos -- los espesores que deben yacer sobre cada material con el CBR correspondiente. En dicha gráfica, aparece un ejemplo en el cual se ha fijado un valor CBR de 4 para la subrasante, CBR de 15 para la sub-base y CBR de 80 para la base; con el valor CBR de 4, entramos a la gráfica por la parte superior y bajamos hasta la curva de 10 000 Lb/rueda, leyendo en la escala vertical un espesor de 45 cm. para la sub-base, base y carpeta. Con el valor CBR de 15 para la sub-base, volvemos a la gráfica y leemos un espesor de 22 cm. para la base y carpeta. Por último, con el valor CBR de 80 en la gráfica obtenemos un espesor -



Tabulación 1		Tabulación 2	
Carga real por rueda Kg	No de EWL por rueda de carga	Total de EWL millones	Curva No.
2040 2500	1	<0.5	IA
2500 2950	2	0.5 - 1	I
2950 3400	4	1 - 2	II
3400 3950	8	2 3	III
3950 4400	16	3 6	IV
4400 4950	32	6 10	V
4950 5400	64	10 20	VI
5400 5950	128	20 40	VII
		40 80	VIII
		80 160	IX
		160 320	X

Método de diseño de pavimento del Departamento de Caminos de Kentucky, basado en el método de CBR

GRAFICA # 3

de carpeta de 8 cm. Haciendo las restas correspondientes obtenemos los siguientes espesores.

sub-base 23 cm., base 14 cm., y carpeta 8 CM.

c) Método del estabilómetro de Hveem. Este método basado en el valor de resistencia de un suelo; el cual se obtiene con la ayuda de una prueba que se realiza a una muestra, en un aparato llamado estabilómetro, y la substitución de los resultados en una fórmula que daremos después de explicar dicha prueba. El estabilómetro de Hveem, es un aparato que mide la presión horizontal que se desarrolla en una muestra cargada verticalmente, así como la tendencia de la misma a saturarse y expanderse. La fig. 13 muestra un croquis de dicho aparato.

Procedimiento de la prueba.

PASO 1.- Se preparan 4 muestras en forma de cilindro de 10 cm de diámetro y 6.5 cm. de altura aproximadamente, con diferentes contenidos de humedad y compactadas con el compactador de patabatidora.

PASO 2.- Ya que se tiene la muestra compactada en el molde, se aplica presión para que el agua contenida sea expulsada; la cual al circular forma una serie de circuitos eléctricos que el aparato es capaz de cuantificar. La presión que hace, se forman 5 o 6 circuitos eléctricos se ha denominado, presión de exudación.

También se ha fijado que el contenido de humedad para las muestras, es el obtenido con una presión de 21 Kg./cm². aproximadamente; ya que este valor fue obtenido de muchas pruebas a suelos bajo pavimentos que exudaron el agua a esta presión.

PASO 3.- A la muestra aún en el molde, se le coloca un plato perforado por la parte superior y se añade agua para saturarla durante un periodo de 16 a 20 Hrs.; en el cual, se mide la presión de expansión.

PASO 4.- La muestra se coloca en el estabilómetro, después - que se ha metido en una manga flexible, y a la cual, se va - - aplicando carga lentamente a razón de 1.3 mm/min. hasta llegar a una presión de 11.2 Kg/cm², leyendo inmediatamente la presión horizontal desarrollada. Después que se ha tomado la lectura, la carga aplicada se reduce a la mitad y la presión horizontal es llevada a un valor de 0.35 Kg/cm², para después cuantificar el número de vueltas que da la bomba de desplazamiento, para llevar la presión horizontal a un valor de 14.2 Kg/cm².

Ya realizada la prueba descrita anteriormente, se procede al cálculo del valor de resistencia (R) de dicho suelo, mediante el uso de la siguiente fórmula mencionada anteriormente.

$$R = 100 - \frac{100}{\frac{2.5}{D} \left(\frac{P_v}{P_h} - 1 \right) + 1}$$

Donde: R es el valor de resistencia.

P_v es la presión vertical (11.2 Kg/cm²).

P_h es la presión horizontal en Kg/cm². a P_v de 11.2 Kg/cm²

D es el número de vueltas de la bomba de desplazamiento para llevar P_h a 14.2 Kg/cm². (entre 2 y 5 aprox.).

Ya con el valor de resistencia del suelo, obtenido por medio de la fórmula anterior y el número de equivalentes de ruedas -

de carga de 2270 Kg. para el servicio de vida esperado, pasamos a la gráfica # 4 de diseño; en la cual, entramos con el valor de resistencia (R) del suelo en la escala "E", luego se interseca el número de equivalentes de rueda en la escala "F", y la lectura tomada en la escala "G" es el espesor de la capa que debe cubrir dicho suelo, sin tomar en cuenta el valor del cohesímetro que pueda tener esta.

El valor del cohesímetro que se mencionó anteriormente, es un valor con el cual se reconoce que bases tratadas y pavimentos bituminosos tienen cierta resistencia a la tensión, por lo cual, soportan esfuerzos de flexión y no transmiten la totalidad de la carga a las capas inferiores. En la escala "H" de la gráfica # 4 se ve, que el valor mínimo y máximo de la cohesión (C) es de 100 y 10 000 respectivamente.

Ya con el valor del cohesímetro de las capas superiores en la escala "H" de la misma gráfica, y el valor obtenido anteriormente sobre la escala "G", trazamos una recta hasta cortar la escala "I" en la cual obtendremos el espesor de la capa superior ya corregido. Este valor obtenido, es el necesario para impedir el flujo plástico o desplazamiento del material que subyace a dicha capa. Nótese que si el valor del cohesímetro es mínimo (100), el valor corregido de la capa leído en la escala "I", es exactamente al mismo al obtenido en la escala "G".

La gráfica #4 de diseño por este método, resuelve la sig. ecuación:

$$T = \frac{0.095(T.I.)(90-R)}{\sqrt[5]{C}}$$

Donde: T es el espesor de la capa
 R es el valor de resistencia
 C es el valor del cohesímetro.
 T.I. es el índice de tránsito.

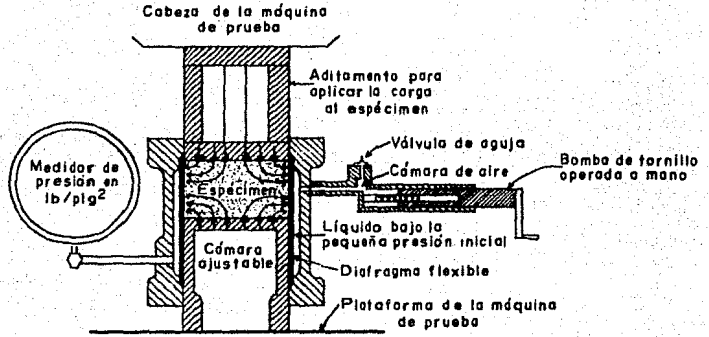


Fig. 13. Croquis diagramétrico del Estabilómetro de Hveem

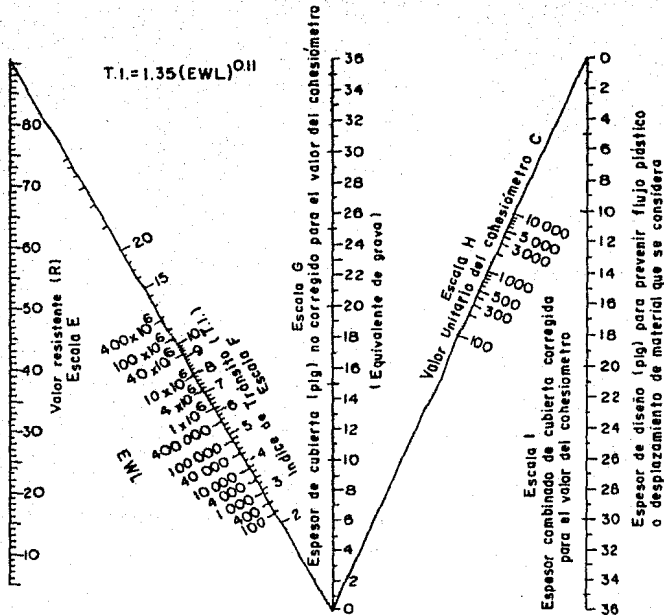
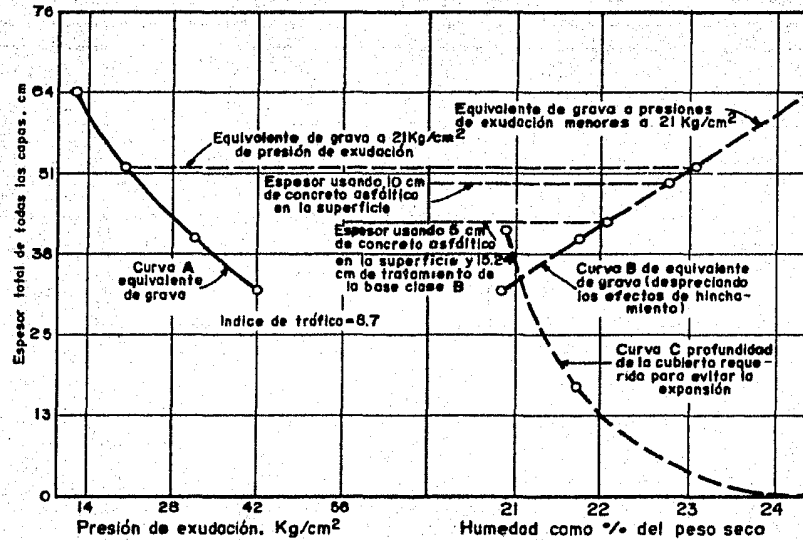


Gráfico de diseño para el método del Estabilómetro de Hveem, en el diseño de pavimento flexible



Ejemplo basado en método del estabilímetro de Hveem

GRAFICA # 5

La influencia que tiene el valor del cohesímetro (C) mayor de 100 sobre un suelo determinado va, de acuerdo con el valor de $\sqrt[5]{C/100}$. Los valores del cohesímetro (C) utilizados por la A.A.S.H.O. son:

MATERIAL DEL PAVIMENTO	VALOR "C"
Tratamiento bituminoso superficial	100
Carpeta de mezclas asfálticas	150
Carpeta de concreto asfáltico	400

Ejemplo:

Sea un suelo que se le ha realizado la prueba mencionada anteriormente y cuyos resultados damos a continuación:

% Humedad	Valor R	Presión de exudación Kg./Cm ²	Presión de expansión Kg./Cm ²	Espesor de la presión de exudación Cm.
20.9	53	42.0	8.75	42.0
21.8	43	31.5	3.50	17.0
24.5	14	12.0	0.00	0.00

Va con los resultados anteriores y el equivalente de rueda de carga, encontramos el espesor del equivalente de grava en la gráfica #4 y particularmente en las escalas "E" "F" y "G". Con los valores del equivalente de grava correspondiente para cada presión de exudación y porcentaje de humedad, construimos la gráfica #5, en la cual daremos 2 curvas una, de equivalente de grava-presión de exudación y otra equivalente de grava % de humedad; la gráfica #5 muestra dichas curvas. Este valor del equivalente de grava mencionado es el espesor necesario en capas, que debe sobreponerse al material muestreado.

Va con la gráfica anterior y sobre ella, se aplica una presión -

de exudación de 21 Kg./cm^2 para simular la pérdida de resistencia, debido a la acumulación de humedad, leyendo sobre la escala vertical el espesor total de las capas. Después de tener el valor anterior, se traza una horizontal hasta cortar la curva del lado derecho (equivalente de grava % de humedad) y bajando verticalmente, encontramos el contenido de humedad máximo para dichas capas. Cabe mencionar que si el contenido de humedad aumenta, - el espesor de las capas debe aumentar, lo cual se ve claro en dicha gráfica.

Resultados del ejemplo.

Para la presión de exudación de 21 Kg/cm^2 _____ 52 cm. (espesor)
corresponde de la gráfica #5

Para 52 Cm. de espesor corresponde _____ 23.1% (de humedad máxima)
de la gráfica #5

El espesor encontrado anteriormente, es el equivalente de grava al cual falta afectarlo por el valor del cohesímetro (C); ya que si este valor es mayor de 100, el valor del espesor total de las capas disminuirá. También es necesario checar si el espesor de la capa anula toda la presión de expansión que puede presentarse al saturarse el suelo; esto puede hacerse graficando sobre la misma gráfica #5, la curva espesor necesario para evitar la expansión-% de humedad.

De la gráfica puede verse que el espesor necesario para evitar la expansión de este suelo es de 35 cm., por lo cual, el espesor de la capa mínimo será de 35 cm.

Ahora que ya tenemos el equivalente de grava de 52 cm. y con un valor del cohesímetro (C) de 620, en las escalas "G" y "H" de la gráfica #4, unimos estos valores con una recta que intersec-

te la escala "I", obteniendo un espesor final de 16 in. (40.6 cm.) y mayor del mínimo por expansión que es de 35 cm.

2.2 Pavimentos de suelos estabilizados

Cuando las propiedades del suelo con el cual se construirá la subrasante de un camino no son las apropiadas, se procede a la estabilización del mismo para mejorarlas. Dichas propiedades son: cohesión, fricción interna, compresibilidad, plasticidad o capilaridad; mediante diferentes formas, para poder ser utilizado en la estructura de un camino.

Los tipos de estabilización los podemos dividir en 2 grupos:

- a) Estabilización por mezclas de suelos.
- b) Estabilización por adición de sustancias químicas.

2.2.1 Estabilización por mezcla de suelos

La estabilización por mezclas de suelos pueden llevarse a cabo cuando un suelo no tiene las características deseables para ser utilizado en un camino. Dado lo anterior se procede al mejoramiento de su granulometría y condiciones de humedad, ya que son fundamentales para su estabilización.

Existen varias recomendaciones granulométricas para la obtención de suelos estabilizados, a continuación mencionaremos algunas:

Pasa la malla	%
1"	100
3/4"	85 - 100
3/8"	65 - 100
# 4	50 - 85
# 10	40 - 65
# 40	25 - 45
# 200	10 - 25

El porcentaje de suelo que pasa a través de la malla # 200 debe ser menor de 2/3 del porcentaje que pasa a través de la malla - #40, a su vez, el porcentaje que pasa a través de la malla #40- debe tener un I.P. entre 4 y 9, además un L.L. menor o igual a 35.

La A.A.S.H.O. recomienda diferente granulometría para distintos tipos de suelos, y es la sig.:

Pasa la malla	A	B	C	D	E	F
1"	100	100	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-
# 10	15-40	20-45	25-50	30-65	40-100	55-100
# 40	8-20	10-25	12-30	15-40	20-50	30-70
# 200	2-8	3-10	4-12	5-15	6-20	8-25

Estabilización tipo arena-arcilla. Este tipo de estabilización se presta a usar, donde la grava es escasa ó costosa, además - de que la mano de obra sea barata; pudiendo utilizar este material (arena-arcilla) en pavimentos donde el tránsito sea menor de 500 vehículos diarios.

Los estudios realizados en el estado de Georgia por M. Straham- dieron origen a especificaciones muy precisas para la construcción de pavimentos con este tipo de materiales. Como granula--

metrta puede usarse la siguiente tabla o la dada en la columna - F de la tabla anterior.

MATERIAL	TIPO DE MEZCLA		
	DURO	MEDIO	SUAVE
Arena	65-80	50-70	55-80
Limo	5-15	10-20	10-20
Arcilla	9-18	15-25	10-25
Arena retenida en la malla # 60.	45-60	30-35	15-30

Para condiciones de humedad, el I.P. del porcentaje de material que pasa a través de la malla #40 debe estar entre 4 y 8, y - entre 9 y 15 para condiciones secas.

El L.L. del porcentaje de suelo anterior no debe exceder de 25, ya que un valor más alto indica material no deseable como pudiera ser materia orgánica. Un L.L. alrededor de 20 indicará material arenoso poco capilar.

La arena utilizada en estos suelos, debe de ser dura y de preferencia silicosa; pasar por la malla # 10 y ser retenida en la malla #200. El limo deberá estar constituido por partículas fi--nas e inertes.

Cualidades de una buena mezcla arena-arcilla.

a) Cantidad de arcilla necesaria para cementar la arena - y el limo, cuando la mezcla se encuentra seca o sensiblemente -- húmeda; no más, ya que ésta cuando se encuentra mojada puede - ser la causa de fracturas debidas al esponjamiento de la misma.

b) Cantidad de limo necesario para que con la arcilla y -- las partículas finas de la arena, se forme una superficie imper

meable; ya que, un exceso en el contenido de humedad de las partículas finas, lleva a éstas a su límite líquido y por consiguiente una disminución en la estabilidad de la mezcla.

Procedimientos de construcción.

Los procedimientos de construcción los podemos dividir en 2:

- a) Mezclas in situ.
- b) Mezclas en planta.

Las mezclas in situ se realizan generalmente con motoniveladora y material de la misma subrasante, el cual se trata de tener lo más pulverizado posible, para facilitar la mezcla con el material traído de fuera.

Al usar motoniveladora para la mezcla, ésta remueve y pulveriza el material de la subrasante correspondiente, utilizando los dientes propios, luego se coloca el material con el cual se formará la mezcla y aprovechando su cuchilla, ésta realiza la mezcla en seco y húmeda; después que se le ha agregado el agua necesaria para obtener su contenido de humedad óptimo.

Va que se ha realizado la mezcla húmeda, se procede al perfilado para después realizar el compactado.

Las mezclas en planta, son mezclas de mejor uniformidad en cuanto a la cantidad de los elementos que la componen como en la calidad de la mezcla obtenida. El equipo utilizado para esta mezcla, puede ser estacionario ó en movimiento y son en todo semejantes a las mezcladoras para materiales asfálticos, con la diferencia de que a esta mezcla se agrega agua en vez de asfalto.

2.2.2 Diseño de una mezcla

El diseño de una mezcla, consiste en verificar si un suelo está dentro de las especificaciones dadas anteriormente; si es así, basta con agregar la cantidad de agua necesaria para el contenido de humedad óptimo, conformar y compactar. Si dicho suelo no está dentro de las especificaciones, se buscan bancos de material que pueda ayudar a dicho suelo a estar dentro de dichas especificaciones.

Como puede verse todas las especificaciones anteriores tienen como elemento aglutinante la arcilla, motivo por el cual, estos pavimentos presentan los siguientes inconvenientes:

- a) Poca estabilidad, ya que pierde la cohesión ante la humedad
- b) Poca resistencia a la abrasión.

Métodos para el mejoramiento de pavimentos con arcilla.

Añadiendo ciertas sales a la mezcla de un suelo, estas modifican las propiedades de los coloides, ya que éstos en contacto con la solución salina, absorben los iones metálicos de éstas y el ion H de los ácidos. Son 3 iones importantes: El hidrógeno (H), el sodio (NA) y el calcio (CL). Los 2 primeros -- flocculan las arcillas reduciendo su plasticidad y aumentando su permeabilidad; el tercero optimiza la arcilla dándole viscosidad al suelo.

Las sales más usadas para el mejoramiento de mezclas de suelos son: el CaCl_2 (Cloruro de Calcio) y el NaCl (cloruro de sodio); obteniendo las siguientes ventajas:

- a) Aumenta la estabilidad de la arcilla
- b) Modifican las constantes hídricas de la arcilla
- c) Disminuye la contracción del suelo al secarse
- d) Obtención de mayor densidad al compactarse
- e) Mayor resistencia a la abrasión

2.2.3 Estabilización por adición de sustancias Químicas

Utilización del cloruro de calcio. El cloruro de calcio obtenido en forma de escamas se aplica colocándolo directamente sobre el pavimento y absorbiéndose por la humedad ambiental ó procediendo a un regado con agua a la que se añadió el cloruro. Cuando la mezcla se hace en planta, se procede a la incorporación de cierta cantidad de cloruro de calcio durante la mezcla y añadiendo el resto sobre el pavimento ya compactado.

La cantidad que recomiendan algunos autores es de 270 grs. de cloruro de calcio por cada 25 lts. de suelo; otros recomiendan de 1.1 a 1.4 kgs. por m^2 de pavimento.

Utilización de cloruro de sodio. El cloruro de sodio puede añadirse, mezclando la sal con el suelo en una relación de 150 grs. por cada 100 lts. de suelo.

También puede hacerse en forma disuelta en agua ó utilizando agua de mar ó de salinas, agregándola en forma continuada para aumentar la concentración.

Una forma más de estabilizar un suelo, es la de agregar óxido de calcio (CaO), el cual puede obtenerse por la calcinación de la piedra caliza. Cuando esta sustancia es añadida a un suelo arcilloso, se producen cambios iónicos en él; los cuales reducen la plasticidad y forman una especie de cemento natural.

Técnicos Ingleses, Franceses y Norteamericanos indican que la cantidad de óxido de calcio a incorporar varía entre un 2.5 y un 8% en peso, dependiendo de las experiencias en el laboratorio. La forma de incorporar la cal u óxido de calcio es hidratado (cal apagada); y el procedimiento constructivo es similar al de un suelo estabilizado con cemento; de los cuales hablaremos en bases tratadas.

2.3 Sub-bases

La sub-base, que se encuentra sobre la capa subrasante y debajo de la base, se construye por varias razones, a continuación hablaremos de cada una de ellas.

a) La economía que la sub-base ofrece es buena, dado que esta se construye con materiales de menor calidad que la base. Lo anterior puede realizarse sin mucho problema, ya que los esfuerzos cortantes inducidos por el tránsito, van disminuyendo con la profundidad; como ya se mencionó al estudiar los distintos tipos de deformación producida por el mismo, las cuales podemos ver en la fig. 9. Una desventaja que se presenta, es la de aumentar el espesor total de pavimento.

b) La sub-base absorbe las deformaciones que se presentan en la subrasante, debidas a los cambios volumétricos por variación en los contenidos de humedad de la misma.

c) Impide la acción capilar que pueda presentarse hacia la base del agua proveniente de las terracerías, debido a la variación del nivel de aguas freáticas de la misma.

d) Funciona como capa de transición entre la capa subrasante y la capa base, impidiendo así, la incrustación de los agregados de la base sobre la subrasante.

Las propiedades mas importantes a cuidar para esta capa son 2:

La resistencia friccionante y la capacidad drenante, la primera, es la que proporciona la resistencia al esfuerzo cortante y minimiza las deformaciones, si el material se encuentra bien compactado. La segunda como su nombre lo indica, es la que proporciona la rapidez con la cual esta capa drena tanto el agua infiltrada por la superficie, como la que asciende por acción capilar.

El espesor de la capa sub-base es variable, ya que ello depende del resultado en el diseño del pavimento, pero en México se ha adoptado un espesor mínimo de construcción de 15 cm.

Las especificaciones de la A.A.S.H.O. para sub-bases son las mismas que las utilizadas para bases, ya que ellos recomiendan la misma tabla granulométrica para bases y sub-bases. También en los Estados Unidos suelen llamar sub-base, a la capa de material que se encuentra inmediatamente abajo de las losas de pavimentos de concreto de cemento.

Las especificaciones de S.A.H.O.P. para esta capa, son las sig:

El material a utilizar debe de cumplir con la sig. granulométrica

MALLA	% QUE PASA EN PESO	
2"	100	
1 1/2"	70	- 100
3/4"	50	- 85
3/8"	40	- 65
# 4	30	- 50
# 40	10	- 20
# 200	5	- 10

Además, se debe de cumplir que la relación del porcentaje en peso del material que pasa la malla #200, al material que pasa la malla #40, debe de ser menor o igual a 0.65. El tamaño máximo de los agregados no debe de ser mayor de 2".

El valor relativo de soporte para esta capa y con el material completamente saturado, no debe ser menor del 50%. La misma secretaría establece que para sub-bases, pueden utilizarse suelos estabilizados con cal, cemento o asfalto, cuando así se requiera.

La construcción de la sub-base se lleva a cabo de la siguiente manera: El material con el cual se construirá la capa, es extendido parcialmente sobre la subrasante ya terminada, para proceder a la incorporación del agua por sistema de riegos y mezclado simultáneo, lo anterior se lleva a cabo hasta alcanzar el contenido de humedad óptimo.

Va que ha sido alcanzado el contenido de humedad óptimo, se procede al extendido y compactado del material por capas, si así se requiere, ya que no deberán resultar capas mayores de 12 cm. ya compactadas. Cuando el material con el cual se construirá la capa es producto de la mezcla de 2 o más materiales, el mezclado de éstos se efectuará primero en seco para obtener una mezcla homogénea y después se procederá a la incorporación del agua y el mezclado.

También es necesario dar riegos superficiales durante el tiempo que dure la compactación, para reponer las pérdidas por evaporación.

La forma de la compactación será de las orillas hacia el centro en tangentes y curvas que no tengan sobre-elevación. En aquellas que sí exista sobre-elevación, ésta se efectuará de abajo para arriba.

2.4 Bases

Como ya se definió lo que es la capa base de la estructura de una carretera, ahora trataremos los diferentes tipos de estas, los cuales son:

- a) Bases granulares
- b) Bases tratadas

2.4.1 Bases granulares

La base granular es una capa de materiales triturados de 1" max. y generalmente de 15 cm. de espesor. También se le agrega un 4% de finos tipo inerte, de preferencia polvo de trituración o un limo de arcilla, para no influir en la propiedad filtrante de ésta.

En México la secretaría de asentamientos humanos y obras públicas (S.A.H.O.P.), exige un llmite llquido < 25 , un índice plástico < 6 y un valor relativo de soporte > 50 en (1976) y > 100 en (1980).

Las Especificaciones impuestas por la A.A.S.H.O. son las sig: - en pag. anteriores, se dió una tabla que muestra 6 tipos de granulometría, las cuales pueden tomarse como adecuadas para formar bases y subbases; además los tipos C.D.E. y F de la misma tabla, pueden utilizarse como capa superficial de rodamiento.

Para los agregados inertes como lo son; Los gruesos retenidos en la malla # 10; serán partículas duras como fragmentos de piedra, grava o escoria, los cuales deben tener un porcentaje de desgaste no mayor del 50% medido en la máquina de los angeles.

Los agregados finos, aquellos que pasan a través de la malla # 10, será arena natural o triturada y finas partículas de mineral que pasan a través de la malla # 200. tomando en cuenta que la mezcla de estos agregados, debe encontrarse libre de material vegetal y bolas de arcilla.

Las características de plasticidad son las mismas que las utilizadas por S.A.H.O.P., con una excepción; que para bases que no tendrán tratamiento superficial en varios años, el límite líquido puede ser < 35 y el Índice plástico puede variar de 4 a 9. Este cambio de especificación resulta de la diferencia de los requerimientos para cada caso.

Otras agencias de carreteras, insisten en que el valor de resistencia de california (CBR) no sea menor de 80, y además, que la expansión en una muestra de suelo compactada, no sea mayor del 1%.

2.4.2 Bases tratadas

Las bases tratadas son mezclas estabilizadas de distintos tipos de materiales y agregados, como lo son: grava, arena, arcilla, asfalto y cemento.

La fig. (14) en base al porcentaje de material que pasa por la malla # 200 y el valor del Índice de plasticidad, nos muestra si es o no necesario estabilizar dicho suelo; si es así, esta nos indica el tipo de material a usar para dicha estabilización.

2.4.2.1 Bases tratadas con asfalto

El uso de los materiales bituminosos en bases tratadas, ha sido para estabilizar tierra, arena e impermeabilizar, mate-

riales graduados como bases de tipo granular.

Como puede verse en la tabla (3), se da una granulometría para cada uso del material bituminoso, y además las propiedades que deben cumplir cada tipo de suelo.

Los suelos arcillosos que generalmente presentan buena capacidad de carga a bajos contenidos de humedad, son tratados con materiales bituminosos para impermeabilizarlos. Dado lo anterior es posible construir bases de tierra y asfalto satisfactorias, utilizando la combinación de los agregados que se encuentre en los cimientos.

Los materiales asfálticos utilizables para el trabajo anterior, son los asfaltos de curación rápida, media y lenta en forma es pumosa o emulsionada; en proporciones de 4 a 7% del peso del suelo en seco. Las menores cantidades corresponden a mayores contenidos de grava, arena o piedra triturada. Si la composición química de los minerales de arcilla son altos en contenidos de sílice la cantidad de asfalto, aumenta y si son altos en hierro o aluminio esta cantidad disminuye.

Este tipo de bases se construyen en espesores de 10 a 20 cm. y su método constructivo es muy similar a los de suelo-cemento; de los cuales hablaremos después de ver las bases de arena y asfalto.

Las bases de arena y asfalto, son mezclas de arena procedente de playas, dunas o minas, con un material asfáltico como lo pueden ser: los asfaltos líquidos de fraguado rápido o medio con viscosidad media, o asfaltos emulsionados de rotura lenta.

Las arenas utilizables deben ser limpias y estables, de tal manera que resistan el desplazamiento bajo carga; si esto no

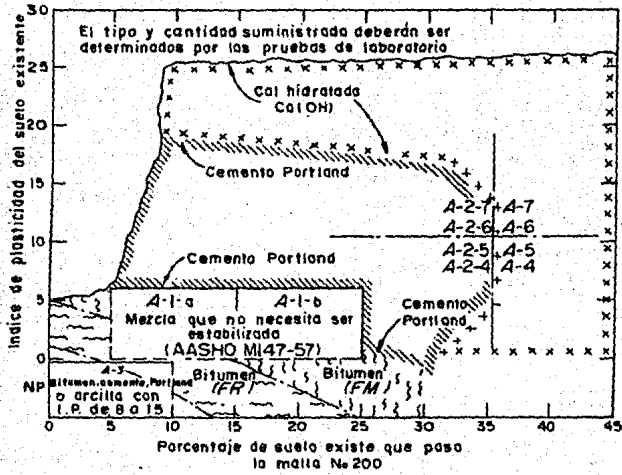


Fig. 14. Agregados sugeridos para la estabilización de un suelo

TABLA # 3. Características de los agregados para bases tratadas

Análisis de la malla	Suelo bituminoso %	Arena bituminosa %	Estabilización granular impermeabilizada. %		
			A	B	C
Que pasa: (1/2 plg)	...	...	100		
1 plg	...	...	80-100	100	
3/4 plg	...	...	65-85	80-100	100
N.º 4	> 50	100	40-85	50-75	80-100
N.º 10	...	...	25-50	40-80	60-80
N.º 40	35-100	...	15-30	20-35	30-50
N.º 100	...	...	10-20	15-23	20-35
N.º 200	10-50	<12; <25 §	8-12	10-16	13-30
Características de la fracción que pasa la malla N.º 40					
Límite líquido	<40	...			
Índice plástico	<18	...	<10; <15	<10; <15	<10; <15
Equivalente de humedad de campo	<20 §	...			
Encogimiento lineal	< 5 §	...			

§ Los valores más bajos, para algunos valores más anchos y más altos para graduaciones de arena estrechas. Si pasa más del 12%, se usarán las restricciones indicadas, como son indicadas en el equivalente de humedad de campo y encogimiento lineal.

sucede, esta deberá mezclarse con partículas de forma angulosa.

El porcentaje de asfalto a utilizar para este tipo de mezclas, varía del 4 al 9% en peso para asfaltos diluidos, y del 4 al 10% para las emulsiones asfálticas.

2.4.2.2 Bases tratadas con cemento.

Este tipo de bases conocidas como suelo-cemento, no son más - - que la adición de ciertas cantidades de cemento y agua a un - - suelo arenoso o grava-arenosa de preferencia, dando origen a diferentes tipos de mezclas:

- a) Suelo-cemento compactado
- b) Suelo-cemento modificado
- c) Suelo-cemento plástico

El suelo-cemento compactado, es al cual se añade suficiente cantidad de cemento para endurecer el suelo y cantidad de agua necesaria para una adecuada compactación del suelo e hidratación del cemento. Como este tipo es el más utilizado hablaremos de él ampliamente más adelante.

El suelo-cemento modificado toma su nombre, debido a que la cantidad de cemento y agua que se añade solo modifica las propiedades físicas y químicas del suelo, dando origen a una mezcla no endurecida.

El suelo-cemento plástico, es una mezcla con mayor cantidad de cemento y suficiente cantidad de agua para producir la consistencia plástica del suelo. La diferencia con el suelo-cemento compactado es que en este se agrega mucha más cantidad de agua y cemento.

Todos los suelos pueden combinarse con cemento para formar una buena mezcla suelo-cemento, solo que unos de ellos requieren mayor o menor cantidad de cemento, ya que su estabilidad no depende de la cohesión o fricción interna del suelo. Debido a lo anterior los suelos se han dividido en 3 grandes grupos:

1.- Suelos arenosos y gravosos con 10 a 35% de limo-arcilla combinada. Arena y gravas de depósito glaciares. Rocas calizas ó material granular con 55% ó más que pasen por la malla #4, pero con suficientes finos para dar una buena compactación. Todos los suelos anteriores forman buenas mezclas con poca cantidad de cemento, siendo el primero de ellos el mejor.

2.- Suelos arenosos con pocos finos, como arenas de playa ó de origen eólico dan buenos resultados solo que a mayores cantidades de cemento que los del grupo 1.

3.- Los suelos arcillosos ó limosos dan buenos resultados a costa de una mayor cantidad de cemento que el utilizado en cualquier otro suelo y tomando en cuenta que si estos tienen tendencia a pulverizarse, el suelo-cemento resultante, será de textura poco resistente.

El tipo de cemento que puede utilizarse para la mezcla de un suelo-cemento, es el tipo portland que cumpla con las especificaciones de la A.S.T.M. ó A.A.S.H.O.

Antes de empezar la construcción de un camino, es natural que se indentifique y clasifique el tipo de suelo a emplear, para poder determinar el porcentaje de cemento a emplear en la mezcla.

La siguiente tabla muestra dichos porcentajes, partiendo de la clasificación A.A.S.H.O.

Cantidad normal de cemento requerido para suelos de los horizontes A y B*.

Clasificación del suelo	% en volumen	% en peso
A 1 - a	5 - 7	3 - 5
A 1 - b	7 - 9	5 - 8
A 2 - 4	7 - 10	5 - 9
A 2 - 5		
A 2 - 6		
A 2 - 7		
A 3	8 - 12	7 - 11
A 4	8 - 12	7 - 12
A 5	8 - 12	8 - 13
A 6	10 - 14	9 - 15
A 7	10 - 14	10 - 16

* Los suelos del horizonte A, pueden contener materia orgánica u otros materiales perjudiciales al cemento. Para este tipo de suelo de color gris oscuro el porcentaje debe subirse en un 4%; y para los suelos negros debe subirse en un 6%.

La cantidad de agua necesaria para una mezcla de suelo-cemento, depende del contenido de humedad óptimo que se halla determinado en el laboratorio, por lo cual la cantidad de agua por agregar depende del contenido de humedad del suelo. También hay -- que tomar en cuenta que siempre es preferible un exceso que una falta de agua.

Hablando constructivamente, el porcentaje de humedad debe ser -- tal que permita el perfilado y acabado, sin presentar desplazamientos ni rajaduras en la superficie durante la compactación y el acabado.

Una mezcla con suelo arenoso requiere de aproximadamente 148 - Lts/m³ compactado, con suelos de limos o arcillas se requiere - 208 Lts/m³ compactado, con una evaporación en ambos casos de -- aprox. 59 Lts/m³.

La secuencia a seguir para la construcción de un suelo-cemento puede esquematizarse de la sig. manera:

1. Preparación inicial.

- a) Perfilado del camino
- b) Escarificado y pulverizado
- c) Volver a perfilar

2. Proceso constructivo

- a) Esparcido del cemento
- b) Mezcla y aplicación del agua
- c) Compactación
- d) Acabado
- e) Curado

El proceso de construcción debe de ser continuo durante todo - el día, teniendo cuidado con el punto de terminación de ese - - día y el inicio del sig., ya que ahí se tendrá una junta cons-- tructiva que puede constituir un punto débil, porque la compac-- tación puede no ser uniforme en ambos trabajos. Un procedimien-- to recomendable para la construcción de dichas juntas es el mos-- trado en la fig. 15 (pág. 27)

La compactación de la mezcla puede hacerse con diferentes equi-- pos, pero el más utilizado es el rodillo pata de cabra, que de-- be tener como mínimo 15 cm. de long. de pata. La compactación-- se realiza longitudinalmente y de los bordes hacia el centro; -

cuando las marcas de las patas son de 6 a 7 cm. de profundidad se hace un perfilado con la motoniveladora sin suspender el paso de la pata de cabra. Cuando la pata de cabra deje huellas de 2.5 cm. se suspende el paso de ésta, para hacer el perfilado definitivo con la motoniveladora. El número de pasadas del rodillo pata de cabra es por lo general de 8 a 12.

Va que se tiene el perfilado definitivo, se hace un rodillado con rodillo neumático para terminar con el rodillo de cilindros en tandem.

Como el proceso de construcción es largo, las pérdidas de humedad se hacen significativas, por lo cual es recomendable añadir agua por medio de tanques regadores y además tener en cuenta -- que el tiempo de todas las operaciones a partir del humedecimiento de la mezcla, no debe de sobrepasar las 4 horas.

El curado de la mezcla se hace necesario, ya que el proceso de hidratación del cemento es largo, por lo cual, cualquier método que evite la disminución en el contenido de humedad de la mezcla debido a la evaporación, es recomendable. La cubierta conservadora de la humedad debe de ser aplicada, tan luego se halla terminado la compactación final; dicha cubierta puede ser de materiales bituminosos, paja mojada ó capa de arena mojada.

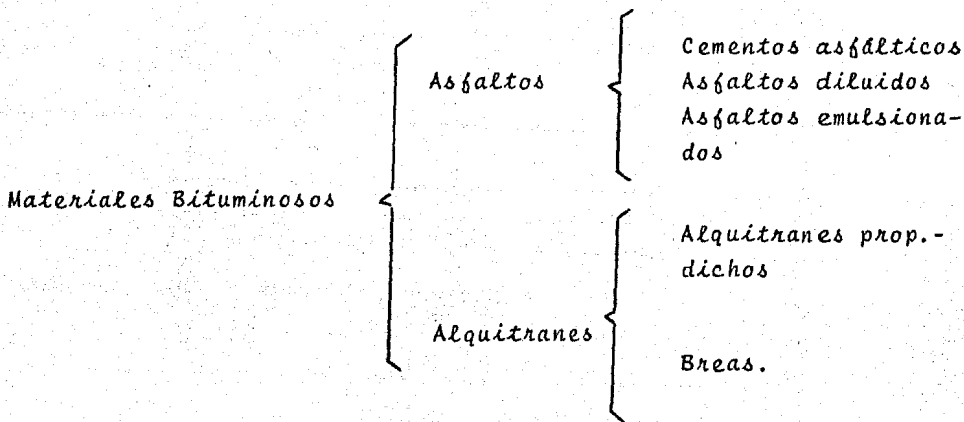
El material bituminoso comúnmente usado es el FR-2 ó el FM-3 (de los cuales hablaremos más adelante). Este material se aplica sobre superficies muy húmedas en proporciones de 0.74 a 1.47 lbs/m^2 . Si es necesario mantener el tránsito en circulación, debe aplicarse una capa de arena sobre el material bituminoso, para que éste no sea levantado.

2.5 Pavimentos Bituminosos

Los pavimentos bituminosos, denominados así de acuerdo a los materiales de que están constituidos, como lo es principalmente el "Bitúmen". Al hablar de este tipo de pavimentos, solo nos estamos refiriendo a la última capa de la estructura de un camino, que será la superficie de rodamiento; la que en mayor parte recibirá los efectos del intemperismo, así como los de la abrasión del tránsito. Antes de seguir con estos pavimentos hablaremos de los materiales bituminosos, así como de algunas de sus características.

La definición de "Bitúmen" por el instituto norteamericano del asfalto es como sigue: Es el componente básico de sustancias o cuerpos bituminosos, constituido por hidrocarburos naturales o no; totalmente solubles en sulfuro de carbono.

Los materiales bituminosos los podemos subdividir de la siguiente manera.



2.5.1 Asfaltos

Son hidrocarburos naturales o pirogénicos de color oscuro a ne-

gro, relativamente duros y no volátiles, generalmente asociados a minerales (arena, arcilla silice, etc.) y fácilmente solubles en sulfuro de carbono. Estos materiales los podemos -- obtener por refinación de asfaltos naturales, separación de las rocas asfálticas y destilación de petróleos.

2.5.1.1 Cementos Asfálticos

Los cementos asfálticos, son aquellos provenientes de asfaltos naturales o del petróleo, que van desde semi-sólido hasta sólidos a temperatura ambiente. Estos se distinguen de acuerdo al grado de penetración, y pueden distinguirse los siguientes tipos:

TIPO	PENETRACION a 25°C	(en décimas de milimetro)
1	40-50	
2	50-60	
3	60-70	
4	70-85	
5	85-100	
6	100-120	
7	120-150	
8	150-200	

Los asfaltos con valores de penetración mayor de 200, son tratados como asfaltos líquidos.

2.5.1.2 Asfaltos Diluidos.

Los asfaltos diluidos o líquidos, son los más comúnmente usados en pavimentos, y se obtienen diluyendo un cemento asfáltico en un derivado de la destilación del petróleo, como puede ser la-

gasolina el kerosene o el diesel.

El tipo de solvente utilizado para diluir el asfalto, es eliminando por exposición de éste a las condiciones atmosféricas, quedando el cemento asfáltico original. Según el tipo de solvente usado, podemos obtener 3 tipos de asfaltos diluidos:

1. fraguado rápido ----- F.R.
2. fraguado medio ----- F.M.
3. fraguado lento ----- F.L.

Cada uno de estos tipos de asfaltos diluidos, pueden subdividirse en varios tipos que se distinguen por un número, el cual indica la viscosidad de éste, la cual está en función de la cantidad de cemento asfáltico disuelto. La siguiente tabla nos da c/u de los sub-tipos de asfaltos disueltos, con su correspondiente porcentaje de solvente.

Tipos	% solvente						tipo de solvente	tipo de cemento asfáltico.
	0	1	2	3	4	5		
F.R.	50	40	33	27	22	18	gasolina aprox.	80
F.M.	50	40	33	27	22	18	kerosene aprox.	120
F.L.	60	50	40	30	25	20	diesel	80-100

2.5.1.3 Asfaltos Emulsionados

Los asfaltos emulsionados, son aquellos a los cuales se les disminuye su viscosidad por medio de una emulsión en agua, lo cual permite su aplicación sin previo calentamiento del mismo y el recubrimiento de las partículas de inerte por una película del mismo, tan delgada como se desee.

Las dispersiones bituminosas, son en general emulsiones en - - agua, formadas por 2 fases, una dispersa y la otra continua.

Las emulsiones pueden ser de 2 tipos: Una de aceite en agua y la otra de agua en aceite; dependiendo de las cantidades de ca da fase, así como del agente emulsivo.

El tipo de emulsión que interesa para pavimentos, es el de - - aceite en agua, como lo es el asfalto en agua; una vez lograda ésta, nos interesa saber el tiempo que permanece en ese estado denominado "ESTABILIDAD". También interesa a la hora de mez- - clar la emulsión con los inertes, conocer la coagulación o se- - paración de fases, denominada rompimiento.

Los asfaltos emulsionados pueden ser de 3 tipos, dependiendo - del tipo en el cual se presenta la rotura de la emulsión.

- a) rompimiento lento. ----- R.L.
- b) rompimiento medio. ----- R.M.
- c) rompimiento rápido. ----- R.R.

El uso de asfaltos emulsionados en los tipos más usados, la - concentración varía de 52 a 58%, usando cemento asfáltico de - grado 100 de penetración, aunque en otros casos usan el de gra - do 150 a 200.

2.5.2 Alquitranes

Son materiales bituminosos obtenidos por destilación destructiva de un grupo de sustancias orgánicas (prácticamente aquellas que tienen fracción volátil.)

Las breas, son la fase semi-sólida o sólida de los alquitra- -

nes, obtenidos por la destilación directa del alquitran; a la cual, se le extraen las fracciones volátiles.

Los alquitranes y las breas, son sustancias pirogenadas que se obtienen industrialmente de la hulla, la madera y algunos aceites vegetales y animales. El uso de Estos en la pavimentación depende de la facilidad para conseguirlos y el costo que pueden tener.

El uso de las breas en pavimentos, es similar al de los cementos asfálticos; como relleno de juntas y fabricación de juntas premoldeadas en pavimentos de concreto de cemento.

Va que hablamos de los diferentes tipos de materiales asfálticos utilizados en pavimentos, nos falta hablar de las características de cada uno de ellos que los hagan distinguirse; por lo cual en las tablas 4, 5, 6, 7 y 8 se dan las especificaciones que deben cumplirse, así como las indicaciones para su uso.

2.5.3 Propiedades y especificaciones de los Agregados

Va que hablamos de los materiales bituminosos, trataremos ahora los inertes que también son componentes de una mezcla para pavimentos e inmediatamente después describiremos lo que es el diseño de una mezcla para pavimentos.

Va que los inertes son los que proporcionan la resistencia y estabilidad por fricción dentro de una mezcla, estos deben cumplir con varias características, pero las más importantes son:

- a) Granulometría
- b) Forma de las partículas
- c) Constitución de las partículas.

TABLA # 4

ESPECIFICACIONES PARA CEMENTOS ASFALTICOS

Características	Métodos de prueba		Calidades				
	AASHO	ASTM	Industrial y especial	Pavimentos			
				60-70	85-100	120-140	200-300
Penetración, 25 C.	T 49	D 5	40-50	60-70	85-100	120-140	200-300
Viscosidad a 140 C. Saybolt Fural, SSF Cinémática.	.....	E 102 D 445	120+ 240+	100+ 200+	85+ 170+	70+ 140+	50+ 100+
Punto de inflamación (Vaso abierto) Grads. C.	T 48	D 92	230+	230+	230+	230+	176+
Penetración después de la pérdida por calentamiento a 25 C. % del original.	T 49	D 5	52+	50+	45+	42+	37+
Ductilidad a 25 C., en cm. a 15.7 C., en cm.	T 51	D 113	100+	100+	100+	60+ .....	..... 60+
Solubilidad en tetracloruro de carbono %	T 44	D 4	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+
			El asfalto debe ser preparado por refinación del petróleo. Debera tener características uniformes y no hacer espuma al calentarse a 176.7 grados Centígrados.				

Los grados de temperatura estan dados en la escala Centígrados.

Los métodos de pruebas se refieren a los dos más usados el de la A.A.S.H.O. y el de la A.S.T.M.

TABLA # 5

ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS DISUELTOS DE FRAGUADO RAPIDO (F.R.)

Características	Métodos de prueba		Grados					
	AASHO	ASTM	RC-0	RC-1	RC-2	RC-3	RC-4	RC-5
Punto de inflamación (Vaso abierto) Grds. C.	T 79	D 1310	-----	-----	26.7+	26.7 +	26.7 +	26.7 +
Viscosidad Furol a 25 C.	T 72	D 88	75 - 150	-----	-----	-----	-----	-----
Viscosidad Furol a 50 C.			-----	75 - 150	-----	-----	-----	-----
Viscosidad Furol a 60 C.			-----	-----	100-200	250-500	-----	-----
Viscosidad Furol a 82.2 C.			-----	-----	-----	-----	-----	125-250	300-600
Destilación (% de la destilación total a 360 Grds.C.)	T 78	D 402	-----	-----	-----	-----	-----	-----
a 190 Grds. C.			15 +	10 +	-----	-----	-----	-----
a 224.7 Grds. C.			55+	50+	40+	25 +	8 +	-----
a 260 Grds. C.			75+	70+	65+	55+	40 +	25 +
a 316 Grds. C.	90+	88+	87+	83+	80+	70+	-----	
Residuo de la destilación a 360 Grds. C. volumen en % por diferencia.			50+	60+	67+	73+	75+	82+
Pruebas de los residuos de la destilación:								
Penetración a 25 C.	T 49	D 5	80-120	80-120	80-120	80-120	80-120	80-120
Ductilidad a 25 C. en cm.	T 51	D 113	100 +	100+	100+	100+	100+	100+
Solubilidad en tetracloruro de carbono en %.	T 44	D 4	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+
Exigencias generales.			El material debe estar libre de agua.					

Los grados indicados en la tabla son centígrados.

La ductilidad está dada en centímetros.

**TABLA # 6. ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS DISUELTOS
DE FRAGUADO MEDIO (F.M.)**

Características	Métodos de prueba		Grados						
	AASHO	ASTM	FM-0	FM-1	FM-2	FM-3	FM-4	FM-5	
Punto de inflexión (Vaso abierto) Grds. C.	T 79	D 1310	37.8 +	37.8 +	65.6 +	65.6 +	65.6 +	65.6 +	
Viscosidad Furol a 25 Grds. C.			75-150	75-150					
Viscosidad Furol a 50 Grds. C.	T 72	D 88			100-200	250-500			
Viscosidad Furol a 60 Grds. C.							125-250	300-600	
Viscosidad Furol a 82.2 Grds. C.									
Destilación: 1% de destilación total a 360 C.) a 224.7 Grds. C. a 260 Grds. C. a 316 Grds. C.	T 78	D 402	25-40-70 75-93	20-25-65 70-90	10-15-55 60-87	5-5-40 55-85	0-30-40-50	0-20-20-75	
Residuo de destilación a 360 Grds. C. Volumen en % por diferencia.			50 +	60 +	67 +	73 +	78 +	82 +	
Pruebas de los residuos de la destilación: Penetración a 25 Grds. C. Ductilidad a 25 Grds. C. en cm Solubilidad en tetracloruro de carbono %	T 49 T 51 T 44	D 5 D 113 D 4	120-300 100+	120-300 100+	120-300 100+	120-300 100+	120-300	120-300 100+	
Exigencias generales			El material debe estar libre de agua						

**TABLA # 7. ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS DISUELTOS
DE FRAGUADO LENTO (F.L.)**

Características	Métodos de prueba		Grados					
	AASHO	ASTM	FL-0	FL-1	FL-2	FL-3	FL-4	FL-5
Punto de inflexión (Vaso abierto) Grds. C.	T 48	D 92	65.6+	65.6 +	80+	93.3+	107 +	121.1+
Viscosidad Furol a 25 Grds. C.			75-150	75-150				
a 50 Grds. C.	T 72	D 88			100-200	250-500		
a 60 Grds. C.							125-250	300-600
a 82.2 Grds. C.								
Agua, %	T 55	D 95	0.5-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Destilación: Destilación total a 360 Grds. C. Prueba de flotación en el residuo a 50 C. en segundos	T 78 T 50	D 402 D 139	15-40 15-100	10-30 20-100	5-25 25-100	2-15 50-125	10-60-150	5-75-200
Residuo astático de penetración de 100 %	T 56	D 243	40+	50 +	60 +	70 +	75 +	80 +
Ductilidad del residuo astático de penetración 100 a 25	T 51	D 113	100+	100 +	100 +	100 +	100 +	100 +
Solubilidad en tetracloruro de carbono %	T 44	D 4	99.5+	99.5 +	99.5 +	99.5 +	99.5 +	99.5 +

La granulometría recomendada por el Instituto del asfalto de los E.E.U.U., es cualquiera de las que aparecen en la siguiente tabla.

Dimensión de la malla	% en peso que pasa				
	A	B	C	D	E
1"	100	100	100	100	100
3/4"	75-100	75-100	85-100	85-100	85-100
# 4	35-45	40-60	45-65	50-70	60-95
# 10	20-35	25-45	30-50	35-55	45-80
# 200	2-7	3-8	5-10	5-12	5-15

También la A.A.S.H.O. recomienda que los inertes cumplan con una granulometría tal, que por lo menos el 10% del total pase por la malla #4 y sea retenido en la malla #10.

Dentro de la granulometría de los inertes, se distinguen 3 porciones de material:

- a) Porción gruesa
- b) Porción fina
- c) Relleno

La porción gruesa, es aquella parte de los inertes retenida en la malla # 10, y como puede verse en la tabla anterior, el tamaño máximo del agregado es de 1". Este límite es debido a -- que las partículas grandes presentan superficies irregulares -- que disminuyen el coeficiente de rozamiento, el ligante; no proporciona suficiente cohesión a las partículas mayores de 1"; -- las cuales toman en mayor magnitud los efectos del tránsito -- rápido.

La porción fina, es aquella parte de los inertes que pasa por la malla #10 y es retenida en la # 200.

El relleno, es todo aquel material de los inertes que pasa por la malla #200, siendo su función principal la de llenar los -- vacios que dejan la porción gruesa y fina.

El Instituto del Asfalto insiste, en que la relación de "fino-relleno" sea 6 como mínimo y 12 como máxima.

La forma de las partículas es muy importante, ya que ésta es -- la que proporciona la fricción interna; y es el motivo por el cual es recomendable que todo material retenido en la malla -- #4 tenga por lo menos una de sus caras fracturadas. Debido a lo anterior se recomienda que una parte de material a utilizar, sea obtenido por trituración.

La constitución de las partículas gruesas debe de ser tal, que su dureza no sea menor de 40, medida en la máquina de los angeles.

Otras características más que los inertes deben cumplir, son -- las siguientes:

- a) Ser materiales afines con el asfalto, como por ejemplo, las calizas.
- b) Que el relleno sea material no plástico, ya que éstos: forman una capa sobre los otros inertes; que impide la adherencia con el asfalto, sufren cambios volumétricos con la humedad. El relleno recomendable -- puede ser polvo de rocas calcáreas, polvo de trituración de las mismas ó cemento portland.

- c) Que el contenido de humedad no sea mayor del 2%, ya que si esto sucede, una capa de humedad envuelve el inerte y no puede producirse la adherencia con el asfalto.

El material ligante (asfalto), en este tipo de mezclas debe de cubrir todas y cada una de las partículas del inerte, perdiendo practicamente su elasticidad a causa de la adherencia.

La adherencia del inerte con el asfalto, juega un papel tan importante, que hablaremos un poco más de ella. La adherencia de un material con otro, es un fenómeno superficial que depende principalmente de 2 cosas: El contacto íntimo de las superficies y la afinidad entre ellas.

Como el contacto íntimo de un sólido con un semisólido es difícil de lograr, el asfalto debe de utilizarse en estado líquido a la hora de realizar la mezcla. También, es importante que la adherencia sea real, ya que puede presentarse el fenómeno de "envoltura" cuando se utilizan asfaltos diluidos. El fenómeno de envoltura se presenta, cuando el inerte se encuentra rodeado por una capa de humedad y el asfalto no alcanza a tocarlo, debido a la menor tensión superficial que presenta ante el agua.

2.5.4 Diseño de una mezcla

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de mezclas asfálticas, es la relación asfalto-inerte, ya que un exceso en el asfalto, aumenta la impermeabilidad y disminuye su acción de ligante; ya que el sobrante de éste, actúa como lubricante disminuyendo la estabilidad de la mezcla.

Una mezcla con mucho asfalto es muy durable, poco estable y

además, presenta exudación de material bituminoso; dado lo anterior, se recomienda utilizar el máximo contenido de asfalto, siempre y cuando éste no afecte la estabilidad de la misma. - También se puede buscar un equilibrio entre la estabilidad y la durabilidad, lo cual se consigue según experiencias, dejando una porosidad en la mezcla compactada del 3 al 6%.

Existen varias fórmulas y métodos empíricos para el cálculo de la cantidad de asfalto. A continuación mencionaremos algunos de ellos.

Basándonos en la fórmula ya conocida de mecánica de suelos, para determinar la porosidad de un suelo:

$$n = \frac{100 (S-s)}{S}$$

Donde: n es la porosidad

S es el peso específico absoluto de la mezcla

s es el peso específico aparente de la mezcla

En la fórmula anterior, n representa la porosidad; la cual si deseamos será llenada por asfalto. Si deseamos que haya una cierta porosidad x , la cantidad de asfalto a utilizar será $n-x$; donde x representa la porosidad deseada.

Mac. Kenson y Frickstad, propusieron la sig. fórmula empírica para el cálculo de la cantidad de asfalto:

$$p = 0.02 a + 0.045 b + 0.18 c$$

Donde: p es el porcentaje de asfalto, con respecto al peso total

a es el porcentaje de inerte retenido en la malla # 10

b es el porcentaje de inerte que pasa por la malla #10 y es retenido en la # 200.

c es el porcentaje de inerte que pasa la malla # 200.

El Instituto Norteamericano del Asfalto, también propone su fórmula:

$$p = .14R + 7S + 12F + C$$

Donde: p es el porcentaje en peso del asfalto, con respecto al peso del inerte.

R es el porcentaje decimal de material grueso

S es el porcentaje decimal de arena

F es el porcentaje decimal de limo.

C es una constante que depende del origen de los agregados, puede tomarse como la unidad.

Método de las áreas superficiales.

Este método, conocido también como método californiano, se basa en que cada una de las partículas de inerte, debe ser cubierta por el asfalto; por lo cual es necesario conocer la forma de las partículas y así, determinar el área que se debe cubrir con el mismo.

Conocida el área por cubrir, es necesario conocer la cantidad de asfalto conveniente; la cual depende de la forma y constitución de los agregados, todo lo anterior, el método lo toma en cuenta, con el Índice Asfáltico del material.

Como el método se basa en el área de c/u de los inertes, la cual depende de la forma y tamaño de los agregados, se han elaborado tablas (fig. 16), las cuales proporcionan las constantes de área, en función de su granulometría. También, se ha

10 cedazos		
Cedazo #		Constante
Pasa	Retenido	
3/4"	3/8"	1
3/8"	# 4	2
# 4	# 8	4
# 8	# 16	8
# 16	# 30	16
# 30	# 50	30
# 50	# 100	60
# 100	# 200	120
# 200	# 270	200
# 270	....	300

7 cedazos		
Cedazo #		Constante
Pasa	Retenido	
3/4"	3/8"	1
3/8"	# 4	2
# 4	# 8	4
# 8	# 30	12
# 30	# 100	46
# 100	# 100	120
# 100	....	260

7 cedazos		
Cedazo #		Constante
Pasa	Retenido	
1"	# 3	3
# 3	# 10	5
# 10	# 20	11
# 20	# 40	20
# 40	# 80	50
# 80	# 200	115
# 200	....	250

10 cedazos		
Cedazo #		Constante
Pasa	Retenido	
1"	# 3	3
# 3	# 10	5
# 10	# 20	11
# 20	# 30	18
# 30	# 40	27
# 40	# 50	36
# 50	# 80	55
# 80	# 100	75
# 100	# 200	120
# 200	....	250

6 cedazos		
Cedazo #		Constante
Pasa	Retenido	
3/4"	3/8"	1
3/8"	# 4	2
# 4	# 16	6
# 16	# 50	22
# 50	# 200	90
# 200	....	260

4 cedazos		
Cedazo #		Constante
Pasa	Retenido	
3/4"	# 8	2
# 8	# 50	17
# 50	# 200	90
# 200	....	260

4 cedazos		
Cedazo #		Constante
Pasa	Retenido	
3/4"	# 4	2
# 4	# 30	9
# 30	# 200	72
# 200	....	260

3 cedazos		
Cedazo #		Constante
Pasa	Retenido	
3/4"	# 8	2
# 8	# 200	45
# 200	....	260

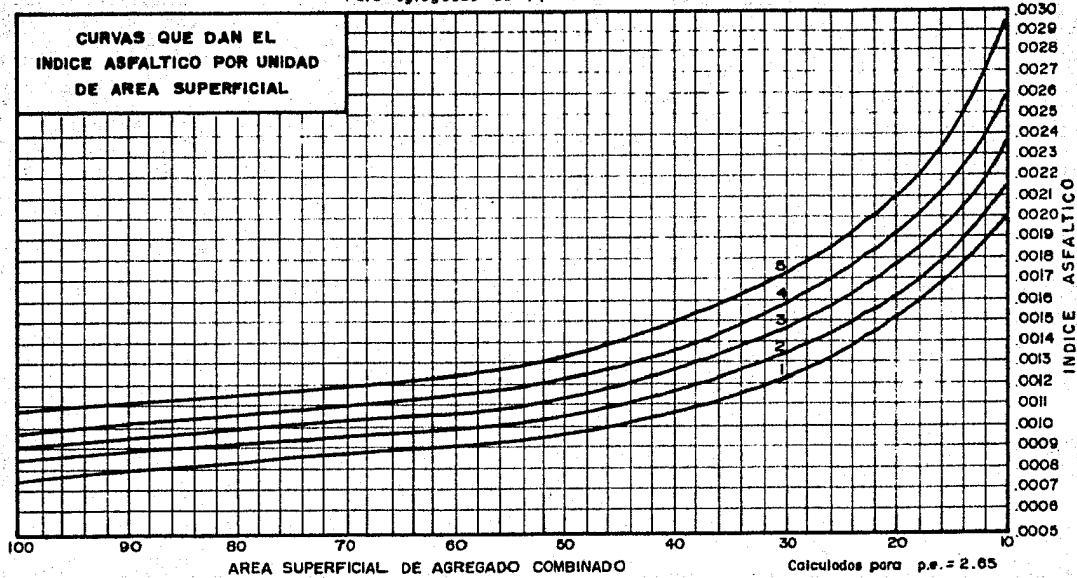
Fig. 16. Constantes de Superficie.

GRAFICO DE INDICE ASFALTICO

NOTA - Multiplíquese el área superficial por el índice asfáltico; el resultado dará el número de libras de asfalto por libra de agregado.

Empléese las curvas de la manera siguiente:

Para agregados duros y de superficie lisa:	curva 1 ó 2
Para partículas ásperas e irregulares:	curva 4 ó 5
Para agregados de tipo ordinario:	curva 3



GRAFICA # 6

elaborado la gráfica # 6 para obtener el índice asfáltico en función del área superficial de los agregados.

Con el uso de las tablas y la gráfica anterior; y utilizando la sig. fórmula, calculamos la cantidad de asfalto:

$$p = \frac{2.65 \text{ (const. de área) (INDICE ASFALTICO)}}{\text{Peso específico del inerte}}$$

Donde: p es el porcentaje de asfalto necesario, con respecto al peso de los agregados.

Secuela a seguir para el cálculo del asfalto necesario.

- a) Encontrar la granulometría del inerte, para usar una de las tablas de constante de superficie
- b) Calcular el peso específico del inerte.
- c) Calcular el índice asfáltico utilizando la gráfica #6
- d) Calcular la cantidad de asfalto, sustituyendo en la fórmula anterior los valores calculados.

2.6 Carpetas

El uso de materiales bituminosos en pavimentos es de gran importancia y muy variado, ya que puede ir desde una capa ligante hasta un concreto asfáltico; dando así, origen a diferentes tipos de carpetas como lo son.

- a) Carpeta por sistema de riegos
- b) Carpeta de mezclas asfálticas
- c) Carpeta de concreto asfáltico

2.6.1 Carpeta por Sistema de Riegos

Las carpetas por sistema de riego se pueden dividir en varios métodos, a continuación mencionaremos algunos de ellos.

a) *Asfalto en forma de riego.* Este método consiste en el riego de un asfalto líquido o emulsionado, como lo pueden ser un FL-0, FL-1, FL-2, FM-0; de tal manera que penetren lo suficiente para ligar los elementos del suelo.

La cantidad de asfalto a usar, depende de la capacidad de absorción del suelo, y puede variar de 1.32 a 3.14 lts/m². Como la distribución de este material debe hacerse a temperaturas mayores de la ambiente y lo más uniforme posible, se recomienda utilizar equipo mecánico para su tendido.

b) *Tratamientos superficiales.* Este tipo de tratamientos, son de procedimiento muy simple y económico, los cuales consisten en preparar una superficie de rodamiento de tipo bituminoso; con la aplicación de una o varias capas de este material, a las cuales se añade material inerte como grava, gravilla o arena. Este tipo de tratamientos los podemos dividir en: Tratamientos de simple aplicación y tratamientos de doble aplicación o múltiples.

El tratamiento de simple aplicación, consiste en la aplicación del asfalto a temperatura mayor de la ambiente, sobre la subrasante previamente limpia de todo material suelto. Después de la aplicación del asfalto, se procede al esparcido de una capa de inerte; la cual se recomienda sea con equipo mecánico. Las cantidades de material asfáltico e inerte a usar, así como el tipo de cada uno de ellos, pueden verse en la tabla #9.

El proceso constructivo de los tratamientos de simple aplica -

ción consta de 5 etapas:

- a) Barrido
- b) Riego de impregnación
- c) Riego de liga
- d) Riego pétreo
- e) Rodillado y rastrillado

El barrido se realiza sólo cuando el material sobre el cual se hará el trabajo, es de tipo cohesivo.

El riego de impregnación, se lleva a cabo para: cerrar los poros, impermeabilizar la superficie, eliminar el polvo y asegurar la liga entre la subrasante y el material bituminoso. Debido a las funciones anteriores la impregnación debe de hacerse con un material poco viscoso, para su fácil absorción como lo pueden ser los asfaltos diluidos FM-1 y FM-2.

La aplicación del material de impregnación debe de hacerse con equipo, ya que la temperatura de éste, debe ser de 52 a 66 grados centígrados y obtener una máxima penetración. La cantidad a utilizar de éste material, varía de 1.13 a 2.27 lts/m² dependiendo del tipo de material.

Después que se aplica el material de impregnación, es necesario dejar que se absorba y endurezca, deteniendo el tránsito por un tiempo de 24 a 48 hrs. Ya que ha endurecido se permite el tráfico, para que éste marque los defectos de la impregnación y se repita al proceso en dichos puntos.

Los tipos de material asfáltico que se utilizan en los riegos de liga son: Cementos asfálticos, asfaltos diluidos, emulsiones asfálticas y alquitranes; decidiéndose por una de ellos de

acuerdo a la economía que pueda lograrse.

Los cementos asfálticos que se utilizan, son los de un grado - de penetración que varía de 100 a 300, dependiendo del inerte - utilizado, lo cual podemos ver en la tabla sig. así como las - cantidades de cada uno de los materiales.

	Tamaño del inerte	Cantidad del inerte kg/m ²	Cantidad del cemento asfáltico Lt/m ²	Tipo de cemento asfáltico
A	3/4 a 3/8	22-30	1.43-1.74	120-150
B	3/4 a # 8	17-26	1.05-1.47	200-300
C	1/2 a # 8	14-19	0.93-1.16	200-300

En los asfaltos diluidos comunmente utilizados, las cantidades de material, así como el tipo de cada uno de ellos están dados en la tabla #9.

El material inerte a utilizar puede ser gravilla, ó canto roda do triturado; tener una dureza de 40 medida en la máquina de - los Angeles, también estar libre de materiales extraños y te - ner un peso específico no menor de 1.12 ton/m³. Este debe apli - carse inmediatamente después de la aplicación de material bitu - minoso, recomendando utilizar equipo mecánico.

El rodillado y rastrado, tienen el objetivo de conseguir super - ficies lisas y compactas, motivo por el cual, éste trabajo de - be de ser alternado.

Tratamientos múltiples. Los tratamientos múltiples, también - conocidos como de penetración invertida, son superficies de - rodamiento más resistentes que las anteriores, y su proceso - constructivo es como sigue:

TABLA # 9

	Tamano del inerte en Pulg.	Cantidad del inerte en Kg/m ²	Cantidad de asfalto en Gal/m ²	Tipos de material bituminoso	
				inerte duro	inerte absorbente
A	3/4 a 3/8	22-30	0.37-0.45	FR-5 RR-2	FR-5 RR-2
B	3/4 a # 8	17-26	0.27 - 0.38	FR-4 RR-2	FR-4 RR-2
C	1/2 a # 4	14-19	0.24 - 0.30	FR-3,4 RR-1,2	FR-2,3,4 RR-1,2
D	1/2 a # 8	14-19	0.24 - 0.30	FR-2,3,4 RR-1,2	FR-2,3,4 RR-1,2
E	3/8 a # 4	11 - 14	0.24 - 0.30	FR-2,3,4 RR-1,2	FR-2,3,4 RR-1,2
F	3/8 a # 8	11 - 14	0.24 - 0.30	FR-2,3,4 RR-1,2	FR-2,3,4 RR-1,2
G	1/4 a # 8	8 - 11	0.18 - 0.24	FR-2,3 RR-1,2	FR-2,3 RR-1,2
H	Arena	5 - 8	0.12 - 0.18	FR-2,3 RR-1,2	FR-2,3 RR-1,2

Las cantidades y tipo del material, deberan variar de acuerdo con las condiciones locales y la experiencia.

Se realiza una impregnación con un FM-0, FM-1 ó FM-2 en cantidades de 0.87 a 1.51 lts/m². Ya terminada la impregnación, se usa como ligante un FR-5 ó FR-4 en proporciones de 1.02 a 1.7 lts/m² y material inerte de 3/4" de 13 a 15 kg/m², después de esto, se realizan los trabajos de rodillado y nivelado con rastro, hasta tener una superficie lisa y compacta.

Ya realizados los trabajos anteriores se deja pasar un tiempo mínimo de 24 hrs., para después hacer una segunda aplicación del mismo material, en cantidades de 1.87 a 2.27 lts/m² y material inerte que pase por la malla #4 en cantidades de 5 a 6 kg/m²; terminados los trabajos anteriores, se procede a un segundo rodillado y rastreado. Este tipo de tratamientos pueden resistir volúmenes de tránsito hasta de 800 vehículos/día.

2.6.2 Carpeta de Mezcla Asfáltica

Las carpetas de mezclas asfálticas, son aquellas que se llevan a cabo sobre el terreno de la subrasante, y para su elaboración utilizan asfaltos diluidos, emulsiones asfálticos ó alquitranes. El material inerte utilizado, es producto de la misma subrasante; el cual debe de cumplir con una cierta granulometría, la cual se presenta en la sig. tabla.

pasa la malla	%
1"	100
1/4"	50-70
# 10	35-60
# 200	7-14

En la tabla anterior, el material que pasa la malla #10, no debe tener un contenido de humedad mayor del 20%; aunque es muy aconsejable que no pase del 5%. Los asfaltos diluidos utiliza-

dos en este tipo de mezclas son FL-2 y FL-3, en proporciones de 3.0 a 3.785 lts/m²/cada 2 cm. de espesor compactado.

El procedimiento constructivo consiste en extender los inertes sobre el terreno de la subrasante, incorporar el asfalto en forma de riegos, para después realizar el mezclado utilizando moto niveladora ó maquinaria especial; las cuales mezclan y distribuyen el material al mismo tiempo.

Existen otros tipos de máquinas como las mezcladoras móviles, - las cuales recogen el material inerte que se encuentra sobre la subrasante, agregan la cantidad de asfalto necesario al mismo tiempo que realizan la mezcla. Luego que ésta ha realizado el mezclado, deposita el material sobre la subrasante, para que -- después sea perfilado y compactado.

La secuela a seguir para diseñar mezclas asfálticas, es la sig.

- a) Escoger los inertes con los que se hará la mezcla
- b) Calcular la cantidad de asfalto necesario
- c) Determinar el tipo de asfalto diluido a usar
- d) Calcular la cantidad de asfalto escogido, tomando en cuenta que para asfaltos diluidos; estos contienen solventes -- que son volátiles.

2.6.3 Carpeta de Concreto Asfáltico

Las carpetas de concreto asfáltico, son mezclas uniformes de inerte, cubiertos con un cemento asfáltico; realizadas a altas-temperaturas para eliminar el contenido de humedad y garantizar la fluidez del asfalto. Debido a lo anterior, estas mezclas -- solo pueden realizarse en plantas mezcladoras donde pueda hacerse uso de la temperatura.

Los inertes utilizados en los concretos asfálticos son: Como parte gruesa; piedra ó grava triturada, como parte fina; arena y como relleno; polvo de trituración.

Los cementos asfálticos a utilizar, son de diferentes grados de penetración, pudiendo ayudarnos para la decisión, la sig. tabla recomendada por el Instituto del Asfalto; la cual nos proporciona el grado de penetración en función del tipo de tránsito y las condiciones ambientales.

Tipo de tránsito: liviano, medio, pesado

Temperatura ambiental.

alta	media	baja
70-85	70-85	70-85
60-70	70-85	70-85
50-60	60-70	60-70

Los concretos asfálticos los podemos clasificar en varios tipos, los cuales dependen de las combinaciones de los inertes que uno desee; así como la cantidad y el tipo de cemento asfáltico a usar.

Nosotros mencionaremos 3 tipos que son los más importantes:

- a) Asfalto laminares
- b) Concretos asfálticos de graduación fina
- c) Concretos asfálticos de graduación gruesa

2.6.3.1 Asfaltos Laminares. Los asfaltos laminares, son mezclas de arena, relleno y cemento asfáltico de 3.8cm. de espesor aproximadamente, la cual descansa sobre una base de concreto asfáltico ó de concreto de cemento portland.

Como este tipo de carpetas contienen gran cantidad de finos, es necesario llevar un control riguroso en la granulometría, ya -- que de no hacerlo así, se presentarán los problemas de inestabilidad para la mezcla.

Además de cumplir con la granulometría dada anteriormente, se -- deben cumplir las siguientes condiciones: El agregado que pasa por la malla #10 y es retenido en la #40; debe estar entre el -- 15 y el 50% del total. El agregado que pasa por la malla #40 y es retenido en la #80; debe de estar entre el 22 y el 65%, el -- inerte que pasa por la malla #80 y es retenido en la #200 debe -- de estar entre el 7 y el 40%.

El relleno a usar en este tipo de mezclas puede ser polvo de -- roca calcarea o cemento portland, y su granulometría debe ser -- tal que pase por la malla # 200:

El tipo de cemento asfáltico para este tipo de carpetas debe -- ser tal, que no produzca superficies susceptibles a deformacio-- nes o quebraduras, lo cual se origina usando cementos blandos y duros respectivamente. Es recomendable la tabla dada anterior-- mente del Instituto del Asfalto. La cantidad de asfalto a usar varía de un 9 a un 12% dependiendo de los agregados.

La base de concreto asfáltico sobre la cual descansan los asfal-- tos laminados, son estructuras que se construyen en graduación-- abierta o fina. La graduación abierta, son estructuras que uti-- lizan piedra triturada y un cemento asfáltico; dando origen a -- una superficie porosa.

2.6.3.2. Concretos bituminosos de Graduación Fina

La graduación fina o cerrada, son estructuras de inerte bien -- graduados y cemento asfáltico; Este tipo de graduación, es el --

más usado, enseguida, damos una granulometría para su agregado grueso.

GRADUACION DEL AGREGADO GRUESO PARA BASES DE ASFALTOS LAMINARES

Pasa la malla	%
1"	100
3/4"	95-100
3/8"	30-65
# 4	5-25
# 8	0-5

La arena fina debe estar limpia y pasar por la malla #4, de la cual, sólo se permite pasar por la malla #200 hasta un 8%.

También la composición de la capa base debe de cumplir con los siguientes límites:

inerte retenido en la malla #10	60-80 % (peso)
inerte que pasa la malla # 10	15-35 % (peso)

La composición exacta dependerá de la naturaleza de los inertes y la cantidad de asfalto variará de un 4 a un 7%.

Los concretos asfálticos en graduación fina, son mezclas compuestas de grava triturada, arena, relleno y cemento asfáltico.

La estabilidad de este tipo de mezclas depende de: La fricción, el acomodo de sus partículas y la cohesión del asfalto utilizado.

A continuación se da una tabla recomendable para la granulometría

tría de este tipo de mezclas.

Pasa la malla	retenido en la malla	%
1/2"	# 4	5-10
# 4	# 10	11-25
# 10	# 40	28-60
# 40	# 80	11-36
# 80	# 200	10-25
# 200	- - -	5-11

El relleno puede ser de material inerte, cemento portland ó - una combinación de ambos, y la cantidad de asfalto variará del 7 al 11%.

2.6.3.3 Concretos bituminosos de graduación gruesa.

Los concretos asfálticos en graduación gruesa, son mezclas con agregados graduados, que van desde los gruesos hasta el polvo; mezclados con un cemento asfáltico. La granulometría que debe de cumplir este tipo de mezclas, debe ser tal que sea estable, no se deforme ó se corra bajo la acción del tránsito. Una de las especificaciones recomendables para estas mezclas son las dadas a continuación:

Material	Pasa la malla	retenido en la malla	%
inerte	1 1/4"		55-65
	# 4	# 10	5-15
	# 10	# 200	20-30
inerte y relleno	# 200	-----	5-8

Además, el porcentaje en peso del inerte que pasa la malla de - 1 1/4" y es retenido en la de 3/4", debe de variar entre un 15

y un 45%. El inerte que pasa la malla de 3/4" y es retenido en la #4, debe de variar entre un 15 y un 45% del peso total.

El agregado fino y relleno también deben de cumplir con cierta granulometría, y es la sig:

Material	pasa la malla	retenido en la malla	%
inerte	# 10	# 40	15-40
	# 40	# 80	22-53
	# 80	# 200	15-40
inerte y relleno	# 200		5-8

El relleno que se puede utilizar en estas mezclas es: inerte, cemento portland, ó una combinación de ambos. La cantidad de asfalto varía de un 5 a un 8%, dependiendo de la experiencia.- El grado de penetración varía de 50 a 80 décimas de milímetro dependiendo del tránsito y la temperatura ambiental.

Como ya se dijo, los concretos asfálticos deben de cumplir con ciertas condiciones, como la estabilidad; la cual depende en gran medida de la granulometría de los agregados, el tipo y cantidad de cemento asfáltico y las características de fricción de los agregados.

2.6.4 Estabilidad de las mezclas

Las pruebas ó ensayos principales para valuar la estabilidad de una mezcla son las sig: Hubbard-Field, Marshall, Estabilómetro de Hveem, Compresión Triaxial, Mesa Vibradora y compresión directa.

A continuación describiremos algunas de las más importantes y más utilizadas.

a) Método Hubbard-Field. Esta prueba clasificada como de estabilidad a la presión, se realiza de la siguiente manera: Una muestra cilíndrica compactada y procedente de una carretera en servicio, se coloca en un molde cilíndrico, el cual consta de un agujero de menor diámetro que la muestra en la parte inferior. Colocada la muestra y a 60 grados centígrados, se aplica carga por la parte superior a razón de 2.54 cm. cada 25 seg. La máxima carga registrada para obligar a la muestra a pasar por el agujero del molde, es tomada como la estabilidad.

Las muestras para asfaltos laminados son de 5.08 cm. de diámetro por 2.54 cm. de alto; resultando estabilidades aceptables para tránsito pesado del orden de 907 kg. Para concretos asfálticos con agregados grandes, las muestras son de 15.24 por 5.08 cm. de diámetro y alto respectivamente. La estabilidad mínima recomendable para tránsito pesado es de 2000 kg.

b) Método Marshall. Esta prueba aprobada, y adoptada por el cuerpo de ingenieros de E.E.U.U. para el diseño de pavimentos de aeropuertos es como sigue: Se preparan muestras cilíndricas de 10.16 por 6.35 cm. de diámetro y alto respectivamente; con las proporciones deseadas y apisonadas por métodos de impacto. La muestra ya lista a 60 grados centígrados es colocada en el dispositivo de prueba en forma de collarín; el cual se carga a una velocidad de 5.08 cm./min. La estabilidad es medida por la carga máxima registrada que produce la deformación de la muestra.

c) Método de Hveem. Este método utilizado por la división de carreteras de California y realizado en un dispositivo llamado estabilómetro de Hveem, es como sigue: Se prepara la muestra con las características deseadas de 10.16 por 6.35 cm. de diámetro y altura respectivamente. La muestra a 60 grados-

es colocada en el dispositivo y cargada verticalmente; La presión horizontal desarrollada por la carga vertical es medida por el cambio de presión del líquido que rodea la muestra.

Este aparato, mide la estabilidad relativa por medio de la siguiente fórmula empírica:

$$\text{Estabilidad Relativa} = \frac{22.2}{\frac{P_h \cdot D_2}{P_v - P_h} (0.222)}$$

Donde: P_v es la presión vertical (Generalmente 28.12 kg/cm²)
 P_h es la presión horizontal cuando P_v es dada
 D_2 es el volumen de líquido que debe desplazarse para cambiar la presión horizontal de 0.35 a 7.03 kg/cm².

La preparación de los concretos asfálticos, requiere de plantas centrales de mezclado que garanticen la uniformidad de las mismas, estas pueden ser de producción continua o intermitente; las cuales constan de: Sistema de secado y calentado de los inertes, sistema de dosificación de inertes, asfalto y un sistema de mezclado.

La construcción de los concretos asfálticos sobre la base del camino, debe de realizarse con equipo mecánico (pavimentadoras), ya que su colocación debe de hacerse a altas temperaturas. Las pavimentadoras tienen la ventaja de producir capas de material constante, sobre la cual pasa el equipo de compactado por rodillado; ya sea con rodillos de cilindros ó en tandem.

BIBLIOGRAFIA

1. *Carreteras, Calles y Aeropistas*
R. Valle Rodas.
2. *Estudio sobre diseño de pavimentos flexibles*
Highway Research Board.
3. *Ingeniería de Carreteras*
{Calles, viaductos y pasos a desnivel
Howes y Ogleshy.
4. *Thickness of Flexible Paviments*
Highway Research Board
5. *Especificaciones Técnicas de Construcción (parte IV)*
S.A.H.O.P.
6. *La Ingeniería de Suelos en Vías Terrestres (vol. 2)*
Alfonso Rico y Hermilio del Castillo
7. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*
S.A.H.O.P.