

30 20



**Universidad Nacional Autónoma de México**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodesica

**"APLICACION DEL AZUFRE EN  
LA CONSTRUCCION DE  
PAVIMENTOS"**

**TRABAJO ESCRITO**  
ELABORADO EN OPCION DE TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
**INGENIERO CIVIL**  
P R E S E N T A  
I. DANIEL JARQUIN GIJON



**TESIS CON  
FALSA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

JUNIO 1990



## **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 está 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  
=====

CAPITULOS	PAGS.
I.- INTRODUCCION .....	1
1) Tipos de pavimentos .....	4
II.- TIPOS DE CARPETAS ASFALTICAS .....	12
a) Por riegos .....	13
Procedimiento de construcción .....	13
b) Carpetas asfálticas con mezclas en el lugar .....	17
Procedimiento de construcción .....	17
Control de calidad .....	19
Contenido óptimo de cemento asfáltico .....	20
Cemento asfáltico .....	24
Rebajados asfálticos .....	26
c) Carpetas de concreto asfáltico .....	28
Procedimiento de construcción .....	29
Control de calidad .....	33
Prueba " MARSHALL " .....	35
Contenido óptimo de cemento asfáltico .....	36
III.- EL AZUFRE EN LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS .....	41
El azufre como material de construcción .....	42
Azufre .....	43
Ventajas .....	46
Pavimentación a base de Azufre-Asfalto-Arena ...	47
IV.- APLICACION DEL AZUFRE EN LA CARRETERA : CARDENAS- VILLAHERMOSA, TAB. ....	50
Principales factores regionales .....	53
Aplicación del azufre .....	55
Proporciones de la mezcla ; arena-azufre-cemen- to asfáltico .....	56

Diseño de la estructura del pavimento .....	65
Proyecto de pavimento flexible .....	67
Características reológicas de la mezcla; arena-azufre- cemento asfáltico .....	70
Procedimiento de construcción .....	74
Materiales usados .....	77
Terracerías .....	81
Base tratada con emulsión azufrosa .....	81
Carpeta de concreto asfáltico elaborado en planta ....	87
Comparación de costos con otros procedimientos .....	88
V.- CONCLUSIONES .....	89

<b>Bibliografía</b> .....	95
---------------------------	----

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCION**

El ser humano ha tenido la necesidad de buscar la forma de sobrevivencia en este planeta, para ello ha tenido que satisfacer sus necesidades más elementales tales como:

su alimentación, su vestido y cuando se hizo sedentario su residencia.

Para su alimentación, tuvieron que intercambiar mercancías con otras tribus, para eso necesitaron de caminos o veredas para comunicarse entre sí.

Al descubrir la rueda y empezar a utilizarla en sus actividades incluyendo la del traslado de mercancías y materiales, tuvieron que acondicionar el terreno para hacerlo más eficiente, por ejemplo; para trasladar grandes bloques de piedra para la construcción de sus pirámides.

A partir del descubrimiento de la rueda, se inició una impresionante evolución del hombre, a través de su tecnología empezaron los inventos, en particular se empezó a desarrollar el medio de transporte que inicialmente fue por medio de carretas y después del descubrimiento del ferrocarril, siguió el automóvil; paralelamente se han ido acondicionando las superficies de rodamiento, para satisfacer o cumplir con las condiciones que esos medios exigen, por ejemplo; de la carreta al ferrocarril-automóvil-avión-etc., así sucesivamente.

Por todo lo anterior, ha sido necesario el estudio minucioso del suelo por donde circulan estos vehículos y los materiales que se pueden utilizar, aprovechar dichos materiales con la mayor eficiencia y con el mínimo costo.

Dentro de la construcción de las vías terrestres, se denominan TERRACERIAS a los elementos básicos de la infraestructura de una red de transporte. Lo anterior se aplica tanto a las más modernas autopistas como al más modesto camino rural y lo mismo a la pista que da servicio a aviones de retroimpulso en un gran aeropuerto que a la sencilla pista destinada al tráfico de pequeñas avionetas.

Para poder determinar el estudio del comportamiento de una vía terrestre, deben tomarse en cuenta varias condiciones; estudiar el terreno que sirve de apoyo, entendiéndose por tal no solo el suelo o roca que exista en el lugar pasivamente considerado, sino a todo un conjunto de factores que comprenden desde la constitución mineralógica, la estructura del suelo, la cantidad y estado del agua contenida y su modo de influir, hasta toda una agrupación de factores ajenos al concepto tradicional del suelo, pero que definen en el tiempo su comportamiento, tales como los factores climáticos, los económicos, etc..

La construcción de vías terrestres implica entonces el uso de los suelos, pero un uso selectivo, juicioso y, en lo posible científico. La Ingeniería moderna ha desarrollado ramas cuyo objetivo es: el aprender a manejar de la mejor manera posible los suelos y rocas que constituyen las vías terrestres.

**PAVIMENTO.**-Se define como pavimento al conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten adecuadamente distribuidas a las capas inferiores; proporcionan la superficie de rodamiento en donde se debe tener una operación rápida y cómoda .

Para los pavimentos de acuerdo a las teorías de esfuerzos y a las medidas de campo que se han realizado, los materiales con los que se construyen deben tener suficiente calidad para resistir las cargas, por lo mismo, a medida que las capas que los integran están localizadas a mayor profundidad, pueden tener una calidad menor, que esté en relación al nivel de esfuerzos que reciban.

El Ingeniero debe estructurar al pavimento haciendo uso de los materiales regionales con los que resolverá los diferentes problemas que se presentan, en la forma más económica posible.

#### TIPOS DE PAVIMENTOS

1.-Pavimentos Flexibles.-En este tipo de pavimento la superficie de rodamiento es proporcionada por una carpeta

asfáltica y la distribución de las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores, se hace por medio de fricción y cohesión de las partículas de los materiales, y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores, sin que se rompa su estructura; las capas que forman un pavimento flexible son: carpeta asfáltica, base y subbase, las cuales se construyen sobre la capa subrasante. figura I.1

2.-Pavimentos Rígidos.-La superficie de rodamiento de un pavimento rígido es proporcionada por losas de concreto hidráulico, que distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores, por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes que trabajan en forma conjunta con la que recibe directamente las cargas. Este tipo de pavimento no puede plegarse a deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural. Aunque en teoría las losas de concreto hidráulico pudieran colocarse en forma directa sobre la subrasante, es necesario la construcción de una capa de subbase para evitar que los finos sean bombeados hacia la superficie de rodamiento al paso de los vehículos, lo cual puede provocar fallas de esquina o de orilla en las losas; la sección transversal de un pavimento rígido esta formada por la losa de concreto hidráulico y la subbase que se construyen sobre la capa subrasante.Figura I.4.

En el capítulo II, se mencionan los tipos de carpetas asfálticas en la forma tradicional que más se construyen en el país, y posteriormente la aplicación del azufre en los pavimentos, ya sea en la base o sub-base, de tal forma que la combinación del azufre-cemento asfáltico y arena sustituya a una base hidráulica.

La aplicación de este material se realizó en la región sureste de México, donde escasean los materiales granulares, es decir, bancos de roca para poder triturarla y obtener el material adecuado, por ejemplo; para una base o sub-base hidráulica ya que estas capas de pavimento exigen muy buena calidad del material.

En esta región se localiza una de las plataformas productivas del azufre más importantes del mundo, aprovechando esta situación éste material se utilizó para estabilizar arenas finas mezcladas con cemento asfáltico, a fin de utilizarlas en la construcción de las capas antes mencionadas, habiéndose definido una proporción relativamente alta de azufre y una cantidad menor de cemento asfáltico, tratándose de obtener condiciones (medidas con prueba Marshall) semejantes a las de un concreto asfáltico, habiéndose involucrado también ensayos de pérdida de estabilidad por inmersión en agua para evitar algún problema al respecto.

El espesor de la base estabilizada se determinó utilizando un modelo matemático que permite calcular los esfuerzos de tensión máximos en sistemas multicapa, para lo cual se requería conocer los respectivos módulos de elasticidad de las capas del pavimento

y terracerías. En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se determinaron los datos básicos de la mezcla de estabilización necesarios para el estudio, efectuando ensayos de fatiga a compresión y a tensión, y ensayos a escala natural de carga cíclica, en modelos multicapa construídos en fosos de forma cúbica de 2.0 metros por lado, habiéndose obtenido los esfuerzos de tensión que resisten las capas estabilizadas, el módulo dinámico respectivo y las deformaciones límite a tensión.

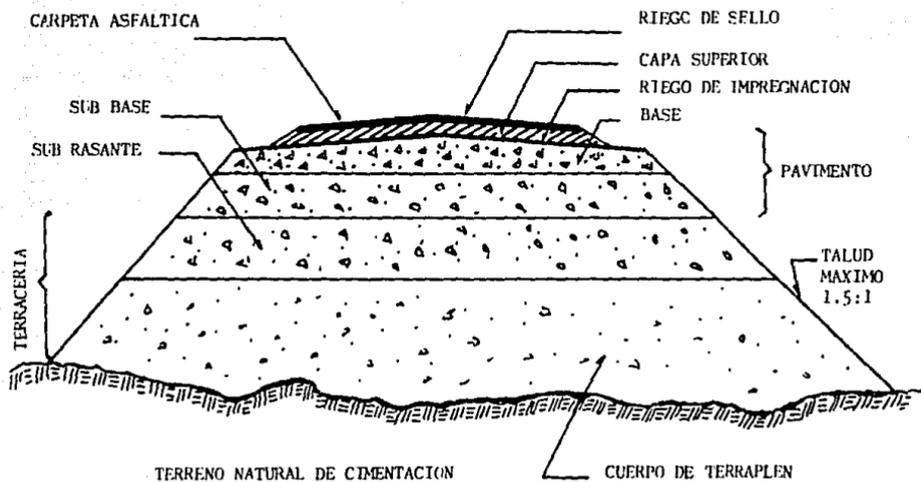


FIG. 1.1 SECCION TRANSVERSAL DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE EN TERRAPLEN.

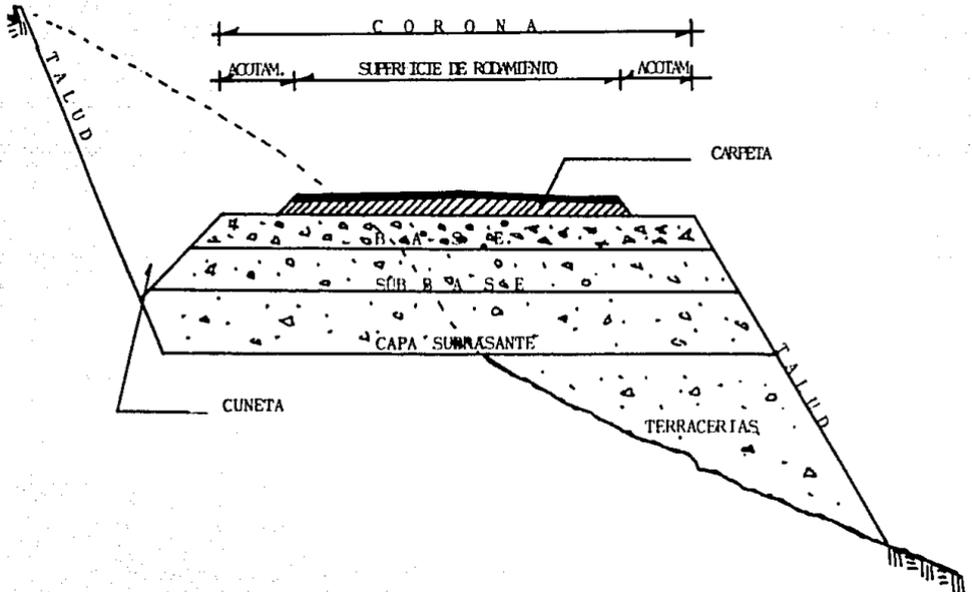


FIG. 1.2 SECCION TRANSVERSAL TIPICA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE EN UNA SECCION EN BALCON.

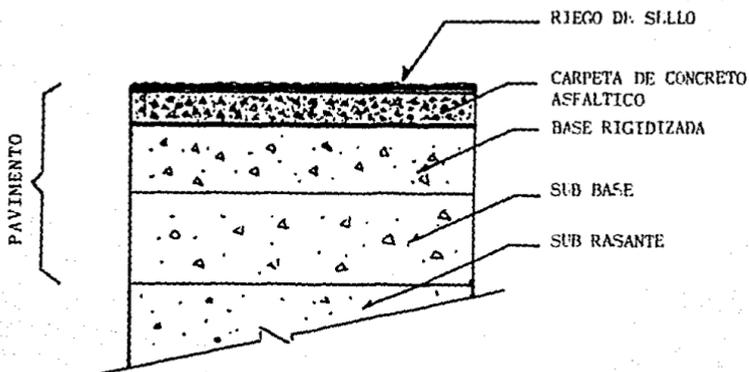


FIG. 1.3 CORTE TRANSVERSAL DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO.

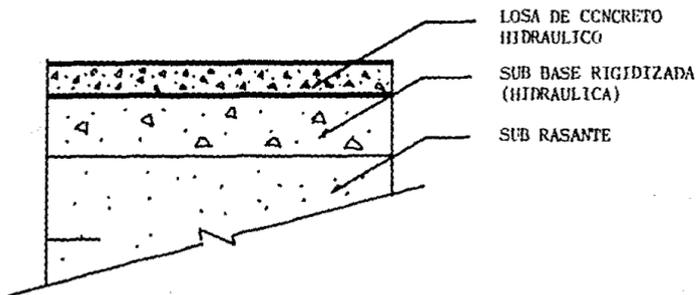


FIG. 1.4 CORTE TRANSVERSAL DE UN CONCRETO RIGIDO (HIDRAULICO).

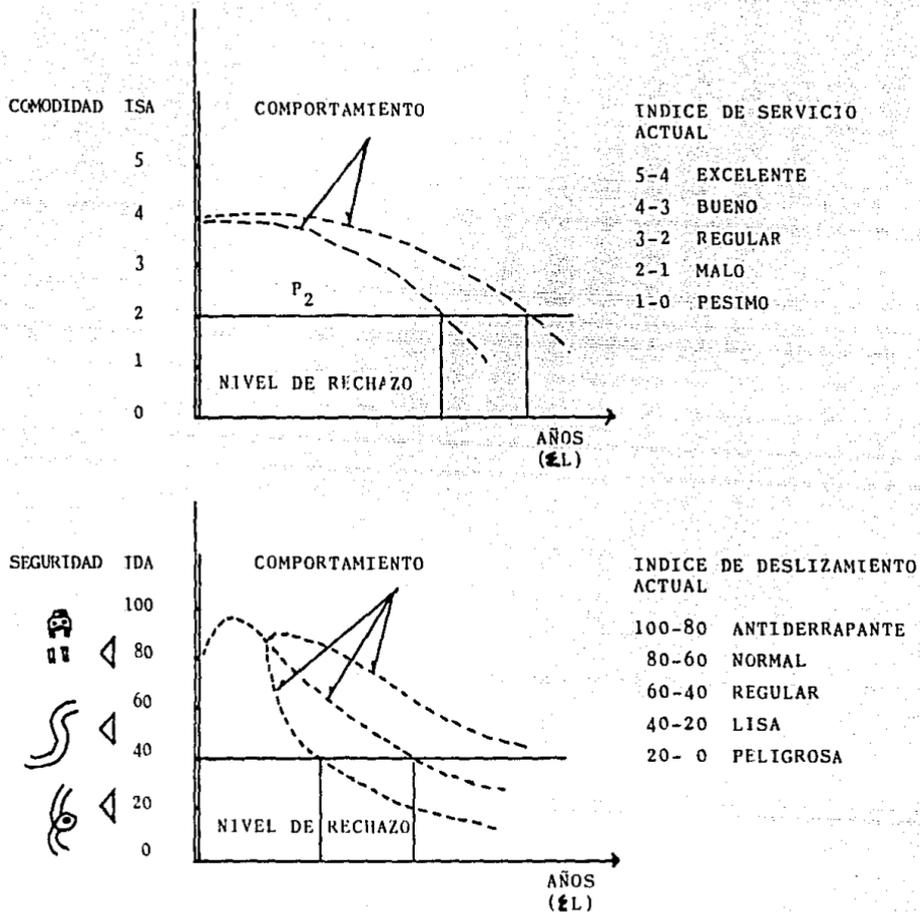


FIG. 1.5 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN PAVIMENTO.  
(CONDICIONES DE LA SUPERFICIE).

## **CAPITULO II**

### **TIPOS DE CARPETAS ASFALTICAS**

## II.-TIPOS DE CARPETAS ASFALTICAS.

La carpeta asfáltica es la capa superior de un pavimento flexible y proporciona la superficie de rodamiento para los vehículos. Se elabora con materiales pétreos y productos asfálticos.

Son tres los tipos de carpetas asfálticas más usadas en el país:

- a) Por riegos
- b) Mezclas en el lugar
- c) Concretos asfálticos.

### a) POR RIEGOS (tres riegos)

#### PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION:

La carpeta por riegos (tres riegos), consiste en una serie de capas sucesivas de productos asfálticos y pétreos sobre la base impregnada. La forma de construir este tipo de carpetas es la siguiente:

Teniendo ya construídas las capas del terraplén, subrasante, sub-base y la base y una vez pasadas las condiciones que las normas de construcción exigen (expansión, granulometría, resistencia, compactación, etc.), sobre la base impregnada se proporciona un primer riego de producto asfáltico que se cubre con un riego de material pétreo más grueso que se vaya a usar, por medio de una compactadora de rodillo liso de 10 ton., se le da un acomodo haciendo tres cubrimientos de la superficie. En seguida se repite toda la operación,

sólo que el material pétreo será de dimensiones menores al usado con anterioridad; en seguida, utilizando el material pétreo más fino se vuelve a repetir toda la operación con un riego de asfalto fluidificado, se riega el material pétreo y se acomoda con un rodillo liso (hasta completar tres ciclos).

Se deja una semana para que fragüe el producto asfáltico (se evaporen los solventes) y después, por medio de un barrido manual o mecánico, se retira el material fino que no este adherido al resto de la estructura. Esto es muy importante para evitar contratiempos a los usuarios, pues cuando no se hace o se realiza en forma defectuosa, se pueden dañar los vehículos, por las partículas que son expulsadas por las llantas o puede haber derrápes.

Para este tipo de carpetas se utilizan materiales pétreos con granulometría de tipo uniforme.

El tipo de material que se emplea es: material 1, el más grueso, y su gama de tamaños varía entre 25.4 mm (1 pulg.) y 6.35 mm (1/4 pulg.); el de tamaño intermedio se denomina número 2 y varía de 12.7 mm (1/2 pulg.) a 2.38 mm (num.8) y por último, el más fino con granulometría entre 9.51 mm (3/8 pulg.) y 0.42 mm (num.10) se denomina número 3.

También se tienen las carpetas de dos y de un riego para las que el procedimiento de construcción es semejante, sólo que en ellas se omiten uno o dos de los ciclos mencionados; utilizandose los

materiales de menor tamaño.

Los productos asfálticos que se utilizan en este tipo de carpetas de riegos son; rebajados de tipo FR-3 y emulsiones de fraguado medio. La cantidad apropiada que se debe utilizar en cada caso depende de la densidad y absorción del material pétreo, así como del tipo de producto asfáltico que se vaya a emplear. Lo conveniente es que se hagan pequeños tramos de prueba variando las cantidades entre los rangos recomendados.

FIG. 2.1 CARPETAS ASFALTICAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS  
NORMAS DE CALIDAD PARA MATERIALES PETREOS

CARACTERISTICA	INSTITUCION		
	SCT 92-03.2	DPW Calif. 37	ASTM D 1139
Particulas trituradas (%)		90 m	
Desgaste Los Angeles (%)	30 M	40 M	40 M
Intemperismo Acelerado (%)	12 M		12 M
Indice de Lajeo (%)	35 M		10 M
Afinidad con asfalto (%)	25 M	25 M	
Limpieza (%)		75 m	

FIG. 2.2 CARPETAS ASFALTICAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS  
EMPLEOS COMUNES DE MATERIALES PETREOS Y DOSI-  
FICACION APROXIMADA

INSTITUCION	MATERIAL TIPO	DOSIFIC. t/m <sup>2</sup>	CARPETA		
			1	2	3
SCT	1	12 - 20			A
	2	8 - 12		A	B
	3A	8 - 10	A		
	3B	6 - 8		B	C
	3E	9 - 11	A		
DPW Calif.	C	8 - 10	A	A	
	M	7 - 9	A		
	M-F	6 - 7	A		
	F	4 - 6	A	B	
A.A.-ASTM	5	12 - 20	A	A	A
	6	14 - 18	A	A'	A'
	7	9 - 11	A	B	B
	8	5 - 7	A	B'	B'
	9	5.5 a 6.5	A		C

**b) CARPETAS ASFÁLTICAS DE MEZCLAS EN EL LUGAR O EN FRIO**

Las mezclas asfálticas elaboradas en el lugar, se ejecutan utilizando materiales pétreos de granulometría continua, que se mezclan a la temperatura ambiente con el producto asfáltico que puede ser: rebajado asfáltico FR-3, que se calienta a la temperatura adecuada ( 70 °C ), o emulsión asfáltica de fraguado medio; la mezcla se puede realizar con motoconformadoras o con mezcladoras semifijas.

D) El procedimiento de construcción es como sigue:

1) Elección de bancos. Con este fin se hace una exploración de la zona que atravesará la obra y sus alrededores: en seguida se muestrearán los bancos de conglomerado y las rocas que pudieran utilizarse: se obtiene el contenido óptimo de asfalto para cada material y al final, tomando en cuenta la calidad de las mezclas elaboradas y los estudios económicos, se elegirán los bancos a utilizarse en la obra de que se trate.

2) Ataque a los bancos. Si se trata de materiales conglomerados o de roca firme, se tendrá que hacer uso de explosivos y la extracción se hará con palas frontales o mecánicas.

3) Tratamientos previos. En el caso de las mezclas elaboradas en el lugar, los tratamientos previos pueden ser de cribado o triturado de acuerdo a los desperdicios que se tengan en los

materiales.

4) Transporte a la obra. Una vez que se ha realizado a los materiales el o los tratamientos previos, se transportan a la obra en donde por medio de una motoconformadora se acamellonan y se mide el volumen acarreado con lo que se hacen los ajustes necesarios si es que falta o sobra, de acuerdo con los espesores de proyecto y se calcula la cantidad de producto asfáltico que se requiera en base al contenido óptimo de asfalto obtenido en el laboratorio.

5) Una vez que se ha calculado la cantidad de asfalto para regarse en un tramo de longitud determinada, se va abriendo con la motoconformadora el material pétreo, cubriendo parte de la corona de la obra, sobre este material se riega asfalto por medio de una petrolizadora. La motoconformadora volverá a abrir el material acamellonado (esparcido sobre el anterior) y la petrolizadora regará otra parte del asfalto calculado. Estas operaciones se volverán a realizar hasta que se incorpore, en pasadas completas de la petrolizadora, todo el asfalto necesario. Después de lo anterior la motoconformadora empezará a mezclar el material pétreo a el asfalto. Si el contenido de solventes de la mezcla, es mayor a 0.09 con respecto a la cantidad de cemento asfáltico utilizado, se seguirá moviendo la mezcla con la motoconformadora, hasta que ese contenido este abajo de ese valor.

6) Alcanzado lo anterior se procede a dar sobre la base impregnada

y barrida, un riego de liga con rebajado asfáltico FR-3 en proporción de 0.7 lts/m<sup>2</sup> y de inmediato se extiende la mezcla sobre la corona con un espesor constante.

7) Ya extendida la mezcla, se procede a compactarla para lo cual se pueden utilizar rodillos neumáticos, o rodillos lisos o ambos, con pesos entre 8 y 15 toneladas hasta alcanzar 95% del peso volumétrico de la prueba Porter Estándar.

#### IID VERIFICACION DE LA CALIDAD DE LA MEZCLA ANTERIOR

El control para verificar la calidad de las mezclas elaboradas en el lugar, consiste en conocer el contenido de asfalto y el peso volumétrico alcanzado en la compactación; con anticipación se conocerá la granulometría y el porcentaje de solventes antes de la compactación; se deberá conocer la permeabilidad de la carpeta, que deba ser menor del 10%, en caso contrario se deberá proporcionar un sello. Este sello también se dará si se quiere tener una superficie de desgaste o mejorar la fricción.

## II.1) CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO PARA MEZCLAS EN EL LUGAR O EN FRIO.

En este caso, el contenido óptimo de cemento asfáltico se obtiene por medio de la prueba de compresión sin confinar que en forma general se lleva a cabo como sigue:

Se obtiene el contenido mínimo de asfalto de cubrimiento total (CMCT), que puede conocerse en forma objetiva, en forma analítica o por medio de pruebas; la obtención de esta proporción es como sigue: a la temperatura de mezclado ( aprox. a 50 °C ), se agrega y se mezcla rebajado asfáltico o emulsión, según se vaya a usar, a una muestra de material pétreo, hasta el momento en que todas las partículas se cubran. En este caso, la partícula de asfalto es muy delgada, sobre todo la de las partículas gruesas, pues éstas son las últimas que se cubren, se calcula el contenido mínimo de cubrimiento total de la siguiente manera:

$$\text{CMCT} = \frac{\text{Peso del producto asfáltico incorporado}}{\text{Peso del material utilizado}} \times 100$$

Para encontrar el contenido mínimo de cubrimiento total por medio de fórmulas, es necesario conocer la granulometría de los materiales pétreos, ya que de acuerdo a ésta se encuentran la superficie por cubrir con el asfalto y se tienen dos variantes.

La primera variante se aplica para materiales graduados con

finos. En este caso, se usan constantes de área que están expresadas en metros cuadrados de superficie por Kg de material pétreo; así, el porcentaje de material que se retiene en las diferentes mallas, se multiplica por la constante de área, este producto a su vez se multiplica por el índice asfáltico, correspondiente a las características del material, que es un contenido parcial de cemento asfáltico ( CA ).

Las constantes de área se muestran en la fig. Núm. 2.4

Para encontrar el porcentaje de cemento asfáltico, la suma de los contenidos parciales se multiplica por 100, así en este caso es de 3.2%, si se usa un producto FR-3 con contenido de 69% de cemento asfáltico, el porcentaje en peso de FR-3 será  $3.2/0.69=4.65\%$ .

Si la densidad de asfalto es de 0.94 y la del material pétreo 1.45, el volumen de asfalto en % será:  $4.65 \times 1.45/0.94 = 7.2\%$  y la cantidad en litros:  $7.2 \times 100 = 72 \text{ lts/m}^3$  de agregado.

La segunda variante para obtener el porcentaje mínimo en forma analítica, se aplica a materiales graduados con pocos finos, y en este caso se utiliza la fórmula:

$$I = 0.02 a + 0.045 b + cd$$

I = contenido mínimo de cemento asfáltico

a = porcentaje de material retenido en la malla No. 10

b = porcentaje de material que pasa la malla No. 10 y se retiene en la malla No. 200

c = porcentaje de material que pasa la malla No. 200

d = coeficiente asfáltico que se da en la fig. N°. 2.3

MATERIAL	" d "
GRAVAS Y ARENAS DE RIO O MATERIALES REDONDEADOS DE BAJA ABSORCION . . . . .	0.150
GRAVAS TRITURADAS DE BAJA ABSORCION . . . . .	0.200
ROCAS TRITURADAS DE ABSORCION MEDIA . . . . .	0.300
ROCAS TRITURADAS DE ALTA ABSORCION . . . . .	0.350

Fig. Num.2.3. Coeficiente asfáltico para encontrar el porcentaje mínimo de cubrimiento total en base a la granulometría del material pétreo.

MATERIAL	INDICE ASFALTICO
GRAVAS O ARENAS DE RIO O MATERIALES REDONDEADOS DE BAJA ABSORCION . . . . .	0.0055
GRAVAS ANGULOSAS O REDONDEADAS, TRITURADAS, DE BAJA ABSORCION . . . . .	0.0060
GRAVAS ANGULOSAS O REDONDEADAS, DE ALTA ABSORCION Y ROCAS TRITURADAS DE ABSORCION MEDIA . . . . .	0.0070
ROCAS TRITURADAS DE ALTA ABSORCION . . . . .	0.0080

MATERIAL RETENIDO		CONSTANTE DE AREA
PASA LA MALLA	EN MALLA	M2/Kg.
38.1 mm (1 ½ )"	19.05 mm (3/4)"	0.27
19.05 mm (3/4)"	NUM. 4	0.41
NUM. 4	NUM. 40	2.05
NUM. 40	NUM. 200	15.38
NUM. 200		53.30

Fig. Num.2.4.- Constantes de área para encontrar el porcentaje de contenido mínimo de cubrimiento total con base en la granulometría del material pétreo.

### CEMENTO ASFALTICO

El asfalto, también llamado cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo y a temperaturas normales es sólido, de color café obscuro. Para poder ser mezclado con los materiales pétreos, debe calentarse a 140 °C. por lo que para ello es necesario contar con una planta.

Las especificaciones correspondientes se dan en la siguiente tabla. El más utilizado es el No. 6.

CARACTERISTICAS	CEMENTO ASFALTICO			
	No. 3	No. 6	No. 7	No. 8
PENETRACION, 100 g., 5s., GRADOS	180-200	80-100	60-70	40-50
VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL A 135° C, s, MINIMO	60	85	100	120
PUNTO DE INFLAMACION (COPA ABIERTA DE CLEVELAND), ° C, MINIMO	220	232	232	232
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO, ° C	37-43	45-52	48-56	52-60
DUCTILIDAD, 25° C, Cms., MINIMO	60	100	100	100
SOLUBILIDAD EN TETRACLORURO DE CARBONO, % MINIMO	99.95	99.95	99.95	99.95
PRUEBA DE LA PELICULA DELGADA, 50 Cms <sup>3</sup> , 5h, 163° C: PENETRACION RETENIDA, % MINIMO	40	50	54	58
PERDIDA POR CALENTAMIENTO, % MAXIMO	1.4	1.0	0.8	0.8

Fig. Num.2.5.- ESPECIFICACIONES PARA EL CEMENTO ASFALTICO.

Para conocer el porcentaje en peso del producto que se va a utilizar se procede del mismo modo que en la primera variante.

Este mínimo también se puede obtener por medio de la prueba de CKE (coef. del equivalente de keroseno), o la de CKE modificada, sólo que en este último caso, se obtiene aproximado el contenido óptimo y no el mínimo.

Ya obtenido el contenido mínimo de cubrimiento total, se preparan 6 mezclas con 3 Kgs. de material pétreo, una con ese porcentaje de asfalto, otra con 0.5%; 1.0%; 1.5% y 2.0% más, respectivamente que el CMCT.

Con cada una de estas mezclas, con los solventes debidamente evaporados (defluxados) y a la temperatura de 40 °C, se elabora un espécimen, utilizando un molde metálico de 10 cm. de diámetro, con tal cantidad de material pétreo que al dársele una compactación por medio de una presión de 40 kg/cm<sup>2</sup>, se tenga una altura en él de  $12 \pm 0.5$  cm. Al cabo de 2 hr en la que tengan todos los especímenes una temperatura del medio ambiente, se meten al agua a una temperatura de 20 °C protegidos con bolsas de plástico, durante 30 min. y al cabo de este tiempo se llevan a la ruptura y los porcentajes de asfalto correspondientes, se forma una gráfica en la que en el eje de las abscisas se coloca este dato y en el de las ordenadas el esfuerzo de ruptura.

## II.2) REBAJADOS ASFALTICOS

Con el fin de poder hacer trabajable al cemento asfáltico a temperaturas menores, es necesario fluidificarlo, para lo cual se producen los rebajados y las emulsiones asfálticas.

Los rebajados asfálticos se fabrican diluyendo el cemento asfáltico en gasolina, tractolina, también conocido como petróleo diáfano, o con diesel o aceites ligeros.

En el primer caso se obtienen los rebajados de fraguado rápido o FR, en el segundo caso los rebajados de fraguado medio o FM, y por último los de fraguado lento o FL. Los rebajados rápidos, medios o lentos, se pueden producir con diferentes proporciones de cemento asfáltico ( entre 50 y 80 % ), y los correspondientes de solventes o fluxes ( entre el 50 y el 20 % ). De esta manera, para cada uno de los rebajados se tienen especificados 5 tipos que se enumeran del 0 al 4, teniendo mayor denominación los que tienen mayor cantidad de cemento asfáltico, y disminuye a medida que aumenta el contenido de solventes. Así se tienen FR del 0 al 4; FM del 0 al 4 y FL del 0 al 4, las especificaciones correspondientes se muestran en las figs. 2.6 y 2.7.

Para poder realizar las mezclas con los agregados pétreos y los cementos o los rebajados asfálticos, es necesario que aquellos estén bien secos, pues de otra manera no hay adherencia con el

CARACTERISTICAS	G R A D O				
	FR-0	FR-1	FR-2	FR-3	FR-4
PRUEBAS AL MATERIAL ASFALTICO					
PUNTO DE INFLAMACION, °C MINIMO			27	27	27
VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL :					
A 25°C , Segundos .....	75-150				
A 50°C , Segundos .....		75-150			
A 60°C , Segundos .....			100-200	250-500	
A 82°C , Segundos .....					125-250
DESTILACION : % DEL TOTAL DESTILADO A 360°C :					
HASTA 45°C, Mínimo ....	55	50	40	25	8
RESIDUO DE LA DESTILACION A 360°C , % Mínimo .....	50	60	67	73	78
AGUA POR DESTILACION, % Máximo ..	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
PRUEBAS AL RESIDUO DE LA DESTILACION :					
PENETRACION , °C	80-120	80-120	80-120	80-120	80-120
DUCTILIDAD EN Cm. Mínimo : 100	PARA TODOS				
SOLUBILIDAD EN TETRACLORURO DE CARBONO, % Mínimo!	99.5 PARA TODOS.				

Fig. Núm.2.6.-Asfáltos Rebajados de fraguado rápido.

CARACTERISTICAS	G R A D O .				
	FM-0	FM-1	FM-2	FM-3	FM-4
PRUEBAS AL MATERIAL ASFALTICO.					
PUNTO DE INFLAMACION, °C Mínimo	38	38	66	66	66
VISCOSIDAD SAYBOL-FUROL :					
A 25 °C, Segundos.....	75-150				
A 50 °C, Segundos.....		75-150			
A 60 °C, Segundos .....			100-200	250-500	
A 82 °C, Segundos .....					125-250
DESTILACION: % DEL TOTAL DESTILADO A 360 °C					
HASTA 225°C, Máximo .....	25	20	10	5	0
HASTA 250°C, Máximo .....	40-70	25-65	15-55	5-40	30 Míx.
HASTA 315°C, Máximo .....	75-93	70-90	60-87	55-85	40-80
RESIDUO DE LA DESTILACION A 360 °C. % DEL VOLUMEN TOTAL POR DIF. MINIMA . . . . .	50	60	67	73	78
AGUA POR DESTILACION, % Máximo	0.2 para todos				
PENETRACION , °C	120-300	128-300	120-300	120-300	120-300
DUCTILIDAD EN Cm. Mínimo	100 para todos				
SOLUBILIDAD EN TETRACLORURO, % Mínimo ,	99.5 para todos				

Fig. Núm.2.7.- Asfáltos rebajados de fraguado medio.

asfalto.

### C) CARPETAS DE CONCRETO ASFALTICO

Las carpetas de concreto asfáltico son mezclas de materiales pétreos y cemento asfáltico; como éste último a temperatura ambiente, es sólido, es necesario que la elaboración se efectúe en una planta en la que se calienta hasta 140 °C y, por consiguiente, también se calienta el material pétreo, lo que se hace hasta la temperatura de 160 °C.

Debido a las características del cemento asfáltico, este tipo de carpetas tiene comportamiento de tipo elástico, con ruptura de tipo frágil y de poca resistencia, principalmente a bajas temperaturas, por lo que este tipo de carpetas no deben construirse sobre bases naturales, con módulos de elasticidad bajos, que pueden tener deformaciones bajo la acción del tránsito, sino que se deben construir sobre bases rigidizadas con cal hidratada o cemento portland o sobre bases asfálticas.

El material pétreo que se utiliza en este caso, en general es roca triturada del tipo basalto, andesita o reolita sanos, aunque también pueden ser bancos de grava-arena, de minas, playones de río o arroyo; conviene que estos dos últimos tipos tengan bastante desperdicio de triturar, ya que, como muchas veces son materiales redondeados, puede ser que la mezcla no pase las normas de resistencia, pero al triturarse se producen superficies rugosas

que mejoran su calidad.

## I) PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION

El procedimiento de construcción para carpetas de concreto asfáltico es como sigue:

I.1- Se eligen los bancos de material pétreo, que en general serán de roca maciza como basalto, riolitas, andesitas, calizas o bien, bancos de conglomerados o aglomerados; pero conviene que éstos tengan suficiente desperdicio para ser triturados; si el tipo de material que se va a utilizar por no haber otro tiene un fuerte porcentaje de partículas lisas, es conveniente que se les produzca una superficie rugosa, pasando el material por una trituradora.

Los probables bancos se sondan, ya sea con máquinas rotatorias o a cielo abierto y se realizan los muestreos correspondientes; los materiales se llevan al laboratorio para realizar las pruebas de identificación y por fin hacer la selección de los bancos que se usarán en la obra, en esta etapa.

I.2- Se hace el proyecto de granulometría en el laboratorio y se encuentra el contenido óptimo de cemento asfáltico. Con base en la granulometría se calibra el abastecimiento de la planta mezcladora.

I.3- Se realiza la extracción del material; para rocas y

conglomerados duros se necesitan explosivos, y para la carga se requiere desde palas manuales en aglomerados hasta palas mecánicas para fragmentos de roca. Se efectúa el triturado y cribado del material. Es conveniente que se hagan almacenamientos con 3 ó 4 tamaños diferentes.

I.4- En la planta de mezclado se realiza el primer proporcionamiento aproximado de pétreos en frío, por medio de cargadores frontales o utilizando las compuertas de las tolvas.

I.5- El material se lleva al cilindro de calentamiento y de secado, el pétreo se calienta entre 150 y 170 °C.

I.6- Ya con la temperatura necesaria, el pétreo se eleva a la unidad de mezclado, en donde, en primer término, se hace un cribado para alimentar a 3 ó 4 tolvas con material de diferentes tamaños, después se deposita en la caja mezcladora, en donde se provee del cemento asfáltico, a una temperatura de 130 a 140 °C, se realiza la mezcla hasta ser completa su homogeneización y, por último, se hace el vaciado al equipo de transporte o a un silo de almacenamiento provisional.

I.7- Se transporta la mezcla al tramo, a donde debe llegar a una temperatura de 110 a 120 °C, por lo que, si es necesario, se deben utilizar lonas que la cubran durante el trayecto.

Antes de colocar la mezcla se debe dar un riego de liga con FR-3 sobre la base impregnada, en proporción de  $0.7 \text{ lt/m}^2$ . Al llegar el equipo de transporte al tramo, descarga su contenido a la máquina extendora (finisher) que, forma una franja de mezcla asfáltica, evitando segregaciones del material y dándole una ligera compactación. Al terminar de vaciar un camión, se para el tren de extendido y al ensamblarse el siguiente, se reanuda el trabajo, por lo que entre vehículo y vehículo se tiene una junta en donde puede haber una discontinuidad que deberá ser evitada o reducida por un equipo de rastrilleros, que en número de 4 ó 6 por extendora, tienen como función además de lo anterior, la de asegurar una textura conveniente en la superficie y borrar las juntas longitudinales entre las franjas.

I.8- A una temperatura mayor de  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , se debe iniciar la compactación de la franja, para lo que al principio se utiliza un rodillo liso de aproximadamente 7 ton., para dar un primer armado y permitir posteriormente la entrada de equipo, con peso de 15 ton. aproximadamente, el cual no se puede usar desde el principio, porque produce el desplazamiento de la mezcla. Se pueden utilizar rodillos lisos o neumáticos; al final se deben borrar las huellas de compactación, utilizando un rodillo liso. El grado de compactación será de 95 % como mínimo, con respecto al peso volumétrico de proyecto. Para conocer este grado de compactación, se extraen corazones con máquinas rotatorias.

### 1.9- IMPERMEABILIZACION DE CARPETAS

Además del control de compactación y de temperatura ya indicados, se debe controlar la cantidad de asfalto en las mezclas y la granulometría del material pétreo: a 2 o 3 días de compactada la mezcla, se hace la prueba de permeabilidad, aunque en este tipo de carpetas se cumple con las especificaciones, es necesario un riego de sello o la aplicación de un mortero asfáltico que sirve como superficie de desgaste.

### 1.10- RIEGO DE SELLO

El tratamiento de riego de sello es similar a la construcción de la carpeta de un riego, sólo que ésta se hace sobre una base y aquel sobre una carpeta que se requiere impermeabilizar; aunque también sirve como capa de desgaste, para mejorar el coeficiente de rugosidad y aun para señalar la superficie de rodamiento que los conductores conozcan por el ruido de las llantas o por el color de la superficie, se utiliza material pétreo No.3 y un producto rebajado del tipo FR-3 o emulsión de fraguado medio.

## II) CONTROL DE CALIDAD

### GRANULOMETRIA DE PROYECTO PARA CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO.

Para este tipo de carpetas las normas son muy exigentes en lo que a granulometría se refiere y marcan una sola zona granulométrica ( fig. 2.8 ) relativamente angosta, en donde debe quedar alojada la curva de proyecto. Esta curva está en función de la dureza y densidad del material y el equipo de trituración del contratista, en el que en algunos casos deben hacerse cambios o ajustes para dar cumplimiento a las especificaciones.

ZONAS DE ESPECIFICACION GRANULOMETRICA PARA MATERIALES PETREOS, QUE SE EMPLEEN EN CONCRETOS ASFALTICOS.

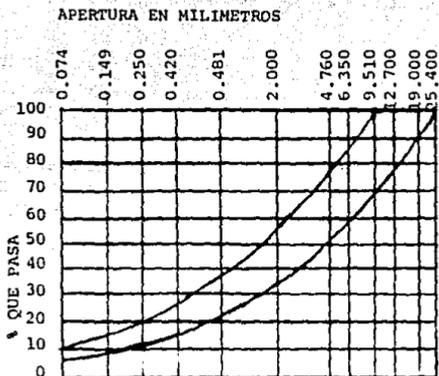


FIG. Núm.2.8.-ZONA EN LA QUE DEBEN LOCALIZARSE LAS GRANULOMETRIAS DE LOS MATERIALES PETREOS PARA CONCRETOS ASFALTICOS.

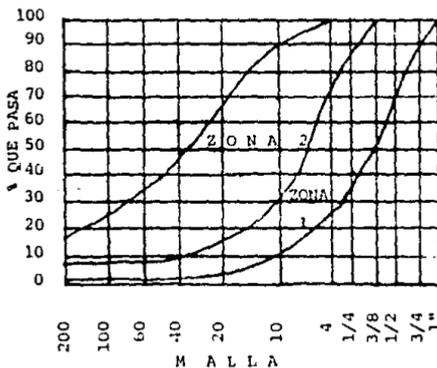


FIG. Núm.2.9.-ZONA EN LA QUE DEBEN LOCALIZARSE LAS GRANULOMETRIAS DE LOS MATERIALES PETREOS PARA MEZCLAS EN EL LUGAR.

## PRUEBA MARSHALL

### TENDENCIAS Y RELACIONES DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYES.

Se ha encontrado que las curvas que representan las propiedades de los aglomerados asfálticos de granulometría cerrada son siempre bastante semejantes unas a otras. Las características que se estudian normalmente son las siguientes:

a) La estabilidad crece con el contenido de asfalto hasta un máximo, después de lo cual disminuye.

b) El flujo aumenta con contenidos de asfalto crecientes.

c) La curva correspondiente al peso unitario de la mezcla total es análoga a la curva de estabilidad, salvo que en general ( pero no siempre ) el contenido de asfalto correspondiente al peso unitario máximo es ligeramente superior al correspondiente a la estabilidad máxima.

d) El porcentaje de huecos en la mezcla total disminuye con contenidos crecientes de asfalto, aproximándose finalmente a un mínimo.

e) El porcentaje de huecos de los áridos rellenos de asfalto aumenta con contenidos crecientes de asfalto, aproximándose

finalmente a un máximo.

### DETERMINACION DEL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO

El contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica se determina a partir de los datos obtenidos. Para realizar esta determinación se tienen en cuenta cuatro de las curvas representadas en las gráficas anteriores. A partir de éstos se obtienen los contenidos de asfalto que corresponden a las propiedades siguientes:

- a) Máxima estabilidad.
- b) Máximo peso unitario.
- c) Valor medio de los límites.

Cualidades necesarias en las mezclas para pavimentación. Se determina si la mezcla asfáltica, cuyo contenido de asfalto es el determinado conforme acabamos de indicar, será o no satisfactoria para el uso propuesto, aplicando ciertos criterios límites de las propiedades de las mezclas con contenido óptimo de asfalto.

d) Valor medio de los límites dados, para el porcentaje de huecos de los áridos rellenos de asfalto. El contenido óptimo de asfalto de la mezcla es el valor medio de los obtenidos como se acaba de indicar.

El U.S. Army Corps of Engineers ha empleado en el proyecto de mezclas de pavimentación para pistas de aeropuertos los criterios siguientes:

### CRITERIOS

PROPIEDAD	TIPO DE MEZCLA	PRESTON DE INFLADO	PRESTON DE INFLADO
		100 lb/pulg <sup>2</sup> 7 kg/cm <sup>2</sup>	200 lb/pulg <sup>2</sup> 14 kg/cm <sup>2</sup>
Estabilidad	Todos *	Mín. 50 lb.	Mín. 1000 lb.
Peso unitario	-----	No se usa	No se usa
Fluencia	Todos *	Máximo 20	Máximo 16
Huecos, Mezcla	Horm. Asf.	3-5	3-5
Total, %	mezclas arena	5-7	6-8
Huecos Iridos	Horm. Asf.	75-85	75-82
Rellenos Asf. % Mezclas arena		65-75	65-72

NOTA: Los criterios arriba indicados para presión de inflado de 100 lb/pulg<sup>2</sup>, se emplean frecuentemente en el proyecto de pavimentos de carretera, pero están sujetos a modificación cuando una experiencia satisfactoria indica la necesidad de tal cambio.

\* Hormigón asfáltico, mezclas con arena.

CARACTERISTICAS	USO DE LA MEZCLA ASFALTICA ELABORADA EN PLANTA CON CEMENTO ASFALTICO	PARA CARRETERAS CON TRAN- SITO DIARIO EN AMBOS SENTIDOS	
		HASTA 2000 VE- HICULOS PESADOS ( a )	MAS DE 2,000 VEHICULOS PE- SADOS (a)
NUMERO DE GOLPES POR CARA . . . . .	. . . . .	50	75
ESTABILIDAD Mín. Kg. . . . .	PARA CARPETAS, CAPAS DE RE NIVELACION, BASES ASFALTI- CAS Y BACHEO . . . . .	450	700
FLUJO, EN mm	PARA CARPETAS, CAPAS DE RE NIVELACION, BASES ASFALTI- CAS Y BACHEO . . . . .	2 - 4.5	2 - 4
PORCENTAJE DE VACIOS EN LA MEZCLA RESPEC- TIVA AL VOLU- MEN DEL ESPECI- MEN	PARA CARPETAS Y MEZCLAS DE RENIVELACION . . . . .	3 - 5	3 - 5
	PARA BASES ASFALTICAS . . . . .	3 - 8	3 - 8
% DE VACIOS EN EL AGREGADO MI- NERAL	PARA CARPETAS 4.76mm-Num 4	18	18
	CAPAS DE RENIVELACION 6.35- (1/4)" . . . . .	17	17
	BASES ASFALTICAS 9.51mm-3/8"	16	16
	12.7 mm - 1/2" . . . . .	15	15
	19.0 mm - 3/4" . . . . .	14	14
	25.4 mm - 1" . . . . .	13	13

( a ) Se consideran como vehículos pesados los camiones en todos sus tipos y los autobuses.

Fig. Núm. 2.10.- Especificaciones que deben cumplir los concretos  
asfálticos de acuerdo con el método MARSHALL.

MEZCLAS ASFALTICAS PARA CARPETAS  
NORMAS DE CALIDAD PARA MATERIALES PETREOS

CARACTERISTICA	INSTITUCION					
	SAHOP (92-03.1)		DPM CALIF. (39)		INST. ASF. ASTM D 692	
		CA	A	B	BA	CA
Contracción lineal (%)	2-3 M	2 M	-	-	--	--
Equivalente de Arena (%)	55 m	55 m	50 m	45 m	--	--
Desgaste "Los Angeles" (%)	40 M	40 M	45 M	50 M	50 M	40 M
Partículas Trituradas (%)	--	--	90-70 m	25-20 m	40 m	40 m
Indice de Lajeo (%)	35 M	35 M	--	--	--	--
Intemperismo acelerado (%)	--	--	--	--	12 M	12 M
Absorción en pba. de CKE (%)	--	--			--	--
Afinidad con asfalto (%)	25 M	25 M	--	--	--	--

Fig. Núm. 2.11.-Especificaciones para materiales pétreos para mezclas de carpetas asfálticas.

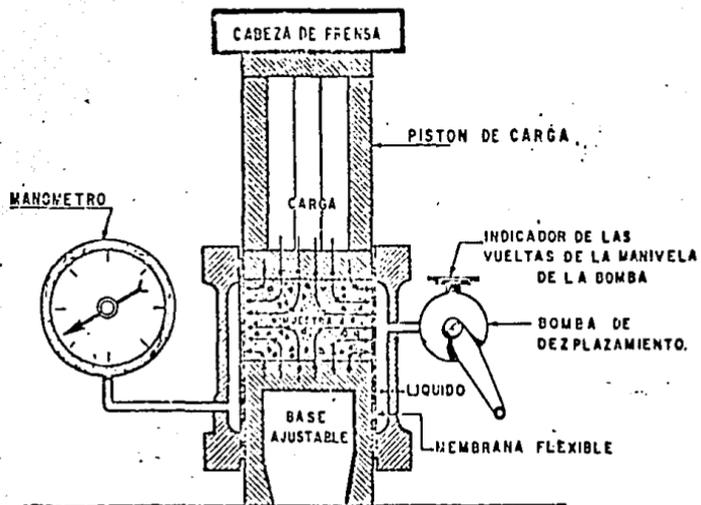


Fig. Núm. 2.12.-ESTABILOMETRO

**CAPITULO III****EL AZUFRE EN LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS**

## EL AZUFRE COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION

### DESARROLLO HISTORICO

El empleo del azufre como material de construcción se conoció desde la edad media, como fué el caso de la fijación de elementos metálicos en roca, las primeras investigaciones de carácter científico corresponden a principios de este siglo. En una patente registrada en 1900 en E.U.A., Mackay, describió un compuesto de azufre adecuado a techumbres, tuberías, pavimentos y recubrimientos. En 1919, Mock obtuvo una patente sobre una forma celular de azufre para usarse como aislante térmico. Un poco después en Quebec, se empleó un mortero de azufre como compuesto sellador de juntas en un canal de desagüe de ácido.

En 1924, Kobbe, describió un proceso para mejorar las características físicas de concreto, madera, cerámica y materiales fibrosos por inmersión en azufre y coque para concretos y morteros resistentes al ataque de ácidos. En 1939, Dwecker, inició estudios acerca de nuevos morteros a base de azufre para aplicaciones en tuberías, tanques y pisos resistentes al efecto químico, así como de compuestos de asfalto-azufre para carreteras. Fué también el primero en utilizar aditivos para plastificar azufre y de esta manera mejorar sus propiedades físicas.

En la actualidad, el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. desarrolla investigaciones con éste material aplicado a la construcción.

## AZUFRE

El azufre es uno de los elementos más abundantes de los que dispone el hombre; representa el 0.1 % de la corteza terrestre. Se encuentra frecuentemente como azufre natural sobre domos de sal, depósitos volcánicos y mezclado con calcita, yeso y anhídros, o como sulfitos en minerales metálicos, sulfatos en minerales, sulfito hidrogenado y polisulfito hidrogenado en gas natural y como compuestos de azufre orgánico en el petróleo, arenas de alquitrán y hulla.

Comercialmente se obtiene de las siguientes fuentes:

- 1.- Azufre, de depósitos naturales, obtenido mediante el proceso de flotación.
- 2.- Azufre recuperado del gas natural.
- 3.- Azufre obtenido de peritas y minerales naturales.
- 4.- Azufre recuperado con los procesos para el abatimiento de la contaminación ambiental; las principales fuentes de contaminación son gases de fundición y los que provienen de la refinación de crudos del petróleo.

Se estima que el hombre envía a la atmósfera aproximadamente 80 millones de toneladas de azufre por año y a medida que se incrementa la recuperación, gracias a los programas de abatimiento de contaminación del medio ambiente, la disponibilidad de azufre se incrementará cada día.

De los 30 millones de toneladas consumidas en 1970, solamente 9 % se empleó realmente en forma elemental ( 6 % en la industria del hule, agricultura, etc. y 3 % en la obtención de disulfito de carbono para la industria del rayón y del celofán); el resto se utilizó en forma de dióxido de azufre, destinado principalmente a la fabricación de ácido sulfúrico, el cual consumió 86 % de todo el azufre. Cerca del 50 % del ácido sulfúrico se empleó en la fabricación de fertilizantes.

#### VENTAJAS Y LIMITACIONES

Entre las principales ventajas del azufre como material de construcción se pueden señalar:

- 1) Es abundante y relativamente barato tanto en México como en otros países en vías de desarrollo. Refinerías de petróleo y de gas generan azufre como subproducto y en grandes cantidades.
- 2) El azufre y sus compuestos tienen características físicas que se prestan para la construcción:

a) No tiene olor ni sabor y no causa daños cuando esta en contacto con la piel ( en estado normal y/o temperatura ambiente).

b) Se adhiere a una gran variedad de materiales.

c) Es impermeable y no poroso.

d) Es buen aislante térmico y eléctrico.

e) Los concretos y morteros de azufre tienen poca resistencia a la compresión comparable a la del concreto de cemento portland y admiten refuerzo con fibras que aumentan su resistencia a la tensión, flexión e impacto.

3) Las técnicas para fundir, mezclar, vaciar y colocar el azufre son sencillas. ( en la construcción de la vivienda )

4) Los materiales de construcción a base de azufre se pueden producir con poca inversión de equipo.

5) El período de solidificación es muy corto y el producto puede utilizarse casi inmediatamente.

6) Los concretos y morteros de azufre pueden moldearse en múltiples formas con acabados tersos de alta precisión, mediante moldes hechos de diversos materiales.

7) Los productos de azufre requieren poco mantenimiento.

8) El consumo de energía para fundir el azufre es relativamente bajo ( 30 cal/gr ).

9) No hay consumo de agua en el procedimiento de fabricación, lo cual en zonas áridas es una característica deseable.

### LIMITACIONES

El mayor obstáculo que tiene el azufre para su aceptación como material de construcción son su poca resistencia al fuego y la generación de gases tóxicos cuando se quema.

Sin embargo, el problema se ha resuelto con la incorporación de aditivos, los cuales retardan el inicio de la combustión y hacen autoextinguible el producto.

Otro inconveniente es la necesidad de trabajar con mezclas a temperaturas relativamente elevadas, lo cual hace necesario un equipo de protección. Además, si se emplean aditivos que producen gases o vapores tóxicos, aumenta el riesgo en la fabricación de este material, por lo cual se deben tomar precauciones que eviten una intoxicación durante el mezclado del mismo.

La rapidez con que pasa el azufre del estado líquido al estado sólido puede llegar a ser limitante de su empleo, ya que no es posible lograr acabados aceptables en superficies grandes. Sin embargo, como se señaló, el colado contra molde puede ser tan terso como se quiera.

## PAVIMENTACION A BASE DE AZUFRE-ASFALTO

Uno de los campos de aplicación de azufre donde más esfuerzos y recursos se han invertido, es el relativo a la pavimentación de carreteras. De 1975 a la fecha se han realizado pruebas a escala real en carreteras de Canada, Europa, Medio Oriente, E.U.A. y en México. En un tramo de la carretera Coatzacoalcos-Villahermosa ( más adelante se entrará en detalle ).

El éxito potencial de esta investigación depende de los siguientes factores:

- a) Disponibilidad de grandes reservas de azufre.
- b) Crecimiento del costo de los derivados del petróleo.
- c) Mejores propiedades físicas-mecánicas que la de los asfaltos.
- d) Posibilidad de empleo de materiales de baja calidad y costo, como algunos desechos industriales no apropiados para el asfalto tradicional.

En las mezclas empleadas para la pavimentación, el azufre puede sustituir entre 30 y 50 % el peso del asfalto requerido usualmente, pues es dos veces más pesado que el asfalto, además de que los compuestos AZUFRE-ASFALTO tienen mayores densidades que los materiales empleados en la pavimentación tradicional y de otras propiedades mejoradas, entre las que se pueden mencionar:

- a) Mayor resistencia; según método Marshall.
- b) Posibilidad de empleo de materiales de menor calidad o de espesor reducido.
- c) Aumento de la rigidez a altas temperaturas, sin la pérdida correspondientes a bajas temperaturas. Esto permite el uso de asfaltos más dúctiles para minimizar grietas a bajas temperaturas sin los peligros de las deformaciones a altas temperaturas.
- d) La viscosidad de las mezclas AZUFRE-ASFALTO es más baja que la del asfalto solo, por lo que se puede mezclar a temperaturas más bajas con el consiguiente ahorro de energía.
- e) Mayor resistencia al ataque de la gasolina, diesel y otros solventes.
- f) Mejor comportamiento bajo esfuerzos de fatiga.

En cuanto al equipo y tecnología, básicamente son las mismas que se utilizan en la pavimentación tradicional con asfalto.

Existe un proceso patentado THERMOPAVE que utiliza una mezcla con una proporción, en peso de 81 % de arena 13 % de azufre y 6 % de asfalto. Al agregado, calentado entre los 135-150 °C en la mezcladora, se adiciona el asfalto después de mezclar durante 30 segundos se

agrega el azufre dando como resultado una materia de pavimentación de alta resistencia.

Esta tecnología sí requiere de equipo especializado, como son camiones con sistema de calentamiento para el transporte del material, equipo de pavimentación modificada para manejar mezclas más fluidas, etc.

#### **CAPITULO IV**

#### **APLICACION DEL AZUFRE EN LA CARRETERA CARDENAS-VILLAHERMOSA TAB.**

**APLICACION DEL AZUFRE EN EL TRAMO CARDENAS-VILLAHERMOSA, TABASCO.**

En la carretera CARDENAS-VILLAHERMOSA del estado de Tabasco, que se localiza en la región sureste de la República Mexicana, se construyeron 47 km. de pavimento, utilizando para la capa de base, como ligantes, azufre y cemento asfáltico, a fin de estabilizar una arena fina mal graduada. En México, el costo de este tipo de trabajos no es precisamente bajo, pero en este caso quedó ampliamente justificado, porque la escasez de materiales granulares en la zona de la obra, obligaba para contar con ellos, a efectuar acarreos superiores a los 100 km. lo que significaba una erogación elevada de recursos.

Los trabajos de referencia, difieren de la mayor parte de las experiencias tenidas en otros países, sobre la utilización del azufre en mezclas hechas con asfalto para la construcción de pavimentos, pues en tales casos generalmente se ha utilizado el azufre en proporciones bajas, unas veces con la finalidad de sustituir parcialmente el asfalto de las mezclas, porque en esos lugares el azufre tiene un costo menor que el asfalto, y en otras ocasiones tratando de evitar la formación de roderas; por otra parte, los materiales pétreos normalmente han sido de tipo granular y en este caso se ha utilizado arena fina mal graduada, la cual involucra otro tipo de problemas, como el de su compactación.

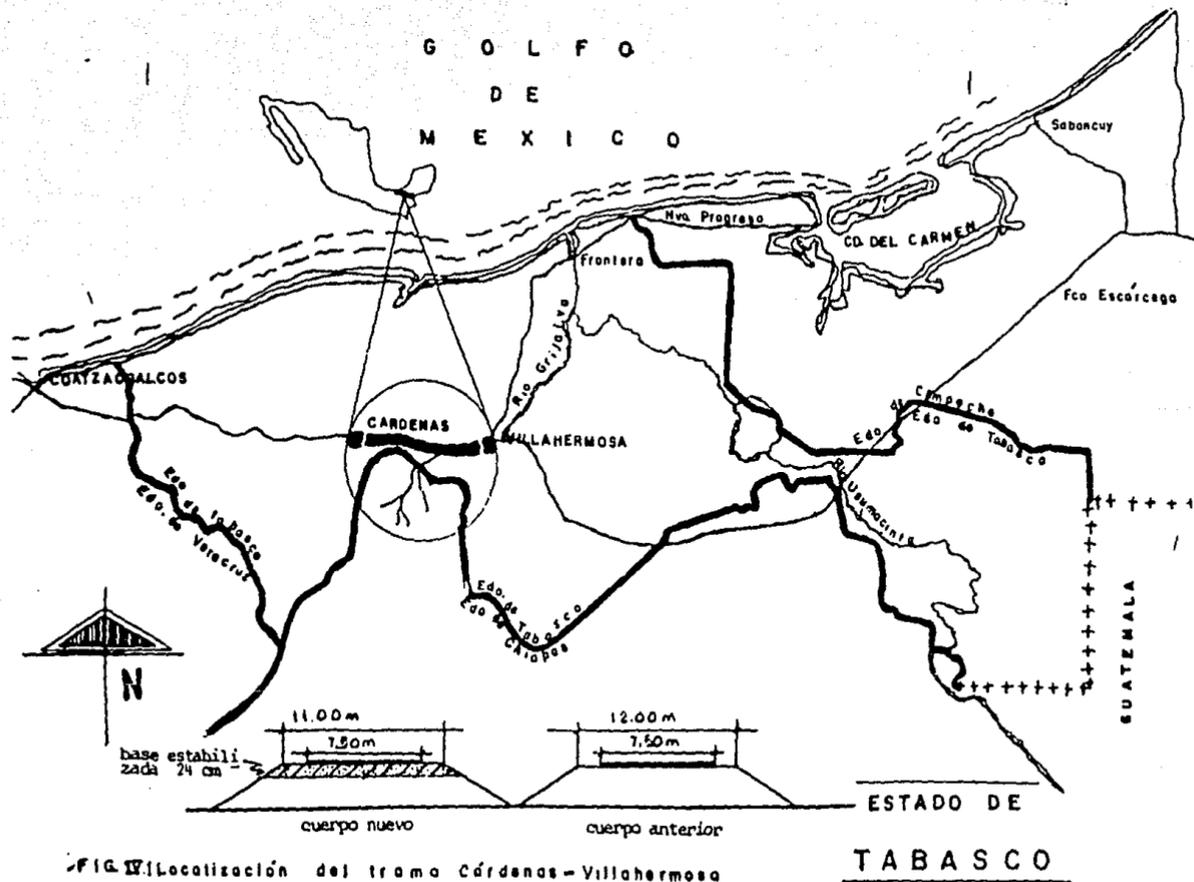


FIG. 17. Localización del tramo Cárdenas-Villahermosa

## PRINCIPALES FACTORES REGIONALES

**ANTECEDENTES:** Debido al alto impulso de la industria petrolera en toda ésta zona; se ha generado la circulación de gran cantidad de vehículos en su mayoría pesados, siendo insuficiente la carretera de dos carriles que se tenía, por lo cual el gobierno federal por medio de la S.C.T. (CARRETERAS FEDERALES), optó por la ampliación a cuatro carriles de ésta carretera.

**CLIMA:** El clima que predomina en la región es cálido, con una temperatura media anual de 26°C, por su grado de humedad es húmedo y con una precipitación media anual de 2000 mm con lluvias durante casi todo el año.

**GEOMORFOLOGÍA:** Llanura costera del Golfo, con una morfología de terreno plano en un 100 % ; el tipo de drenaje que predomina en el Área es escaso y mal definido.

**GEOLOGÍA:** La zona se encuentra constituida por suelo residual representado por arenas arcillosas, arenas limosas y arcillas de media plasticidad, sobreyaciendoles una capa de suelo vegetal con espesor variable de 0.20 a 0.60 m.

**BANCOS DE MATERIALES:** En esta zona son escasos en calidad y

volumen para satisfacer las necesidades en la construcción de la ampliación en estudio.

Para la terminación del cuerpo del terraplén y capa de transición se propuso no efectuar préstamos laterales, ya que las excavaciones que se requerían se podían llenar de agua debido a que es una zona plana inundable, siendo trampas tanto para el ganado, la gente y para los vehículos que ocasionalmente se salgan de la carretera, por lo que se recomendó construirlos con materiales procedentes de préstamos de bancos alejados del derecho de vía.

Para la subrasante, se hicieron las mismas sugerencias antes mencionadas y a continuación se indica la ubicación de los bancos, adecuados para las diferentes capas que integran las terracerías. km 37+500 y 45+100 con origen en Coatzacoalcos Veracruz, clasificación: arena arcillosa color rojizo.

Para el pavimento.- Cerca de esta zona no se cuenta con material pétreo por lo que únicamente se enlistan bancos de materiales finos que podrán utilizarse como cementantes.

## APLICACION DEL AZUFRE

El azufre se utilizó, junto con cemento asfáltico y arena para la estabilización de la capa de base y en algunos tramos menores en carpeta. La estabilización que se menciona se aplicó a 47 km. aproximadamente.

Como anteriormente se mencionó que, ésta base debió haber cumplido condiciones técnicas medidas con prueba Marshall semejantes a las del concreto asfáltico, habiéndose involucrado también ensayos de pérdida de estabilidad por inmersión en agua para evitar algún problema al respecto. El espesor de la base estabilizada se determinó utilizando un modelo matemático que permite calcular los esfuerzos de tensión máximos en sistemas multicapa para lo cual se requería conocer los respectivos módulos de elasticidad de las capas del pavimento y de las terracerías. Dichos estudios los realizaron el Instituto de Ingeniería y la S.C.T.

La proporción en peso de los materiales se determinó por medio de ensayos en el laboratorio: habiéndose definido lo siguiente: 10 % de azufre líquido y 6 % de cemento asfáltico No.6 con arena fina de río extraída con draga; se utilizaron plantas fijas de mezclado de concreto asfáltico adaptadas convenientemente, habiéndose obtenido en la compactación pesos específicos relativamente bajos.

### PROPORCIONES DE LA MEZCLA ARENA-AZUFRE-CEMENTO ASFALTICO

En los estudios realizados para definir las proporciones de los materiales que integrarían la mezcla de arena con los ligantes, se utilizó la prueba Marshall, habiéndose procedido a determinar como punto de partida, las características de la mezcla sin azufre; es decir, de las combinaciones que solo incluían arena y cemento asfáltico, habiéndose obtenido los siguientes resultados en la mezcla de características óptimas:

contenido de asfalto.....5.5 %  
 estabilidad .....86 kg  
 flujo .....1.6 %  
 vacíos .....19 %  
 peso específico máximo .....1870 kg/m<sup>3</sup>

Como puede apreciarse, la mezcla arena-cemento asfáltico acusa una estabilidad muy baja, no pudiéndose esperar de ella un comportamiento adecuado, si se le hubiese utilizado en la formación de una capa de base.

Al usarse cemento hidráulico en exceso se tiene el riesgo de agrietamiento, más aun cuando se aplica en climas cálidos.

Al decidirse la inclusión del azufre, el objetivo correspondiente fue el de obtener un material con propiedades mecánicas, lo más parecidas que fuera posible a las de un concreto

asfáltico, con 750 kg. de estabilidad, como mínimo y flujo de 2 a 4 mm., en la prueba de proyecto.

Como el manejo del azufre implicó precauciones especiales en la realización de los estudios, una vez que se adiestró al personal para efectuarlos, se hicieron pruebas de reproducibilidad con un mismo laboratorista, para lo cual se elaboraron mezclas con proporciones estándar de los diferentes materiales, habiéndose encontrado discrepancias del orden del 5 % , respecto a los valores de proyecto, tanto para la estabilidad como para el flujo.

Los estudios con prueba Marshall realizados para definir las proporciones de azufre y cemento asfáltico consistieron en conocer «el comportamiento de cada uno de los ligantes.

En primer término comentaremos los resultados obtenidos en mezclas elaboradas con 3.5, 4.5, 5.5, 6.5 y 7.5 % de cemento asfáltico, en cuyas gráficas puede apreciarse que al aumentar el contenido de azufre desde 2 hasta 12 %, para cada porcentaje de cemento asfáltico, la estabilidad resultó cada vez mayor y el flujo respectivo permaneció entre 1.5 y 2.1 mm.

En el otro estudio realizado, que corresponde a mezclas elaboradas con 8, 10, 12 y 15 % de azufre, variando para cada una de esas proporciones el contenido de cemento asfáltico, desde 2 % hasta 10 % , de acuerdo con los resultados obtenidos, (como se observa en las gráficas de la fig.No.4.3 ), a mayor contenido de

cemento asfáltico se disminuye la estabilidad y el flujo permanece con valor de 1.2 a 2.75 mm.

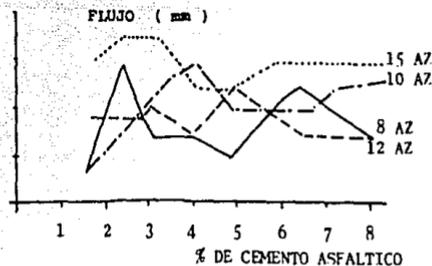
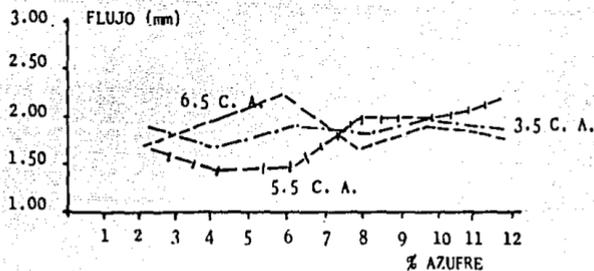
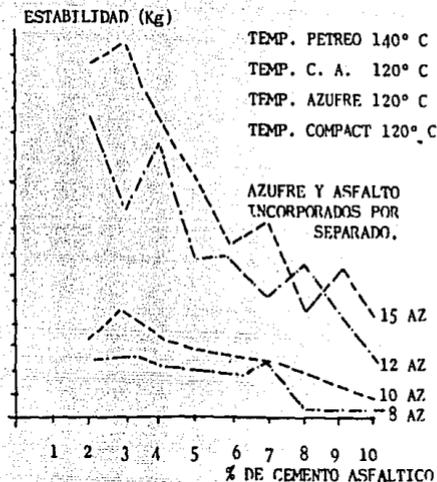
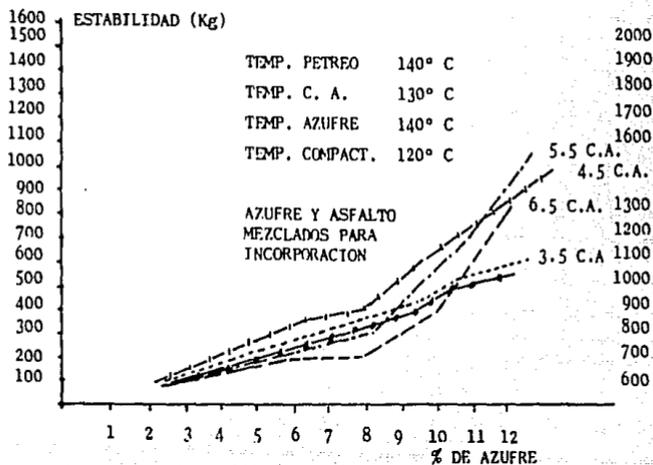
Con los resultados anteriores fue posible deducir que en los niveles de aplicación requeridos por la arena, el azufre aumenta la estabilidad y el cemento asfáltico la baja, y por otra parte, que las variaciones del flujo son mínimas, permaneciendo éste con valores bajos que hacían suponer cierta rigidez.

Los estudios anteriores permitieron definir como proporciones adecuadas para la mezcla, 10 % de azufre y 6 % de cemento asfáltico, con relación al peso de la arena, habiendo comprobado que esta mezcla, en varias muestras preparadas en el laboratorio, acusó estabilidad entre 756 y 914 kg. y flujo de 1.25 a 1.75 mm. (ver gráfica No. 4.4 )

Para asegurar que la mezcla no fuera susceptible al agua, se procedió a realizar pruebas de pérdida de estabilidad por inmersión en agua, obteniéndose los siguientes resultados:

cemento asfáltico	azufre	pérdida de estabilidad
4 %	10 %	33 %
5 %	10 %	27 %
6 %	10 %	18 %

De acuerdo con los resultados anteriores, el 6 % de cemento asfáltico es una cantidad que asegura suficiente protección a la mezcla, en cuanto a la susceptibilidad que pudiera tener al agua.



FIGS. 4.2.- GRAFICA DE VARIACION DE ESTABILIDAD Y FLUJO AL AUMENTO EL AZUFRE EN MEZCLAS CON CANTIDADES DEFINIDAS DE C. A.

FIGS. 4.3. GRAFICAS DE VARIACION DE ESTABILIDAD Y FLUJO AL AUMENTAR EL C. A. EN MEZCLAS CON CANTIDADES DEFINIDAS DE AZUFRE.

AZ = AZUFRE

C. A. = CEMENTO ASFALTICO

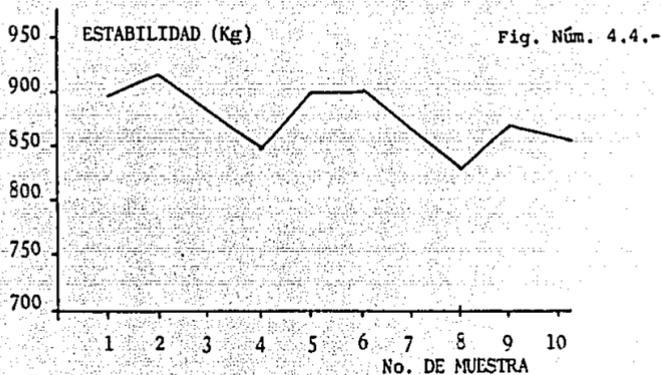
## CAPA SUB-BASE ASFALTICA ( ARENA - CEMENTO ASF. No. 6 Y 10 % AZUFRE )

ESPEC. NUM.	PESO VOL. <sup>3</sup> KG/M	% VACIOS	% V.A.M.	% C.A.	ESTABILIDAD KGS.	FLUJO MM.	TEMP. °C.	FECHA
2110	11.6	23.2	6.0	1149	3.50	168	VII-22-83	
2090	12.4	23.9	6.0	775	2.25	170	VII-22-83	
2120	11.2	22.8	6.0	1047	1.50	160	VII-22-83	
2080	12.8	24.2	6.0	636	1.50	170	VII-22-83	
2110	11.6	23.2	6.0	362	1.50	120	VII-22-83	
2130	10.7	22.4	6.0	1210	3.00	160	VII-22-83	
2120	11.2	22.8	6.0	895	1.75	160	VII-22-83	
2020	15.3	26.4	6.0	371	1.50	150	VII-22-83	
2040	14.6	25.8	6.0	742	2.00	132	VII-26-83	
2150	10.0	21.8	6.0	887	1.75	121	VII-26-83	
2090	12.5	23.9	6.0	1246	1.75	135	VII-26-83	
1940	18.8	29.4	6.0	444	2.50	130	VII-26-83	
2015	15.5	26.6	6.0	486	2.75	123	VII-26-83	
2080	12.9	24.3	6.0	1435	1.75	135	VII-27-83	
2010	15.8	26.8	6.0	678	2.00	135	VII-27-83	
2005	16.0	27.0	6.0	620	1.50	135	VII-27-83	
2040	14.5	25.7	6.0	539	1.75	135	VII-27-83	
2005	16.0	27.0	6.0	349	1.50	135	VII-27-83	
1940	18.7	29.4	6.0	460	2.00	125	VII-27-83	
2025	15.2	26.3	6.0	508	2.00	135	VII-27-83	
2005	16.0	27.0	6.0	1158	1.75	135	VII-27-83	
1965	17.7	28.5	6.0	744	1.75	130	VII-27-83	
2046	13.5	26.6	7.1	473	1.75	137	VII-23-83	
2064	12.4	25.6	7.1	407	1.75	132	VII-23-83	

## CAPA SUB-BASE ASFALTICA ( ARENA - CEMENTO ASF. No. 6 Y 10 % AZUFRE )

ESPEC. NUM.	PESO VOL. <sup>3</sup> KG/M	% VACIOS	% V.A.M.	% C.A.	ESTABILIDAD KGS.	FLUJO MM.	TEMP. °C.	FECHA
ARENA - CEMENTO ASFALTICO No. 6 Y 15 % AZUFRE ( PANAMERICANO )								
2050	14.5	25.6	6.0	433	1.75	135	VII-28-83	
1988	16.9	27.7	6.0	254	1.25	140	VII-28-83	
2019	15.6	26.5	6.0	563	1.50	160	VII-29-83	
2053	14.2	25.3	6.0	1156	1.50	140	VII-29-83	
2073	13.4	24.6	6.0	808	1.25	140	VII-29-83	
1971	18.2	28.1	5.5	319	2.00	150	VII-29-83	
1905	20.6	30.1	5.5	102	1.00	120	VII-29-83	

OBSERVACIONES: DE ACUERDO CON LOS VALORES DE ESTABILIDAD, SE APRECIO QUE CON EL 6 % EN PESO DE CEMENTO ASFALTICO, 10 % DE AZUFRE Y TEMPERATURA MINIMA DE 135° C., RESULTARON MAS ALTAS Y UN 40 % CUMPLE CON LOS 700 KGS. MIN. ESPECIFICADO PARA LA CITADA ESTABILIDAD.



GRAFICA DE ESTABILIDAD Y FLUJO DE  
10 MUESTRAS PREPARADAS CON LA  
PROPORCION: 6% DE C. A. Y 10% DE  
AZUFRE.

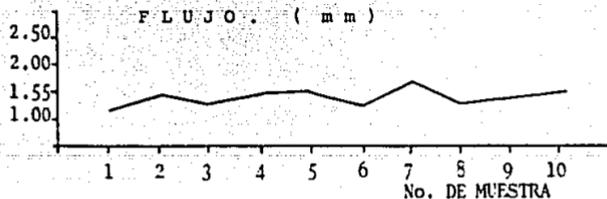


Fig. Núm. 4.5.- REPRODUCTIBILIDAD DE LA MEZCLA CON 6% DE C. A.  
Y 10% DE AZUFRE.

## SECRETARIA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS Y OBRAS PUBLICAS

DEPENDENCIA F CC. GRAL. DE CARRTS. FILLIS.

CENTRO SAHOP S.C.T. "TABASCO"

 UNIDAD DE LABORATORIOS

RESIDENCIA EN VILLAHERMOSA, TAB.

Fig. Núm. 4.6.- PRUEBA DE COMPRESION SIN CONFINAR Y PERDIDA DE ESTABILIDAD

MUESTRA NUM.		DATOS DE LA MUESTRA					FECHA DE		CARGAS DE RUPTURA DE LAS MUESTRAS kg		RESISTENCIAS DE LAS MUESTRAS kg/cm <sup>2</sup>		PERDIDA DE ESTABILIDAD %
PESO DE ASFALTO EN LA MEZCLA %		PESO g	ALTURA cm	DIAMETRO cm	RELACION ALTURA DIAMETRO	AREA DE CARGA cm <sup>2</sup>	INMERSION	RUPTURA	SIN SATURAR	SATURADAS	SIN SATURAR	SATURADAS	
13	2.5	1830	12.5	10.1	1.26	80.6	MAYO-26	MAYO-31	110		1.4		14.3
14	"	1830	"	"	"	"	"	"		96		1.2	
15	3.5	1820	12.5	10.1	1.26	"	MAYO-26	"	122		1.5		13.4
16	"	1800	12.6	"	1.27	"	"	"		104		1.3	
17	4.5	1840	12.5	10.1	1.26	"	MAYO-26	"	177		2.2		9.1
18	"	1860	12.6	"	1.27	"	"	"		160		2.0	
19	5.5	1810	12.5	10.1	1.26	"	MAYO-26	"	317		3.9		7.7
20	"	1800	"	"	"	"	"	"		288		3.6	
21	6.5	1820	12.5	10.1	1.26	"	MAYO-26	"	250		3.1		6.5
22	"	1830	12.6	"	1.27	"	"	"		232		2.9	
23	7.5	1850	12.6	10.1	1.27	"	MAYO-26	"	305		3.8		5.3
24	"	1860	12.5	"	1.26	"	"	"		288		3.6	
OBSERVACIONES: Los valores de pérdida de estabilidad obtenidos, están dentro de especificaciones (2% máximo).													



Dependencia \_\_\_\_\_

- 64. -

CENTRO SCT \_\_\_\_\_

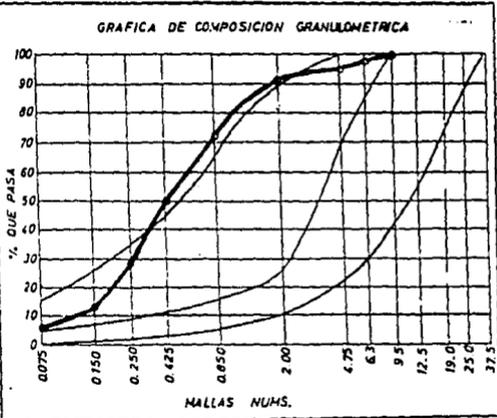
 Unidad de Laboratorios  
Residencia \_\_\_\_\_**INFORME DE ENSAYE DE CONCRETO ASFALTICO**

OBRA	CARRETERA: COATZACOLCOS-VILLAHERMOSA	ENSAYE No. 1025 - 3025 A
LOCALIZACION	TRAMO: CARDENAS - VILLAHERMOSA	FECHA DE RECIBO 21-28-VII-83
	(CUIDADO: EN ESTE TRAMO, HAY UN GRAN ORIGEN DEL CADENAMIENTO, ETC.)	FECHA DE INF. 30-VII-83
	SUB-TRAMO: KM. 132+360 - VILLAHERMOSA	

DATOS DEL MUESTREO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	ARENA DE RIO CON AZUFRE	PARA USARSE EN BASE ASFALTICA
	TREATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO	SECADO Y MEZCLADO 10% AZUFRE EN FRIO ( PANAM. )	
	CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO	ALMACEN	
	UBICACION DEL BANCO DE DONDE PROCEDE EL MATERIAL PETREO	KM. 132+170 DESV. DER. 3500 M.	

VIAJE No.	TENDIDO EN Lm	A Lm	CARRIL	FRANJA
TEMP. DE LA MEZCLA AL SALIR DE LA PLANTA		°C. EN EL TENDIDO		°C. AL INICIAR LA COMPACT.

P.E. SECADO $g/m^3$	MALLAS		% QUE PASA DEL PROYECTO	
	4.75	25.0		
"	19.0			
"	12.5			
"	7.5	100	100	100
"	4.75	98	98	98
"	4.75	97	97	97
"	3.00	91	91	91
"	2.00	73	71	71
"	0.425	50	45	45
"	0.250	29	23	23
"	0.150	12	9	9
"	0.075	3	5	5
P.E. Original		1430	1410	
ADSORCION %				
DESGASTE %				
% DE TRITURACION				
PART. ALARZADAS %				
PART. LAMINADAS %				
ACUV. DE ARENA % 63.4				
% DE TRITURACION EN SAL 9.0				



CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA	DEL PROYECTO	CARACTERISTICAS DEL ESPECIMEN		ESPECIFICACION	CARACTERISTICAS DEL ASFALTO	
		CONTENIDO ASFALTO %			P.E. $g/m^3$	
MARCA		ESTABILIDAD %		PERMEACION		
TIPO		FLUJO $g/m^2$		VISCOSIDAD		
CANTIDAD %		VACIOS %		TEMP. RECOM.		
ACTIVIDAD		V.A.M. %		TEMP. DE APLIC.		

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Fig. Núm. 4.7.- Composición Granulométrica del material pétreo.

EL LABORATORISTA	EL JEFE DEL LABORATORIO	Fe. Lib.
------------------	-------------------------	----------

## DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Esta carretera funcionaba con dos carriles de circulación en los que se obtuvo un aforo de 14,000 vehículos diarios en promedio. Para la construcción del pavimento del cuerpo nuevo, el cual se desplantó sobre terreno arcilloso y pantanoso, se consideró una vida de servicio de 10 años, con un incremento anual de 5 % , y un 40 % de vehículos pesados. El número de ejes equivalentes acumulados correspondientes a dicho tránsito, resultó de 33'075,000.

Para la determinación de los espesores en el modelo matemático de Jones and Peattie, se utilizaron los siguientes datos:

Carga con radio de 15.0 cm constituida por un eje de 10 ton. y dos llantas gemelas colocadas a 32.0 cm de centro a centro, teniendo presión de inflado de 6.0 kg/cm<sup>2</sup>.

Los resultados obtenidos con el modelo matemático mencionado, fueron los siguientes:

-Esfuerzo tangencial de tensión ..... 1.01 kg/cm<sup>2</sup>

-Deformación unitaria tangencial

de tensión ..... 260 x 10<sup>-6</sup>

-Esfuerzo vertical de compresión

sin confinar ..... -4.0 kg/cm<sup>2</sup>

-Esfuerzo vertical de compresión  
 en la terracería ..... -0.15 kg/cm<sup>2</sup>

El valor del esfuerzo tangencial de tensión corresponde a  $40 \times 10^6$  repeticiones de la carga, lo cual es suficiente para la vida de servicio establecida.

Puede observarse también que la deformación tangencial en la base y los esfuerzos verticales generados en ésta y en la terracería, están dentro de los valores que pueden ser resistidos por los respectivos materiales, por lo tanto se determinaron los siguientes espesores:

CAPA	ESPESOR	MODULO DINAMICO (Kg/cm <sup>2</sup> )
-CARPETA	7.5 Cm	12,000
-BASE ESTABILIZADA	24.0 Cm	5,000
-SUB-RASANTE		
ARENA-EMULSION	15.0 Cm	2,000
-SUB-RASANTE		
ARENA-LIMO	15.0 Cm	1,000
-TERRACERIAS		
ARCILLO LIMOSA	2.0 M	200

PROYECTO DE PAVIMENTO FLEXIBLE.

Utilizando el método de la Porter modificada ( Padrón ), para hacer una comparación de los espesores obtenidos con el método anterior, suponiendo una base estabilizada con cemento hidráulico, lo cual no fué posible por el alto costo que representaba, también considerando una vida útil de 10 y 20 años.

1.- Tránsito .

El tránsito promedio anual en 2 direcciones fué de 14,196 vehículos al año 1983, considerando un 60 % en el carril de diseño, resultó ;  
 $14,196 \times 0.60 = 8,518$  vehículos .

2.- Composición del tránsito ;

Tipos ; A = 36 %	Factor de daño ; A = 0.06
B = 4 %	B = 2.10
C = 60 %	C = 2.10

3.- Tránsito acumulado en ejes sencillos de 8.2 Ton.

$8,518 \times 0.36 \times 0.06 =$	184
$8,518 \times 0.04 \times 2.10 =$	716
$8,518 \times 0.60 \times 2.10 =$	<u>10,733</u>
suma	11,633

4.- Cálculo de los vehículos que pasarán en el carril de diseño durante la vida útil de la obra, en donde ; C = factor de proyecto de tránsito a futuro, n = años de vida útil de la obra y r = tasa de crecimiento anual ;

$$C = \frac{(1+r)^n - 1}{r} (365)$$

$$C = \frac{(1+0.05)^{20} - 1}{0.05} (365) = 12,065$$

Entonces el tránsito total equivalente durante la vida útil de la obra será ;

$$12,065 \times 11,633 = 140,352,145.00$$

5.- El VALOR RELATIVO DE SOPORTE (V.R.S.) obtenidos por el método de la Porter modificada, fueron los siguientes ;

- a) Para la capa de la sub-rasante se obtuvo el 15 %
- b) Para la capa del cuerpo del terraplén se obtuvo el 5 %

6.- Obtención de los espesores del pavimento.

Con los valores del tránsito total equivalente ( suma de ejes de - 8.2 Ton. ) y con los valores del V.R.S , se utiliza la gráfica de la fig. Num. 13-42 del libro " Estructuración de vías terrestres " del Editor ; Ing. Fernando Olivera Bustamante.

Para 140<sup>4</sup> 352,145.0 y un v.r.s. de 15 % se obtiene el espesor  $D1 = 83.0$  cm. y para el v.r.s. del 5 % se obtuvo el espesor  $D2 = 53.0$  cm.

- 7.- La diferencia entre  $D2 - D1 = 30.0$  cm , espesor correspondiente a la capa de la SUB-RASANTE.
- 8.- Por especificación si el Núm. de vehículos pesados sobrepasa los 3,000.0 , entonces se colocará una carpeta de concreto asfáltico , entre 7 y 10 cm.
- 9.- Para la capa de la BASE , también por especificación se colocará un espesor de 20 cm .
- 10.- En el cálculo de la SUB-BASE ,se tendrá lo siguiente;

Considerando los factores de conversión ;

Carpeta de concreto asfáltico = 2.0

Base estabilizada con cemento h = 1.8

Material natural = 1.0

De la fórmula  $D2 = a1d1+a2d2+a3d3$  , en donde;

$a1,a2,a3$  = factores equivalentes a la carpeta, base y sub-base.

$d1,d2,d3$  = espesores reales de carpeta,base y sub-base.

$D2$  = espesor de grava necesaria en el pavimento, obtenido de la gráfica de proyecto utilizando el v.r.s de proyecto de la capa sub-rasante.

$D2 = 7 \times 2 + 20 \times 1.8 + a3d3$  ; igualando y despejando ;

$53 = 50 + a3d3$  en donde  $a3d3 = 3.0$  cm de sub-base.

11.- Por lo tanto el espesor de la sub-base ( 3.0 cm ) se sumará al espesor de la capa de BASE, resultando dicho espesor de 23.0 cm

12.- En resúmen, se obtuvieron los siguientes espesores diseñados a 20 años;

CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO	7.0 cm
BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO H.	22.0 cm
SUB-BASE	0.0 cm
SUB-RASANTE	30.0 cm

Para 10 años , se obtuvo el siguiente resultado ;

CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO	7 cm
BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO H.	21 cm
SUB-BASE	0.0 cm
SUB-RASANTE	30.0 cm

Como se puede apreciar, los espesores varían muy poco para los años estudiados, lo que se puede decir que es por el alto tránsito pesado que circula por esa zona.

## CARACTERÍSTICAS REOLOGICAS DE LA MEZCLA ARENA-AZUFRE-CEMENTO ASFALTICO

El diseño del pavimento se llevó a cabo aplicando el modelo matemático de Jones and Peattie para capas semirígidas, que involucra esfuerzos de tensión máximos, con base a módulos de elasticidad de las capas y al espesor de las mismas.

Para conocer dichas características reológicas de la mezcla de arena, azufre y cemento asfáltico en las proporciones seleccionadas, el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., teniendo en cuenta la naturaleza termoelástica de los aglutinantes y por tanto, la gran influencia de la mezcla, tanto de la temperatura como de la rapidez de aplicación de las cargas, efectuó ensayos de fatiga a compresión y a tensión, y ensayos a escala natural de carga cíclica, en modelos multicapa contruidos en fosos de forma cúbica de 2 m. por lado; así se determinaron la resistencia a la tensión de la mezcla, su módulo dinámico y las deformaciones límite a tensión respectivas.

En las pruebas estáticas de tensión indirecta efectuadas con ensayos de compresión diametral, aplicando la carga con una velocidad de 5 cm/min , se obtuvieron los siguientes resultados:

MEZCLAS	TEMPERATURA DE PRUEBA	ESFUERZO DE TENSION
ARENA-AZUFRE-C.A.	30 °C	9.2 Kg/cm <sup>2</sup>
ARENA-AZUFRE-C.A.	60 °C	3.8 Kg/cm <sup>2</sup>
ARENA-CEMENTO ASFALTICO	30 °C	2.6 Kg/cm <sup>2</sup>
CONCRETO ASFALTICO	24 °C	11.9 Kg/cm <sup>2</sup>

Las pruebas de fatiga a compresión se efectuaron en probetas cilíndricas. El módulo dinámico /R / obtenido a 30 °C de temperatura, fue de 5130 Kg/cm<sup>2</sup>. Para esfuerzos de 1.0 a 1.25 Kg/cm<sup>2</sup>; otras determinaciones efectuadas a 24 °C y esfuerzo de 4.87 Kg/cm<sup>2</sup>, variando la frecuencia de aplicación se obtuvo entre 4753 a 6674 Kg/cm<sup>2</sup> en su módulo dinámico.

Las pruebas a escala natural bajo carga cíclica se realizaron con una frecuencia de aplicación de 0.42 Hz a 0.70 Hz., utilizando modelos de dos capas que representaban a las terracerías y a la base. En las terracerías se utilizó un limo clasificado como MH, con límite líquido de 69.9 %, índice plástico de 25.4 % y 6 a 7 % de C.B.R. determinado con prueba directa, en el material compactado a 85 % de su peso específico máximo proctor y humedad ligeramente superior a la óptima.

Antes de construir la base en los modelos, se hicieron pruebas estáticas sobre la terracería, con 10 repeticiones de carga, utilizando placa rígida de 30 cm de diámetro; obteniéndose:

CARGA	ESFUERZO VERTICAL ( $\psi$ )	DEFLEXION MAXIMA ( $W_0$ )	MODULO DINAMICO DE LA TERRACERIA ( $E_z$ )
800 Kg	1.13 Kg/cm <sup>2</sup>	0.12 cm	195 Kg/cm <sup>2</sup>
1650 Kg	2.33 Kg/cm <sup>2</sup>	0.28 cm	172 Kg/cm <sup>2</sup>
2550 Kg	3.62 Kg/cm <sup>2</sup>	0.535 cm	140 Kg/cm <sup>2</sup>

De acuerdo con los estudios experimentales antes mencionados y análisis teóricos realizados por el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., la base de pavimento constituida por arena, azufre y cemento asfáltico, en las proporciones seleccionadas, estando esta capa apoyada sobre unas terracerías con módulo dinámico de 300 Kg/cm<sup>2</sup>, y siendo sometida a esfuerzos menores de 1.13 kg/cm<sup>2</sup>, con frecuencia de medición de 0.07 Hz., tiene un módulo dinámico comprendido entre 3000 y 5000 Kg/cm<sup>2</sup>, siendo complementarios los siguientes datos:

PARA VALORES DE $E_1/E_2$	$\sigma_t$	$\epsilon_t$	$\sigma_z$
5000/300	4.32 Kg/cm <sup>2</sup>	608 x 10 <sup>-6</sup>	-0.69
3000/300	3.17 Kg/cm <sup>2</sup>	786 x 10 <sup>-6</sup>	-0.86

$E_1/E_2$  ... Relación de módulos de la base y terracerías.

$\sigma_t$  ... Esfuerzo de tensión en la parte interior de la base estabilizada.

$\epsilon_t$  ... Es la deformación unitaria tangencial por tensión, en la parte interior de la base estabilizada.

$\sigma_z$  ... Esfuerzo vertical de compresión en la terracería.

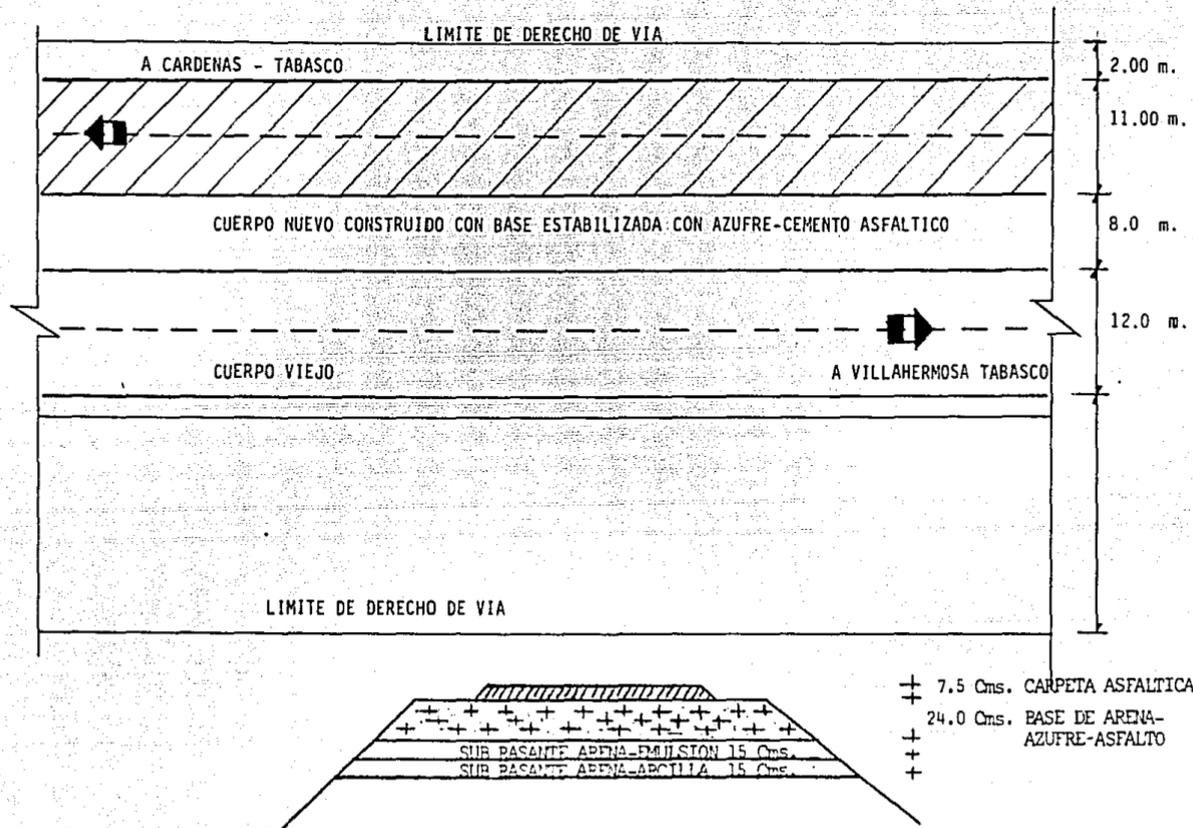


FIG. 4.8 PLANTA Y SECCION TRANSVERSAL DEL TRAMO

**PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCION****CARRETERA : COATZACOALCOS-VILLAHERMOSA****TRAMO : CARDENAS-KM 142+380**

Para realizar la pavimentación de este tramo, considerando la lejanía ( a más de 100 km ) de los bancos de piedra para obtener materiales pétreos para la construcción de un pavimento hidráulico, hubo necesidad de hacer una serie de estudios con arena de bancos más cercanos, mezclada con cemento asfáltico y azufre, hasta obtener una estabilidad MARSHALL de 700 kg mínimo en la citada mezcla, para su probable empleo en la pavimentación ya dicha.

En el mes de marzo de 1983, se comenzaron a fabricar mezclas proporcionales con los siguientes materiales:

Arena de río de composición granulométrica en límites de zona III y plasticidad nula, del banco Samaria ( ver plano ), ubicado en el km 132+170 der. 1500 m., cemento asfáltico No.6 procedente de Cd. Madero Tamps, azufre sólido, procedente de Jáltipan Ver., y en estado líquido de Cactus Chis.. De acuerdo con las pruebas efectuadas en el laboratorio, las mezclas resultaron con estabildades variables, debido quizza, a la poca cantidad de materiales ( 1000 gr aprox. ) que dificultaban su mezclado y control de temperaturas uniformes, por lo que se acordo verificar el mezclado de estos materiales; en la pla. de bachas de 6000 lb que se encontraba instalada en el km 132+170 der. 200 m., lograndose ello, introduciendo con gente al mezclado. de la

planta, el azufre en polvo, por medio de sacos de lona de 30 kg., el 26 de mayo de 1983.

Para el mes de julio de 1983, se autorizó la mezcla asfalto-azufre sólido, en pta. estacionaria en condiciones normales y se empieza a elaborar el día 21 del mismo mes; empleándola en el tramo de prueba: Puente Carrizal-Villahermosa, entre los kms. 0+380-1+090 ( 6 % C.A. y 10 % de azufre ), en dos capas de 7.5 cm compactadas cada una, tendidas con máquina Finlssher, concluyendo el día 30 del mismo mes la construcción y abriendo al tránsito este tramo el 1 de septiembre de 1983.

Las pruebas de laboratorio realizadas a este tramo experimental, con los valores de estabilidad logrados, con el 6 % de C.A., 10 % de azufre y 135 °C de temperatura mínima en la mezcla, se cumplió con los 700 kg mínimos de proyecto en la estabilidad.

Después de 30 días de observación el tramo de prueba con mezcla asfálticos-azufre sólido y en el que se apreciaron grumos de él, superficiales en las capas tendidas, se ordenó el empleo de azufre líquido en la mezcla, con el fin de obtener mejores resultados en su calidad; para lo cual, se le adiciono a la pta. estacionaria, tanques de almacenamiento de azufre, molino coloidal, tanque de oscilación para la emulsión azufrosa y bombas de dosificación. El 19 de septiembre del mismo año, se comienza a producir la mezcla asfáltica-azufre líquido. El azufre pasado por

el molino coloidal se mezcla previamente con el cemento asfáltico en el tanque de oscilación, en proporción de 10-6 % en peso respectivamente sobre el pétreo ( contenidos óptimos ), para enseguida incorporarlos al pétreo, ya en el mezclador de la planta.

Ya hecha la mezcla, se muestrea para verificar su contenido de cemento asfáltico por medio de calorimetría y su estabilidad, con la prueba Marshall, compactando las muestras para las pastillas, con 75 golpes de pizón por cada lado y temperatura de 120 °C en promedio. Según las pruebas realizadas, los valores de estabilidad resultaron del orden de 250-1500 kg en su mayor parte inferiores a los 700 kg mínimo de proyecto, hasta el 15 de noviembre de 1983 y debido a la dificultad de la dosificación del azufre, por taponamiento de válvulas de paso y tubería de incorporación; corrigiéndose esto, al fijar una densidad de 135 mínima, correspondiente al 10-6 % en peso de azufre-cemento asfáltico. Conseguida esta emulsión azufrosa en el tanque de oscilación se adicionó al pétreo, ya en el mezclador de la planta, para su revoltura total. Los resultados obtenidos de esta mezcla correspondientes a la estabilidad con la prueba Marshall, variaron de 600 a 1800 y en su mayoría arriba de los 700 Kg mínimo de proyecto. Entre el 16 de noviembre de 1983 y marzo de 1984, en que se terminó de elaborar la mezcla mencionada.

Estas mezclas se utilizaron en la construcción de las capas de pavimento; entre los kms. 119+600 y 142+380, presentando

problemas en su compactación, ya que el tendido de la mezcla, se hacía con temperaturas de 100 a 130 °C y el equipo empleado ( rodillos lisos y neumático ), lo soportaba a una temperatura de 60 °C, para porcentajes de compactación entre 88 y 93 %.

**TRAMO : km 142 + 380 - VILLAHERMOSA TAB.**

Pavimentación realizada con mezcla asfáltica-azufre, elaborada en caliente, en planta estacionaria de producción continua ( C.M.I. ), instalada en el km 145+675 der.

**Materiales usados:**

Arena de río con contracción lineal de 0 , de banco cercano a la planta.

Cemento asfáltico No. 6, procedente de Cd. Madero Tamps..

Azufre líquido procedente de Jáltipan, Ver..

De junio a diciembre de 1984.- La producción de mezclas azufrosas, se llevaron a cabo, mezclando previamente el azufre y el cemento asfáltico en un tanque de oscilación ( no se uso molino coloidal ) y una vez determinada la densidad de esta emulsión, fijada en 1.35 mínimo para una dosificación de 10-6 % ( contenidos óptimos ) respectivamente sobre el petróleo, incorporarla al tambor mezclador de la planta. Hecha la mezcla se procedió al muestreo para verificar su contenido de cemento asfáltico por medio de

colorimetría y su estabilidad con la prueba Marshall, compactando la mezcla para las pastillas a una temperatura promedio de 120 °C con 75 golpes por cada lado. Los valores de la estabilidad se obtuvieron variables de 300 a 1000 Kg y en su mayoría inferiores a los 700 Kg mínimo de proyecto; esto debido a la dificultad en la dosificación del cemento asfáltico y el azufre, por taponamientos en la tubería de incorporación, descomposturas de válvulas de paso de flujo, etc.

Considerando los problemas de la planta, fué necesario someterlas a un buen mantenimiento y a la vez, se optó por modificar el proceso de elaboración de la mezcla.

De febrero a noviembre de 1985.- Las mezclas se empezaron a producir, incorporando individualmente el cemento asfáltico y el azufre líquido al material pétreo, ya en el tambor mezclador de la planta, checando su dosificación mediante gasto ( en galones ). Igualmente se procedió a muestrear la mezcla azufrosa para comprobar su dosificación, 10 % de azufre y 6 % de cemento asfáltico sobre el pétreo, con las mismas pruebas indicadas antes, colorimetría y estabilidad Marshall. Con este procedimiento se mejoro la calidad de la mezcla, con valores de estabilidad de 300 a 1500 Kg, pero siguieron obteniendo bajas a los 700 Kg mínimos de proyecto, en un 40 % aproximadamente por la dosificación irregular del azufre, al obstruirse el flujo de las válvulas de paso, continuo este problema hasta el mes de julio y a partir del mes de agosto y hasta noviembre de 1985, en que queda concluida la

fabricación de la mezcla citada, ya controlado debidamente el flujo de azufre para su correcta dosificación, se mejoro la mezcla asfáltica-azufre, notablemente dando estabilidades de 500 a 2500 Kg y en su mayoría, superiores a los 700 Kg mínimos de proyecto. Con esta mezcla se construyeron las capas de pavimento entre los kms. 142+380 y 162+100, 161+700 a 164+522 ( carpeta de 10 cm ). y 0+000-1+500 origen Carrizal ( carpeta de 10 cm ), presentandose como en el primer tramo del Km 119+600 al 142+380, problemas de compactación en cada una de las capas; ya que su tendido, se efectuaba con temperaturas en la mezcla de 100 a 140 °C y el equipo ( rodillo liso y neumático ) lo soportaba a una temperatura máxima de 60 °C. Los porcentos de compactación, se obtuvieron de 84 a 92 % ; después de recompactar se observó que no había incremento en la compactación ya dicha.

**TRAMOS PUESTOS EN OPERACION SEGUN EL ORDEN SIGUIENTE :**

- Km 119 + 600 a 142 + 380 Abril de 1984
- Km 161 + 700 a 157 + 400 Marzo de 1985
- Km 157 + 400 a 152 + 100 Mayo de 1985
- Km 152 + 100 a 142 + 380 Octubre de 1985
- Km 161 + 700 a 165 + 522 Septiembre de 1983 (sin azufre)
- Km 161 + 700 a 165 + 522 Octubre de 1985 (carpeta con azufre 10 cm.)

**ORIGEN PUENTE CARRIZAL**

- Km 0 + 000 a 1 + 500 (tramo de prueba) Septiembre de 1983
- Km 0 + 000 a 1 + 500 (carpeta 10 cm) Octubre de 1985

Todos estos tramos, no presentan fallas considerables las capas de pavimento, considerando su comportamiento como bueno hasta el 22 de Septiembre de 1986.

**NOTA :** La clasificación del pavimento hasta Octubre de 1988 fue de 4 según la Oficina de Conservación de Carreteras Federales de la S.C.T. en Villahermosa Tabasco.

**SUBTRAMO ENTRE LAS ESTACIONES 142 + 380 AL 144 + 700****A) TERRACERIAS****a) Cuerpo de terraplén y capa de transición.**

Esta capa ya se tenía casi terminada la construcción siendo necesario solamente reperfilar y reacondicionar los 15 cm superiores en algunos lugares.

**b) Subrasante**

Una vez terminados los detalles anteriores y afinada la capa de transición se procedió a construir la capa subrasante en dos capas de 15 cm cada una, para la capa inferior se utilizó arena y limo procedente del banco SAMARIA en una proporción de 70 y 30 % respectivamente, los 15 cm superiores con una mezcla arena y cemento asfáltico No. 6 a razón de 140 L/m<sup>3</sup> aproximadamente.

El material que formó cada una de las capas se compactó al 95 % del P.V.S.M.

**c) Pavimento**

Las cláusulas e incisos a que se hace mención en los párrafos siguientes corresponden a las especificaciones generales de construcción de la S.C.T. ( antes SAHOP ), partes VIII y IV de la cuarta y tercera edición respectivamente.

**BASE TRATADA CON EMULSION AZUFROSA**

1.- Una vez terminada la construcción de la subrasante a su nivel definitivo, se procedió a construir una base tratada con emulsión de 24 cm de espesor utilizando para la mezcla los

siguientes materiales:

- arena fina a gruesa de río.
- cemento asfáltico No. 6,  $110 \text{ kg/m}^3$
- azufre líquido 100 % ,  $190 \text{ kg/m}^3$

La proporción de estos materiales con respecto a la arena así como su calidad deberá apegarse a los lineamientos que se indican a continuación :

2.- Los materiales pétreos utilizados deberán cumplir con los requisitos de calidad indicados en el inciso 91-03.10 de la parte VIII.

3.- Cemento asfáltico No. 6, para su empleo deberá cumplir con los requisitos de calidad indicados en el inciso 93-02.4A, la mezcla se elaborará en planta estacionaria en caliente, en la misma forma que se hace la mezcla asfáltica.

4.- El azufre para su empleo en la mezcla deberá cumplir con los siguientes requisitos :

- a) Deberá ser 100 % puro y de color amarillo brillante, contener cuando más un 0.5 % de impurezas ( hidrocarburos, carbonos, cenizas, etc. ).

## 5.- EMULSION AZUFROSA.-

Una vez en el almacén los materiales y sus depósitos respectivos, se bombean simultáneamente ( el azufre líquido y el cemento asfáltico No. 6 ) en proporciones aproximadas en peso de 6 y 10 % respectivamente, mezclándose los dos líquidos en un mismo tubo que los conduzca al molino coloidal ó algún otro mecanismo que garantice la dispersión del azufre con el asfalto para que cuando menos el 85 % del azufre tenga una distribución de tamaños de partículas menores de 5 micrones.

El cemento asfáltico y el azufre serán dosificados en la proporción antes indicada y a la salida de éstos se contará con un tanque de oscilación con tubería de circulación y recirculación, para garantizar la estabilidad de la mezcla azufre-asfalto hasta el momento de dosificarla en peso e incorporarla a la planta de concreto asfáltico.

Las tuberías de circulación y recirculación, bombas e instrumentos de medición de los productos, deberán contar con protección térmica que garanticen ampliamente la temperatura constante especificada.

## 6.-MEZCLA.

Una vez obtenida la mezcla en sus respectivas proporciones, se verificará en la báscula de pesado de la planta, la

dosificación adecuada indicada para el proyecto.

La temperatura deberá conservarse siempre entre 125 y 150 °C, en la elaboración de la mezcla y cuidar que a la salida se conserve siempre el mismo rango.

La mezcla deberá cumplir con los requisitos de calidad en lo que respecta a la prueba Marshall de proyecto, principalmente en lo que se refiere a :

estabilidad mínima de 700 kg

flujo..... 2 a 4 mm

% de vacíos entre ..... 5-10

Para su ejecución se deberá apegar a los lineamientos marcados en el inciso 53-04 de la parte IV; y para el cemento asfáltico :

#### **7.- TRANSPORTE AL LUGAR DE TENDIDO**

El transporte se hará de acuerdo a lo especificado en el inciso 57-04.8 de la parte IV.

#### **8.- TENDIDO**

En lo que respecta al tendido se efectuará de acuerdo a los lineamientos marcados en los incisos 57-04.9, 57-04.10 y 57-04.11

de la parte IV.

La mezcla deberá tenderse a una temperatura no menor de 90 °C y en capas hasta de 5 cm para evitar corrimientos en la mezcla.

#### 9.- COMPACTACION

Inmediatamente después del tendido se procederá a compactar el material que formen las capas a un grado mínimo de 95 % del peso volumétrico máximo determinado en la prueba Marshall.

Se deberá tomar en cuenta que puede ser necesario el uso de equipo especial vibratorio para este tipo de bases tratadas con emulsión azufrosa; ésto es con el objeto de aprovechar por entero las propiedades ligantes del azufre. Después de la compactación se empleará un rodillo liso o neumático adecuado para borrar las huellas de los compactadores iniciales y/o del equipo de tendido.

#### 10.-LINEAMIENTOS PARA ADECUACION Y MANEJO DEL AZUFRE

##### a) ADQUISICION :

El azufre deberá ser adquirido en estado líquido, en la planta de Cactus Chiapas y Azufrera Panamericana en Jáltipan Ver.

##### b) TRANSPORTE

El azufre deberá ser transportado a su lugar de almacenamiento mediante autotanques, provisto de un sistema de calentamiento que lo mantenga en estado líquido a una temperatura

de 125 a 150 °C.

#### c) ALMACENAJE

El azufre deberá ser almacenado en tanques estacionarios, provistos de :

- 1.- Refuerzo para contener adecuadamente, un producto 1.8 veces más pesado que el cemento asfáltico ( considerando que el cemento asfáltico pesa 1.03 kg/l ).
- 2.- La cimentación para soportar el tanque de azufre, deberá ser diseñada para resistir ampliamente el peso del líquido y tanque.
- 3.- Los tanques de almacenamiento del azufre, deberán estar provistos de calentadores para conservar la temperatura uniforme en todo su interior, la cual deberá estar comprendida entre los 125 y 150 °C.

#### d) CONCLUSION

Es conveniente encamisar todas las líneas de conducción del azufre líquido, bombas, válvulas, etc.

Las bombas para impulsar el azufre deben tener dos veces mas caballos de fuerza que las bombas utilizadas para manejar el cemento asfáltico. Además no deberán tener bronce entre sus componentes.

**e) CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO ELABORADA EN PLANTA**

Cuando la base este terminada, previa aplicación de un riego de liga con producto asfáltico FR-3 a razón de  $0.5 \text{ l/m}^2$  aproximadamente, se construirá una carpeta asfáltica de 7.5 cm de espesor con material de tamaño máximo de 3/4" procedente del banco TEAPA y cemento asfáltico No. 6 a razón de  $110 \text{ kg/m}^3$  de material suelto y seco; esta carpeta debe compactarse al 95 % del peso volumétrico obtenido en el ensaye de la prueba Marshall.

Los materiales pétreos deberán cumplir con las normas de calidad especificadas en los incisos 92-03.2 y 93-02.4A respectivamente y el FR-3 para riego de liga en el inciso 93-02.4B de la parte VIII y para su ejecución con la cláusula 57-04 de la parte IV.

**f) RIEGO DE SELLO**

En todo lo ancho de la corona, se aplicará un riego de sello empleando material pétreo tipo 3-E procedente del banco TEAPA a razón de  $10 \text{ l/m}^2$  y producto asfáltico FR-3 a razón de  $1.2 \text{ l/m}^2$  aproximadamente.

El material pétreo deberá cumplir con los requisitos de calidad indicados en los incisos 93-03.3 y 93-02.48 de la parte VIII y para su ejecución con la cláusula 57-04 de la parte IV.

1	Base de Arena - Azufre - Asfalto		<p>7.5 Carpeta de Concreto Asfáltico</p> <p>24.0 Base de Arena - Azufre Asfalto</p>	<u>Concepto</u>	<u>Importe</u>
				Base Arena - Azufre - Asfalto	19'6
				Carpeta de Concreto Asfáltico	5'6
				Sello	1'2
				Costo	<u>26'4</u>
2	Base de Concreto Asfáltico		<p>7.5 Carpeta de Concreto Asfáltico</p> <p>21.0 Base de Concreto Asf.</p>		
				Base de Concreto Asfáltico	27'2
				Carpeta de Concreto Asfáltico	5'6
				Sello	1'2
				Costo	<u>34'0</u>
3	Base de Arena - Cemento Portland		<p>7.5 Carpeta de Concreto Ast.</p> <p>21.0 Base Arena - Cemento Portland</p>		
				Base de Arena - Cemento Portland	17'8
				Carpeta de Concreto Asfáltico	5'6
				Sello	1'2
				Costo	<u>24'6</u>
4	Base Hidraulica		<p>7.5 Carpeta de Concreto Asf.</p> <p>42.0 Base Hidraulica</p>		
				Base Hidraulica	26'3
				Carpeta de Concreto Asfáltico	5'6
				Sello	1'2
				Costo	<u>33'1</u>

P.U. Enero 1964

FIG. 4.9 COMPARACION DE COSTOS, CON OTRAS ALTERNATIVAS

**CAPITULO V****CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES .

El procedimiento para construir bases de pavimento de arenas con azufre, con el método antes descrito, presentó algunas dificultades, como el manejo del azufre para mezclarlo con los demás materiales ( arena y cemento asfáltico ) ya que al principio dicho material se estaba manejando en estado sólido ( polvo ), el cual se mezclaba con el cemento asfáltico y la arena previamente calentados ; procedimiento que causaba irritación en los ojos y piel de los trabajadores lo cual disminuía la eficiencia de los mismos, para eliminar dichas molestias, se optó por el manejo del azufre en estado líquido que mezclado con el asfalto procedente de depósitos, fueron mezclados para formar un solo flujo que llegaba al molino coloidal, para homogeneizarlos. En seguida y a fin de no perder estabilidad, la mezcla fué operada mediante un sistema de tuberías, bombas, válvulas y tanques de oscilación , equipo casi todo encamisado para evitar enfriamiento y aglomeración en tuberías .

Se debe tomar en cuenta que la muy baja conductividad del calor del azufre provoca que al enfriarse la capa superior de la sub-base y base en espesores importantes, se impide el enfriamiento en las zonas inferiores y consecuentemente al quedar con temperaturas altas no alcanzan el grado de compactación requerido . Para evitar lo anterior se construyó la base tratada en capas de 5 a 8 cm. y dejando pasar un determinado tiempo de enfriamiento para iniciar la compactación.

Posteriormente cuando la base estuvo terminada , previa aplicación de un riego de liga con producto asfáltico FR-3 a razón de 0.5 lts/m<sup>2</sup> - aproximadamente, se construyó una carpeta de concreto asfáltico de 7.5 cm. de espesor de tamaño máximo de 3/4" procedente del banco Teapa y

cemento asfáltico No.6, a razón de  $110 \text{ kg./m}^3$  de material seco y suelto. Esta carpeta se compactó al 95 % del peso volumétrico obtenido en la prueba de compresión axial sin confinar.

El cemento asfáltico que se utiliza en las carreteras es relativamente blando para las cargas que deben soportar las carpetas, con lo cual si se aumenta el espesor, la rotura que se produce es mayor, por otra parte, de acuerdo con la teoría de Boussinessq, que tomando en cuenta la carga por eje, la distribución de cargas de los ejes se ha visto que el abatimiento de los esfuerzos se realiza principalmente en los 20 cm. superiores; por lo que en las carreteras de alto tránsito, es conveniente colocar un espesor mínimo de 20 cm. de base mejorada.

En experiencias anteriores en tramos construidos utilizando bases estabilizadas con cemento Portland, se han presentado agrietamientos; esto es desde la base estabilizada hasta la carpeta; se ha especulado que las causas de estos agrietamientos son por diversos factores, ya que existen casos en que el agrietamiento es desde el terreno natural hasta la carpeta o por presencia de humedad, así como también es por un consumo elevado de cemento hidráulico, ya que aunque éste sea bajo, por los cambios bruscos de temperatura se presentan grietas en la base, que posteriormente se reflejan hacia la carpeta, también se ha hablado en relación a la compactación vibratoria de las carpetas construidas con bases con cemento Portland, ya que cuando ésta ya está rigidizada y se compacta, las vibraciones provocan rupturas en la base y que posteriormente se reflejan en la superficie; con el procedimiento con bases estabilizadas con azufre, no se ha presentado el fenómeno antes descrito.

1.- Los materiales que abundan en la región son de origen sílico y rara vez cumplen con las normas para sub-base ó bases hidráulicas , esto es debido a que básicamente no se logra el v.r.s. mínimo ( 100 % ) en bases hidráulicas ni el valor cementante, siendo necesario mejorarlas con algún material arena -arcillosa, lo cual superará ampliamente el v.r.s., otro procedimiento es; la estabilización de la base con cemento Portland con lo cual muy probablemente se pueda obtener los  $52 \text{ kg/cm}^2$  en la prueba de carga axial en lo que corres - ponde a la sub-base, como es la arena arcillosa si ésta no es lavada, se presentan problemas con la plasticidad y también con el v.r.s., conclusión; debe buscarse con las combinaciones de los diversos bancos las granulometrías mejores , tendiendo siempre a lograr el máximo v.r.s. y el mínimo de plasti - dad, junto con el valor cementante necesario.

2.- Dado el alto costo que representa el uso de cemento Portland para estabilizaciones, se vió inicialmente tratar de lograr el punto No.1 y no incorporar cemento en más del 3 % en peso del material pétreo, esto necesari - amente no obligaba a dar los  $52 \text{ kg/cm}^2$  que como mínimo marcan las normas y sólo se exigiría lo que en una buena muestra de laboratorio se obtuviera.

La aplicación de éste método en otros Países ha sido utilizando material pétreo granular, no con finos ó arena en especial como en éste ca - so arena de río que se utilizó para construir la base.

A) Existen diferentes formas de elaborar una base de pavimento de acuerdo a las características de los materiales que se encuentran en la zona de la obra, como pueden ser; bases hidráulicas, estabilizadas con cal, cemento portland o asfaltos.

B) Para la pavimentación del tramo CARDENAS-VILLAHERMOSA, en el Edo. de Tabasco, se utilizaron en la base una mezcla de arena fina de río, cemento asfáltico y azufre para obtener las características de v.r.s., estabilidad, vacíos y flujo que marcan las normas, ya que los bancos de grava-arena, para base hidráulica se encuentran muy distantes.

C) Para la aplicación de esta técnica, fué necesario recavar información de las experiencias en otros Países, en donde ha sido utilizada, también de estudios que se realizaron en el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. y de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en donde se hicieron pruebas de laboratorio necesarias.

D) La estabilidad y el V.R.S. para la base fueron las variantes más importantes a tratar, utilizando los materiales que estaban al alcance (arena, azufre y cemento asfáltico) ya que al carecer de material pétreo triturado para la base y al no poder utilizar cemento hidráulico o cal para estabilizar dicha capa, por las altas temperaturas y por el alto costo que esto representaba.

E) En la aplicación de este nuevo procedimiento ( en nuestro País ) como se mencionó anteriormente, presentó algunas dificultades en la construcción, lo cual será más fácil superar en aplicaciones futuras, porque ya se

tiene la experiencia y se considerarán condiciones no previstas en la primera ocasión, lo cual abatirá aun más el costo y se tendrá una estructura mejor, reduciendo el mantenimiento prematuro de la obra.

F) El funcionamiento del trazo construido, según la técnica anterior, con antigüedad de 6 años y bajo las cargas de tránsito pesado que lo opera, se considera que se ha comportado bastante bien, hasta la fecha.

G) La aplicación de nuevas técnicas, en donde se busca reducir el costo a mejorar la calidad de un producto, es beneficioso porque lo que se requiere es tener recursos técnicos para satisfacer las necesidades de un País en vías de desarrollo, y para exportar tecnología en un momento dado.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- OLIVERA BUSTAMANTE FERNANDO. " ESTRUCTURACION DE VIAS TERRESTRES"
- 2.- RICO RODRIGUEZ Y DEL CASTILLO. " LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VI  
AS TERRESTRES, VOLUMEN No. I "
- 3.- RICO RODRIGUEZ Y DEL CASTILLO, " LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS  
TERRESTRES", VOLUMEN No. 2
- 4.- S. C . T . PUBLICACION DEL CONGRESO DE VIAS TERRESTRES EN LA CIUDAD  
DE PUEBLA.
- 5.- SANTIAGO CORRO Y GUILLERMO PRADO, " DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS  
CON PAVIMENTO FLEXIBLE " , INSTITUTO DE INGENIERIA ,DE LA U.N.A.M.
- 6.- S.C.T. ESTRUCTURACION DE LOS PAVIMENTOS " SEMINARIO DE PAVIMENTOS  
1975."
- 7.- INGENIERIA DE VIAS TERRESTRES ( AMIVTAC ), REVISTAS Nos. 1 y 2
- 8.- MIGUEL MADINAVERTIA, " ESTUDIO EXPERIMENTAL DE DIVERSOS TIPOS DE  
PAVIMENTO DE CONCRETO " INSTITUTO DE INGENIERIA "
- 9.- C.I.C.M. REVISTA No. 265
- 10.- SANTIAGO CORRO, " DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES " , INSTITUTO DE  
INGENIERIA NO. 240
- 11.- SANTIAGO CORRO, " INVESTIGACIONES EN DESARROLLO SOBRE EL DISEÑO  
DE PAVIMENTOS FLEXIBLES", INSTITUTO DE INGENIERIA.
- 12.- JUAREZ BADILLO Y RICO RODRIGUEZ, " MECANICA DE SUELOS VOL.No. 1 "