



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ACATLAN  
U. N. A. M.

## Pavimentos con Hule

TESIS PROFESIONAL  
Que para obtener el Título de

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JOSE RAMIREZ CABRERA

Santa Cruz Acatlan, Edo de México

1984.

M-0028707



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL

Autónoma

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN

COORDINACION DEL PROGRAMA DE INGENIERIA

C1/116/83

SRES. RAMIREZ CABRERA, JOSE  
CRUZ MARTINEZ, JAVIER  
Alumnos de la Carrera de Ingeniería Civil  
P r e s e n t e .

De acuerdo a su solicitud presentada con fecha, 6 de Febrero de 1981, me complace notificarles que esta Coordinación tuvo a bien asignarles el siguiente tema de tesis: PAVIMENTOS -- CON HULE, el cual se desarrollará como sigue:

- INTRODUCCION
- CAPITULO I ANTECEDENTES
- CAPITULO II METODOS TRADICIONALES
- CAPITULO III UNA NUEVA ALTERNATIVA EN LOS PAVIMENTOS (HULE)
- CAPITULO IV PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE UN PAVIMENTO CON HULE
- CAPITULO V ANALISIS COMPARATIVO ENTRE UN PAVIMENTO TRADICIONAL Y OTRO CON HULE
- RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

Asímismo fué designado como Asesor de Tesis el señor M EN I. GABRIEL MORENO PECERO profesor de esta Escuela.

Ruego a ustedes tomar nota que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberán prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado. Esta comunicación deberá imprimirse en el interior de la tesis.

A T E N T A M E N T E  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Escuela Nacional de Estudios Profesionales de México, a 9 de Agosto de 1983.



ING. ALEJANDRO RAMIREZ SECENA

Coordinador del Programa  
ENEP - ACATLAN de Ingeniería

COORDINACION DEL  
PROGRAMA DE INGENIERIA

Para todas aquellas personas que me brindaron y me siguen dando su confianza.

Para quienes desinteresadamente me han dado su inestimable ayuda.

Hay horas mediocres en la vida  
cuando aparece la duda  
y las cosas no salen bien  
el ánimo se vuelve humo

En estos momentos difíciles, de vacilación, es cuando necesitamos la voz sensata, la mano amiga, que nos fortalezca el espíritu.

## PAVIMENTOS CON HULE

### INTRODUCCION

- CAP. I ANTECEDENTES
  - a) Antecedentes históricos
  - b) Antecedentes históricos del hule en pavimentos
  - c) Asfalto
  - d) Reciclaje
- CAP. II METODOS TRADICIONALES
  - a) Pavimento Asfáltico
  - b) Pavimento Hidráulico
  - c) Reciclaje
- CAP. III UNA NUEVA ALTERNATIVA EN LOS PAVIMENTOS (HULE)
  - a) Obtención del hule
  - b) Método de aplicación a los pavimentos
  - c) Ventajas y desventajas del hule
- CAP. IV PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE UN PAVIMENTO CON HULE
  - a) Mantenimiento
- CAP. V ANALISIS COMPARATIVO ENTRE UN PAVIMENTO TRADICIONAL Y OTRO MODIFICADO CON HULE
  - a) Análisis de costo de cada pavimento
- CAP. VI RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES
  - a) Recomendaciones
  - b) Conclusiones

RAMIREZ CABRERA JOSE

CRUZ MARTINEZ JAVIER

## INTRODUCCION

El presente trabajo está encaminado a analizar, en una forma didáctica, el comportamiento del hule en los pavimentos, así como de sus ventajas que ha aportado para el mejor funcionamiento de las carpetas asfálticas.

"Pavimentos con Hule" es el título de este trabajo e inmediatamente nos imaginamos una carretera formada con grandes bloques de hule o algo parecido, todo esto ocasionado, tal vez, por el título. Sabemos que el pavimento lo constituyen: la subbase, la base y la carpeta. Donde actúa el hule directamente es en la carpeta, quedando las capas inferiores tal y como tradicionalmente se estructuran, es decir, no sufren ninguna alteración, sin embargo consideramos, que al agregarle el hule al asfalto y demás materiales de la carpeta, estamos alterando el comportamiento de todas las capas del pavimento.

La carpeta asfáltica es la que está en contacto directo con los vehículos, la que recibe el peso para transmitirlo a las capas inferiores, luego entonces, al mejorar la carpeta asfáltica por la adición del hule, repercute de manera inmediata en la base y subbase, que son partes de todo el pavimento. El mejoramiento de que hablamos lo podemos cuantificar en: la estabilidad, durabilidad, flexibilidad, cohesión e impermeabilidad de la carpeta. Por estas razones, decidimos darle a este trabajo el título de: "Pavimentos con Hule".

Anteriormente los pavimentos tradicionales tenían espesores muy grandes, tanto en la base como en la subbase, y prácticamente estas dos capas tomaban los esfuerzos transmitidos por las cargas, mientras que la carpeta asfáltica únicamente se limitaba a ser superficie de rodamiento, motivo por el cual tenía un espesor insignificante. En la actualidad esto ha cambiado considerablemen

te, los espesores de las capas del pavimento son proyectados con mayor cuidado, mientras que, a la carpeta de rodamiento se le ha dado la importancia que merece, esta capa debe cumplir con los siguientes requisitos: ser estable ante los agentes del intemperismo, ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito, tener textura apropiada al rodamiento, ser durable, tener condiciones adecuadas en lo referente a permeabilidad y ser económica. Para cumplir con los requisitos anteriores es necesario una capa de material granular de muy buena calidad que no es posible obtener en forma del todo natural y cuyas partículas deben estar ligadas de cualquier modo, aun artificial. Los suelos naturales cohesivos nunca podrían soportar la acción directa y prolongada del tránsito; los materiales granulares, tal como se encuentran, a pesar de su mayor resistencia potencial ofrecerían una superficie inestable por falta de coherencia.

Resulta de mayor costo la capa de rodamiento que el material de las terracerías y esto hace que los factores económicos adquieran en ella un papel importante. El problema económico se resolvería, en principio, con una capa de rodamiento muy costosa, pero muy delgada; esta capa podría cubrir también los requisitos de estabilidad, duración, textura y permeabilidad, pero por su pequeño espesor se transmitirían a la terracería niveles de esfuerzos muy elevados que perjudicarían pronto a la propia superficie de rodamiento por falta del adecuado apoyo. Existen dos puntos de vista para el mismo problema, son dos líneas de conducta diferentes.

La primera, donde la capa de rodamiento se construye con suficiente espesor y de una calidad tal que se logra que los esfuerzos transmitidos a la terracería sean compatible con la calidad de ésta. Esto nos lleva a los pavimentos rígidos, con losa de concreto hidráulico. Cualquier pequeña cedencia permanente de los --

suelos bajo la losa es absorbida por la resistencia de la misma a la tensión.

Y la segunda, donde la superficie de rodamiento se logra mediante una carpeta bituminosa relativamente delgada, de alto costo y alta calidad, pero entre ella y las terracerías se interpone un sistema de varias capas de materiales seleccionados cuya calidad, por lo común, va disminuyendo con la profundidad, congruentemente con los niveles de esfuerzos producidos por el tránsito que siguen una ley en ese mismo sentido decreciente. En rigor el problema de dimensionamiento, consistiría, en hacer variar el espesor y la calidad de los materiales empleados en cada capa, de manera que coincidan las dos leyes. Todo esto nos conduce a los pavimentos flexibles. En este caso, a igual de otros factores, puede decirse que el espesor del pavimento depende fundamentalmente del material de la terracería, que constituye su apoyo.

Hoy en día existen investigaciones sobre diversos materiales que tienen posibilidades de substituir o mejorar el rendimiento del asfalto (hule, azufre, etc.), así como técnicas para recuperar el material envejecido, mezclarlo con material y aglutinante nuevos, y lo más importante, volverlo a usar, esto es conocido como reciclado.

Otras investigaciones están encaminadas a extender la vida útil de los pavimentos, y proponen agentes rejuvenecedores, tales como el Reclamite: procedimiento muy efectivo. Pero si los pavimentos en cuestión no pueden ser tratados con el rejuvenecedor debido a las condiciones de la superficie que no permitirá la penetración, y esta debe ser efectiva, existen otros tratamientos superficiales tales como: riego de sello usando emulsión asfáltica diluída, riegos de arena, slurry seal, o agregado fino. Sin embargo, ninguno de estos tratamientos tiene acción reversible para el

proceso de envejecimiento, lo cual solamente el agente rejuvenecedor puede realizar.

Todos estos estudios están dirigidos a resolver un mismo problema, y no dudamos que existan muchos caminos para llegar a tal fin. Sin embargo, el objetivo de nuestro trabajo es el hule, porque los que han trabajado en esto han demostrado que, sin incrementar el costo en forma considerable, el hule es una buena alternativa en la construcción de carreteras.

## CAPITULO I

### ANTECEDENTES

#### a) Antecedentes históricos

El hombre siempre ha tenido la necesidad de establecer comunicación con sus semejantes, para tal fin, se sirvió de las veredas, que con el correr del tiempo sufrieron una transformación; de veredas pasaron a ser caminos de herradura, después se convirtieron en caminos reales, y éstos a su vez pasaron a ser carreteras, pero permaneciendo como caminos primitivos -- porque no fueron previamente planeados, sino que fueron el resultado del tráfico continuo sobre una ruta establecida al azar sin ninguna consideración especial.

La historia registra los primeros caminos o rutas de viaje establecidos en Asia, allá por el año 4000 AC, aunque los Romanos (300 A.C.), se consideran los primeros constructores dignos de tomarse en cuenta. En América los imperios Inca y Maya dejaron evidencias históricas de mucho interés respecto a redes incipientes de caminos.

Sin embargo la construcción de carreteras como una ciencia aplicada se inició en Europa por el año de 1750 cuando el Frances Tresaguet inicio la construcción de pavimentos por capas ordenadas según el tamaño de sus partículas constitutivas, sus ideas fueron más tarde recogidas y mejoradas en Inglaterra por los Escoceses Telford y McAdam (1820), quienes construyeron pavimentos con secciones, que en algunos casos, están hoy en uso. Telford diseño un camino con la superficie cóncava, que se construyó sobre una capa de piedra chica y cubierta de piedra colocada cuidadosamente. En tanto McAdam ideó otros tipos de construcción, que consistía en el empleo de piedras de forma regular de tamaño mediano en lugar de las grandes piedras irregula-

res usadas por Telford.

Pero el verdadero auge del pavimento, en el sentido actual de la palabra, ha tenido lugar con la aparición del automóvil. Las fuertes cargas actuantes, su velocidad, el número de sus repeticiones, etc., hicieron que en la actualidad las técnicas de construcción de pavimentos sufrieran una evolución rápida.

Así pues, han surgido nuevas alternativas en los materiales para pavimentos, que tratan de mejorar en todos los aspectos a las carreteras. Debemos tomar en cuenta que el asfalto es un recurso natural, no renovable, por lo tanto se debe utilizar de la mejor manera, para sacarle su máximo rendimiento. Se ha experimentado agregando al asfalto nuevas substancias, para mejorar sus características. Entre otros materiales, se ha experimentado con hule, material que mezclándolo de la mejor manera y condiciones adecuadas con el asfalto, puede lograr que las carpetas de las carreteras alcancen mejor comportamiento.

#### b) Antecedentes históricos del hule en pavimentos

El hule como material para construcción en carpetas de rodamiento no es nada nuevo, se utilizó por primera vez en forma de bloques sólidos, que daban pavimentos muy duraderos; desgraciadamente estos eran a la vez muy costosos y deslizantes. El primer intento de modificar los pavimentos bituminosos por la adición de hule fue realizado en 1894 por Caudenberg, sin embargo surgieron dificultades y no se pudo seguir adelante. La industria del asfalto utilizaba el hule para modificar el asfalto con diversos propósitos, pero hasta la aparición del hule en forma granular o de polvo (1930), no se hizo ningún progreso en la modificación del asfalto por la adición de pequeñas proporciones de hule. Los trabajos en esta dirección comenzaron en Europa, principalmente en Holanda y en Gran Bretaña.

Aproximadamente en la misma época, Pratt y Handley estudiaban la adición de pequeñas cantidades de hule al alquitrán. Esta adición resulto ser difícil porque el alquitrán y el hule natural parecían ser incompatibles; se logró cierto éxito aunque los productos obtenidos no eran adecuados para su empleo como aglomerantes en construcción de carreteras. Tiempo después, en Inglaterra y Malaya, se hicieron experimentos en pavimentos con hule pulverizado mezclado. Por los años de 1935 a 1940 se colocaron más de treinta secciones en Holanda.

En 1938, el Dr. J.W. Van Darsen, de Indonesia, preparó un nuevo polvo de hule sacado del látex. Este es un polvo de hule de color crema cuyas partículas son ligeramente mayores que la sal de mesa. Este material dio resultados definitivos mezclándolo con betún con propósitos de pavimentación. Desde entonces, se hicieron pavimentaciones experimentales usando polvos de hule natural en: Java, Países Bajos, Islas Británicas, Sudáfrica, Suecia, Dinamarca, Bélgica, Francia e Italia. En 1948 en Francia, se empleó una mezcla de látex de hule, una emulsión bituminosa y agregados, empleandola en una sección de pavimento experimental. Se han construido caminos de prueba con pavimentos que llevan polvo de hule en: Europa, Canadá, Terranova y en los Estados Unidos.

Desde 1950, aproximadamente, la investigación sobre el empleo del hule en los pavimentos bituminosos se hizo más intensa. Las investigaciones de laboratorio han demostrado claramente que porcentajes muy pequeños de hule incorporados a los aglomerantes bituminosos tienen marcados efectos sobre sus propiedades físicas. El criterio definitivo para afirmar la utilidad de la incorporación del hule es, sin embargo, el comportamiento del material en los tramos de carreteras experimentales, tenemos experimentos a escala natural perfectamente controlados en: Inglaterra, Estados

Unidos, Malasia y Holanda. En muchos casos los resultados de los experimentos sólo se obtienen después de varios años.

La División Química Naugatuck de la Compañía Americana de Hule ha preparado un compuesto para vaciarlo en estado caliente para rellenar las juntas, siendo un compuesto que se licúa fácilmente a altas temperaturas. Su instalación en carreteras y en aeropuertos tiene períodos de servicio mayores de diez años, con lo que éste material muestra que tiene excelentes cualidades de ligazón y que no es afectado por el tráfico o por los cambios de temperatura. También se ha encontrado un compuesto para rellenar las juntas, el cual es resistente a los destilados del petróleo. Este compuesto fue desarrollado por la compañía antes mencionada para emplearse en aeropuertos en los que operan aviones a reacción.

Los hules sintéticos, como el hule nitrilo, se han sugerido también como materiales para la modificación de asfaltos y alquitranes, algunos de ellos con facilidad para dispersarse en el alquitrán. La investigación sobre estos hules sintéticos en los aglomerantes bituminosos ha sido llevada a cabo principalmente en los Estados Unidos, aunque en Inglaterra se ha trabajado también en el laboratorio.

Cabe señalar, que aunque desde principios del siglo, se empleó asfalto con hule para experimentos de carreteras a escala natural, la mayor parte de los trabajos realizados con este material, estaban relacionados con el cambio de las propiedades reológicas de los materiales por la adición de cantidades variables de hule. Se suponía que los cambios producidos en los resultados de los ensayos normalizados por la adición de hule podrían interpretarse en relación con su comportamiento probable en la carretera. Por eso es que todos los esfuerzos estaban fijos en la medición de los cambios en propiedades como el punto de reblandecimiento, la pene-

tracción, la viscosidad, la recuperación elástica, la ductilidad y la fluencia.

Se formulaban teorías para explicar el mecanismo por el que el hule alteraba el comportamiento del aglomerante. Van Rooijen llegó a la conclusión de que los granos de hule absorben algunos de los constituyentes oleosos del asfalto. Los granos, hinchados hasta un volumen aproximadamente cinco veces mayor que el original, se dispersan en el asfalto, que se hace de esta forma más duro -- que el original, pero del mismo tipo. De Decker y Nijveld dijeron que el hule se disolvía, al menos parcialmente, en el asfalto, -- siendo algunas propiedades especialmente influenciadas por el hule disuelto. Mason, Thrower y Smith opinaban que el cambio en las propiedades de viscosidad y fragilidad se debía en parte a la dispersión molecular del hule en el aglomerante. Hasta ahora no existe evidencia suficiente para decidir de forma segura cuál de estas hipótesis es correcta, pero se ha demostrado que el grado de dispersión tiene un profundo efecto en las mezclas resultantes, y recientes trabajos, del Road Research Laboratory confirman que un aumento en el grado de dispersión produce mayores cambios en las propiedades de los asfaltos modificados.

Quienes trabajan en este campo están de acuerdo en que la incorporación del hule al asfalto tiene un efecto considerable sobre los resultados obtenidos en los diversos ensayos aceptados para la clasificación de los asfaltos. Se ha encontrado que la modificación de las propiedades es una función del tipo de asfalto utilizado, el tipo de hule y la forma de preparación del aglomerante. Este último factor es el que tiene mayor influencia sobre el grado de dispersión, y probablemente es el que ha producido los diferentes grados de modificación que se han observado en los experimentos realizados por diversos investigadores.

### c) Asfalto

Al hablar de carreteras, es imprescindible destacar el importante papel que ha tenido el asfalto. El empleo de este material, según se tienen noticias, fue de muchas formas por los habitantes de la Mesopotamia, Siria y Egipto. El asfalto que se empleaba en la antigüedad, era el que se obtenía en estado nativo de lagos o yacimientos asfálticos, por así llamarlos, que se formaron con la ascensión de crudos cuyas fracciones más ligeras se evaporaban en forma natural. Este residuo, pesado usualmente, tenía diversas -- contaminaciones tales como agua, tierra y algunas otras impurezas que dichas culturas sometían a primitivos y lentos métodos de destilación para obtener combustibles y pastas bituminosas para impermeabilización y pavimentación.

Hace aproximadamente cuarenta o cincuenta siglos, en Irak, se descubrieron los yacimientos más grandes de asfalto en las proximidades de Hit y Ramadi, donde había varios yacimientos de importancia, algunos historiadores dicen que había otros a lo largo -- del Tigris y también al norte de Irak, cerca de la ciudad de Shargat, junto a la cual existe en la actualidad un campo petrolero.

Los egipcios obtenían el asfalto que empleaban para la momificación y diversos usos específicos en la construcción, de los depósitos naturales del mar muerto, situado cerca del río Jordán, -- en el Líbano.

En el continente Americano, allá por el año de 1595, Sir Walter Raleigh obtuvo asfalto natural para calafatear sus barcos, de un lago situado en las proximidades de las costas del Golfo Paria, y a la fecha, de ahí se han extraído miles de toneladas sin que -- existan señales apreciables de disminución, ya que al extraerlo -- se libera de una presión y esto permite que surja más residuo a -- la superficie con algunas impurezas.

Tenemos otro yacimiento cerca de Los Angeles, California, es --

el de la Brea, que es un caso similar al del Lago de Trinidad, con la particularidad de que en él se han encontrado restos fósiles en perfecto estado de conservación de tigres, diente de sable, mastodontes, camellos y otros animales prehistóricos que supuestamente cayeron al lago en forma accidental hace más de treinta mil años.

A partir de la fecha en que se inició la explotación petrolera para la obtención de energéticos, gran parte del asfalto que desde entonces se consume en el mundo, se obtiene como subproducto de la destilación del petróleo.

#### d) Reciclaje

Conforme transcurre el tiempo, el poder económico de construcción, se ha venido reduciendo dando por resultado un incremento bastante notable en el costo de los materiales, esto ha sido debido a: Procesos inflacionarios, escasez de energéticos, carencia de fondos, costo de materiales, etc.. Por otro lado el desarrollo de daños en las carreteras es más rápido que la reparación de las mismas. Para solucionar tal problema tenemos nuevas técnicas, tales como el reciclado.

Los objetivos básicos del reciclamiento de los pavimentos asfálticos son los mismos que los de cualquier industria: (1) Resolución de un problema de reposición, y (2) salvar la materia prima valiosa contenida en el material descartado.

Los costos del reciclamiento son primeramente consecuencia del costo del equipo, mano de obra y transportación. Además, como no se usan ni agregado ni asfalto nuevos, el costo del material es comunmente menor, lo que constituye la principal atracción económica del reciclamiento.

Todas o parte de las operaciones de reciclamiento pueden efectuarse en el lugar o fuera de él ( en otro sitio ) y pueden hacer

se ya sea en caliente o en frío. El reciclamiento puede involucrar la profundidad total de un pavimento o solamente la parte superior de 5 cms. de espesor, lo cual se conoce como reciclamiento superficial. El reciclamiento superficial en el sitio - (in situ) es el menos caro y el más simple. Sin embargo, el reciclamiento superficial, solamente es apropiado si la base y sus condiciones estructurales son adecuados. Es de esperarse que el reciclamiento superficial será más ampliamente usado en calles y caminos secundarios.

Los aspectos básicos que deben considerarse en todas las operaciones de reciclamiento son los mismos.

Los pasos ejecutados son también los mismos, y consisten en: (1) desbastar el pavimento viejo, (2) analizar su composición, (3) determinar la cantidad requerida de agente rejuvenecedor, - (4) mezclar los ingredientes, lo cual en algunos casos, puede incluir pequeñas cantidades de agregados y asfalto nuevos y (5) tender el pavimento reciclado.

El comportamiento mecánico del asfalto y de los agregados, así como de las mezclas de los dos está gobernado por las leyes de la física. Los principales factores que deben considerarse son los efectos de la temperatura y de las fuerzas mecánicas aplicadas. Esta es el área donde el equipo eficiente es más importante. debido a la previsión de los fabricantes de equipo, actualmente se tiene disponible maquinaria que proporciona, en el lugar o fuera de él, mezclado efectivo y calentamiento cuando se requiera. Se está desarrollando nuevo equipo para cumplir con las necesidades y adaptarse con los procedimientos de procesamiento mejorados. - Los fabricantes de equipo están muy avanzados en el campo de la pavimentación. La investigación química ha creado agentes rejuvenecedores que pueden reconstituir los cementos asfálticos enveje

cidos hasta una calidad superior en durabilidad al asfalto originalmente empleado en el pavimento viejo y, aún superior, a la de muchos asfaltos que cumplen solamente los requerimientos de la - especificación física. La composición de los agentes rejuvenecedores puede especificarse, ahora, para asegurar la compatibilidad deseada con todos los asfaltos envejecidos, y un alto grado de - durabilidad del asfalto nuevamente formado.

El requerimiento importante de que el agente rejuvenecedor de be impartir ligazón a la mezcla, es olvidado con frecuencia. La ligazón es necesaria no sólo para desarrollar la cohesividad de la mezcla durante la compactación, sino también adhesión y fusión de las capas, si un pavimento es tendido en dos o más niveles.

El reciclamiento de los pavimentos asfálticos ha alcanzado un nivel tecnológico que asegura el éxito en cualquier obra de reci clamamiento con la condición de que sean observados los principios científicos adecuados y que se use el equipo apropiado. Se ha mos trado que la química del asfalto no es tan compleja como se cree comúnmente, sino que puede entenderse fácilmente si se reduce a lo fundamental y se ve al asfalto constituido de cinco fracciones con propiedades específicas relacionadas con el comportamiento - del asfalto total.

CAPITULO II  
METODOS TRADICIONALES

Pavimento.- Un pavimento puede definirse como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidas entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento; cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito.

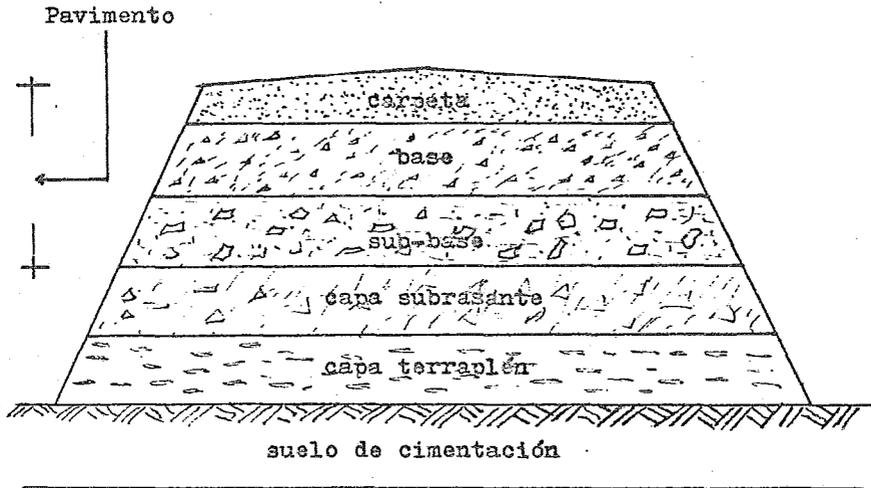


FIGURA A-1.- Sección transversal de un pavimento.

Es decir, el pavimento hace posible el tránsito de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía previstos en el proyecto. Para la disposición de las diferentes capas que conforman la estructura vial, así como las características de los materiales empleados en su construcción, tenemos una gran variedad de posibilidades, de manera que la estructura puede estar formada por una sola capa o por varias, estas capas pueden ser de materiales naturales seleccionados, sometidos a diversos tratamientos. Para la superficie de rodamiento, podemos tener algunas opciones: una carpeta asfáltica, una losa de concreto hidráulico o una superficie de rodamiento formada por acumulaciones de materiales pétreos compactados. Como se ve, tenemos una gama muy diversa de secciones estructurales diferentes, y la tarea del ingeniero es elegir la más apropiada, de acuerdo a las condiciones específicas del caso que se trate.

De una forma arbitraria, pero con fines prácticos, los pavimentos se dividen en flexibles y rígidos. Aunque la flexibilidad o rigidez no es fácil de definir, su uso ha sido tan ampliamente difundido que se considera adecuado conservar dicha clasificación.

Por lo arriba expuesto, se considerará un pavimento rígido el que lleva una losa de concreto hidráulico, como elemento resistente; y el que lleva una carpeta asfáltica o carpeta de material pétreo compactado, se considerará pavimento flexible. Además, en este capítulo incluimos el reciclaje, como una nueva técnica para la construcción y reparación de carreteras, teniendo como punto de partida la recuperación y reuso de los materiales de los pavimentos asfálticos existentes. De no efectuarse un mantenimiento oportuno y a tiempo se presentarán irremediablemente, daños tanto en la carpeta asfáltica como en las capas inferiores, de ahí la importancia de un mantenimiento oportuno.

### a) PAVIMENTO ASFALTICO

El pavimento asfáltico o flexible, está formado por una capa bituminosa apoyada sobre otras dos capas, base y sub-base, cuya calidad del material que las constituyen es descendente. La razón de capas sucesivas, es para que la magnitud de la carga pueda disminuirse con la profundidad.

Hablemos ahora del sistema con que generalmente se construyen los pavimentos asfálticos en la actualidad, y discutir el papel que se asigna a cada una de las diferentes capas. En la figura A-2 se muestra una estructuración típica para una sección en terraplén, en este caso un balcón.

Como ya lo dijimos, bajo la carpeta asfáltica, formada por una mezcla de material pétreo y un aglutinante asfáltico, que constituye la superficie de rodamiento, se encuentran las dos capas tantas veces mencionadas: la base, de material granular de buena calidad y la sub-base, formada, también por un suelo granular, aunque de menor calidad que el de la base; entre mayor alejamiento se tenga con la superficie de rodamiento, llegarán esfuerzos de menor intensidad.

La sub-base descansa generalmente sobre otra capa, denominada subrasante, con requisitos de calidad menores que la sub-base, por la misma razón, pero cuyo papel fundamental mecánico y económico se discute cada vez menos.

El material convencional de la terracería aparece bajo la subrasante, tratado mecánicamente casi sin excepción, por lo menos en lo que toca a la compactación.

En el pasado, ha sido objeto de relativamente poca atención el establecimiento del comportamiento conjunto de la terracería con la estructura del pavimento, y por lo mismo, existe poco escrito sobre él en la literatura especializada. Pero de algunos hechos -

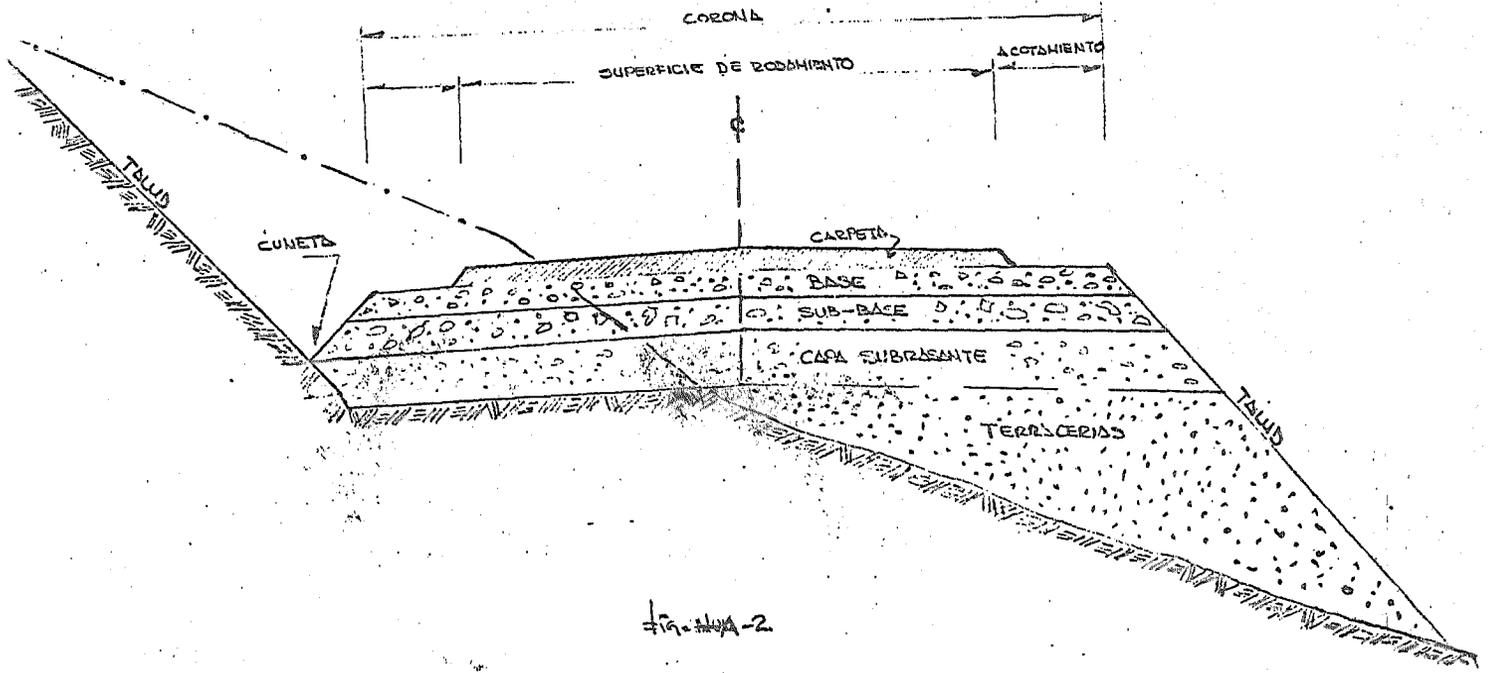


Fig. 111-2

experimentales, pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

La primera, es razonable pensar que la resistencia de los suelos al esfuerzo cortante no es requisito importante en las terracerías; los niveles de esfuerzo que a ellas llegan a través de todo el espesor que forma el pavimento, quedan siempre por debajo de la capacidad de carga a la falla de cualquier material de terracería, de acuerdo con otros requisitos que en seguida se mencionan.

Como segundo punto, tenemos que la deformabilidad parece ser determinante para la aceptación o rechazo de un material de terracería, y por lo tanto, el que condiciona su comportamiento como soporte de un pavimento. Desde este punto de vista serán fundamentales todos los conceptos que contribuyan a que el material de terracería sea poco deformable. Un papel importante juega la calidad de los materiales, sobre todo en dos casos extremos, que corresponden a materiales con gran cantidad de fragmentos grandes y a los materiales que tienen predominio de los tamaños más pequeños que es común encontrar en los suelos.

Una terracería deformable obligará al uso de pavimentos con espesor considerable, que logre que los esfuerzos transmitidos lleguen a niveles suficientemente bajos, por lo que nos queda agregar: si la deformabilidad no se toma suficientemente en cuenta en el diseño del pavimento, como tantas veces sucede, nunca se tendrá un pavimento con un buen comportamiento en ese lugar, aunque tenga un mantenimiento constante.

Tenemos otro punto que se relaciona con el anterior, la acción climática que ha sido mencionada como el punto fundamental a cuidar para tener una terracería con buen comportamiento como apoyo del pavimento. Sin embargo, la afirmación merece discutirse.

Al decir "acción climática" se entiende, a veces, efecto de va

riación estacional y se cree que éste debe ser muy marcado y de grandes repercusiones en la vida de la carretera; esto es lo que parece no suceder y este criterio es el que, según indican investigaciones efectuadas, ha de ser revisado. Todo indica que, una vez construido un camino, se alcanza después de algún tiempo una condición de equilibrio y que ésta es relativamente independiente de los cambios estacionales, por lo menos en México. Naturalmente, que la condición de equilibrio que alcance dependerá, entre otras cosas, del clima prevaeciente en la zona, en el sentido general; pero también influye la conformación topográfica y geológica y la relación que con estos tipos de accidentes guarde el trazo general de la vía.

En el cuarto punto, el papel importante que tiene la capa subrasante en el comportamiento conjunto de un pavimento y su material de terracería. Aparte de la importante función, de la subrasante, desde el punto de vista mecánico, mencionaremos una consideración de orden económico. Una subrasante de suficiente espesor y calidad permitirá importantes ahorros en los espesores del pavimento, sin perjuicio de la función estructural conjunta, pues será capaz de absorber niveles de esfuerzo relativamente altos provenientes de la superficie y transmitirlos suficientemente disminuidos a las terracerías. Desde el punto de vista económico resultan igualmente importantes la calidad y el espesor; los materiales de la capa subrasante nunca pueden ser demasiado buenos, de manera que la contribución de la capa descansa más en el espesor que en la calidad, pero si se logra una buena calidad en los materiales de la subrasante podrán tenerse los más importantes ahorros en las capas del pavimento.

FUNCION Y CARACTERISTICAS DE LAS DIFERENTES CAPAS DE UN PAVIMENTO TERRENO DE CIMENTACION.- De su capacidad soporte depende en gran

parte el espesor que debe tener un pavimento, sea éste flexible o rígido, y tiene por objeto:

a) Si el terreno de cimentación es pésimo, debe desecharse el material que lo compone, siempre que sea posible, y substituirse por otro de mejor calidad.

b) Si el terreno de cimentación es malo, habrá que colocar una sub-base de material seleccionado antes de poner la base.

c) Si el terreno de cimentación es regular o bueno, podría prescindirse de la sub-base.

d) Si el terreno de cimentación es excelente, podría prescindirse de la sub-base y base.

SUB-BASE.- Es la capa de material seleccionado que se coloca encima de la subrasante, tiene por objeto:

a) Servir de capa de drenaje al pavimento.

b) Controlar, o eliminar en lo posible, deformaciones perjudiciales en la subrasante.

c) Controlar la ascensión capilar del agua proveniente de las capas freáticas cercanas, o de otras fuentes, protegiendo así el pavimento contra los hinchamientos de las heladas.

El material de la sub-base debe ser seleccionado y tener mayor capacidad de soporte que el terreno de cimentación compactado. Dicho material puede ser: arena, grava, granzón, escoria de los altos hornos o residuos del material de cantera. En algunos casos se puede emplear el material de la subrasante mezclado con granzón, cemento o algún otro material.

BASE.- Esta capa tiene por finalidad absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos y, además, repartir uniformemente estos esfuerzos a la sub-base y al terreno de cimentación. El material de la base puede ser granular, o estar formado por mezclas bituminosas o mezclas estabilizadas con cemento u

otro material ligante.

El material para construir la base, deberá llenar los siguientes requisitos: Ser resistente a los cambios de húmedad y temperatura. La fracción del material que pase la malla N<sup>o</sup> 40, debe tener un límite líquido menor del 25%, y un índice de plasticidad inferior a 6. La fracción que pase la malla N<sup>o</sup> 200 no debe exceder de un medio, y en ningún caso de los 2/3 de la fracción que pasa la malla N<sup>o</sup> 40. La graduación del material de la base, debe hallarse dentro de los límites indicados en la figura A-3. El CBR debe ser superior a 50%. No presentar cambios de volumen que sean perjudiciales.

Por lo general, para la capa de la base se emplea piedra triturada, grava o mezclas estabilizadas de suelo-cemento, suelo bituminoso, etc.

CARPETA.- La carpeta debe proporcionar una superficie de rodamiento adecuado, con color y textura conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito. Además, tratar de evitar la introducción de agua hacia el interior del pavimento, es decir, proteger la base impermeabilizando la superficie contra posibles infiltraciones del agua de lluvia que podrían saturar parcial o totalmente las capas inferiores. La carpeta también protege a la base contra el desgaste y desintegración debido al tránsito de los vehículos.

Asimismo, la carpeta contribuye, en cierto modo, a aumentar la capacidad soporte del pavimento, especialmente si su espesor es apreciable (mayor de tres pulgadas).

#### MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Como el comportamiento de un terreno depende, en gran parte, de sus características físicas; composición granulométrica, plasticidad, etc., se han sugerido basándose en dichas característi--



cas, varios métodos para el cálculo de espesores de pavimentos -- flexibles.

La mayoría de estos métodos, están basados en pruebas de penetración de carga, y sólo pueden ser aplicados en el sistema en -- que se desarrolla el propio método. Estos métodos, si bien empíri--cos, son el resultado de un gran número de observaciones efectua--das en el terreno, complementadas con trabajos de investigación -- en los laboratorios de ensayo de materiales.

El sistema de prueba más utilizado es el Valor Relativo de So--porte de California, el cual tiene distintas variantes como son: el método original del Estado de California, el del Cuerpo de In--genieros del Ejército de EUA, entre otros.

Los métodos pertenecientes a este grupo son sencillos, pero re--quieren experiencia en el laboratorio y en el campo, porque una --clasificación equivocada de un suelo da lugar a interpretaciones falsas, perjudicando el diseño definitivo del pavimento.

Los métodos de diseño que describiremos aquí son: Índice de -- Grupo, Método de la SAHOP, Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

#### METODO DE INDICE DE GRUPO

Este método se basa principalmente, en su composición granulo--métrica y grado de plasticidad. Por lo tanto, para clasificar un suelo bastará, según este método, efectuar el análisis mecánico y determinar los límites líquido y plástico del material.

Aquellos suelos que tienen un comportamiento similar se hallan dentro de un mismo grupo, representado por un determinado índice. La clasificación de un suelo en un determinado grupo se basa en -- su grado de plasticidad y en el porcentaje de material fino que -- pasa el tamiz número 200.

Cuando se indica un Índice de Grupo, hay que colocarlo entre --

parentesis. Así por ejemplo, A-4 (8) querrá decir un suelo A-4 cuyo índice de grupo es 8.

Los índices de grupo pueden determinarse fácilmente, ya sea mediante la fórmula empírica (I), que indicamos a continuación, o bien mediante las gráficas de la figura A-4.

$$\text{INDICE DE GRUPO} = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd \quad \text{--- (I)}$$

donde:

a = Porcentaje del material que pasa la malla N°200 menos 35, si el porcentaje es mayor de 75 sólo se anotará 75, y si es menor de 35 se anotará 0.

b = Porcentaje del material que pasa la malla N°200 menos 15, si el porcentaje es mayor de 55 sólo se anotará 55, y si es menor de 15 se anotará 0.

c = El valor de límite líquido menos 40. Si el límite líquido es mayor de 60 sólo se anotará 60, y si es menor de 40 sólo se anotará 0.

d = El valor del índice de plasticidad menos 10. Si el índice de plasticidad es mayor de 30 sólo se anotará 30, y si es menor de 10 se anotará 0.

Los valores de a, b, c y d deberán indicarse con números enteros.

Ejemplo: Un suelo A-5 tiene 65% de material fino que pasa la malla N°200, un límite líquido de 58%, y un índice de plasticidad de 9. Se desea determinar su índice de grupo.

Solución:

$$a = 65 - 35 = 30$$

b = 55 - 15 = 40      El porcentaje que pasa la malla N°200 es mayor de 55. Sólo se pone 55.

$$c = 58 - 40 = 18$$

d = 0      Se anota 0, por ser el índice de plasticidad menor de 10.

Luego, el Índice de Grupo será:

$$\begin{aligned} IG &= (0.2 \ 30) + (0.005 \ 30 \ 18) + (0.01 \ 40 \ 0) = \\ &= \quad 6 \quad + \quad 2.7 \quad + \quad 0 \quad = \\ IG &= 8.7 \end{aligned}$$

Como sólo se indican números enteros , el índice de grupo sera:

$$IG = 9.0$$

Haciendo uso de las gráficas indicadas en la figura A-4, el índice de grupo será igual a la suma de los valores obtenidos en las ordenadas de ambas gráficas. Así tendremos:

Fracción del índice de grupo correspondiente al límite líquido:

$$\text{Límite Líquido} = 8.7$$

Fracción del índice de grupo correspondiente al índice de plasticidad:

$$\text{Índice de Plasticidad} = 0.0$$

$$\text{Sumando: LL} + \text{IP} = 8.7$$

El Índice de Grupo será 9.0

Vemos pues, que se obtiene el mismo valor de 9.0 para el Índice de Grupo, ya sea mediante la fórmula I, o haciendo uso de las gráficas de la figura A-4.

**CALCULO DE ESPESORES.**- Para el cálculo de espesores de las capas del pavimento tomando en cuenta el Índice de Grupo, la carga por rueda que se considera es de 4086 kg (9000 lb).

Una vez determinado el respectivo índice de grupo de un suelo, pueden calcularse los espesores de sub-base, base y capa de rodamiento, por medio de los gráficos indicados en la figura A-5.

Téngase siempre presente que estos gráficos han sido preparados para las condiciones siguientes:

a) Para terrenos de cimentación debidamente compactados a humedad óptima y densidad máxima (no menos del 95% de la densidad máxima obtenida por el método Standard AASHOT-99).

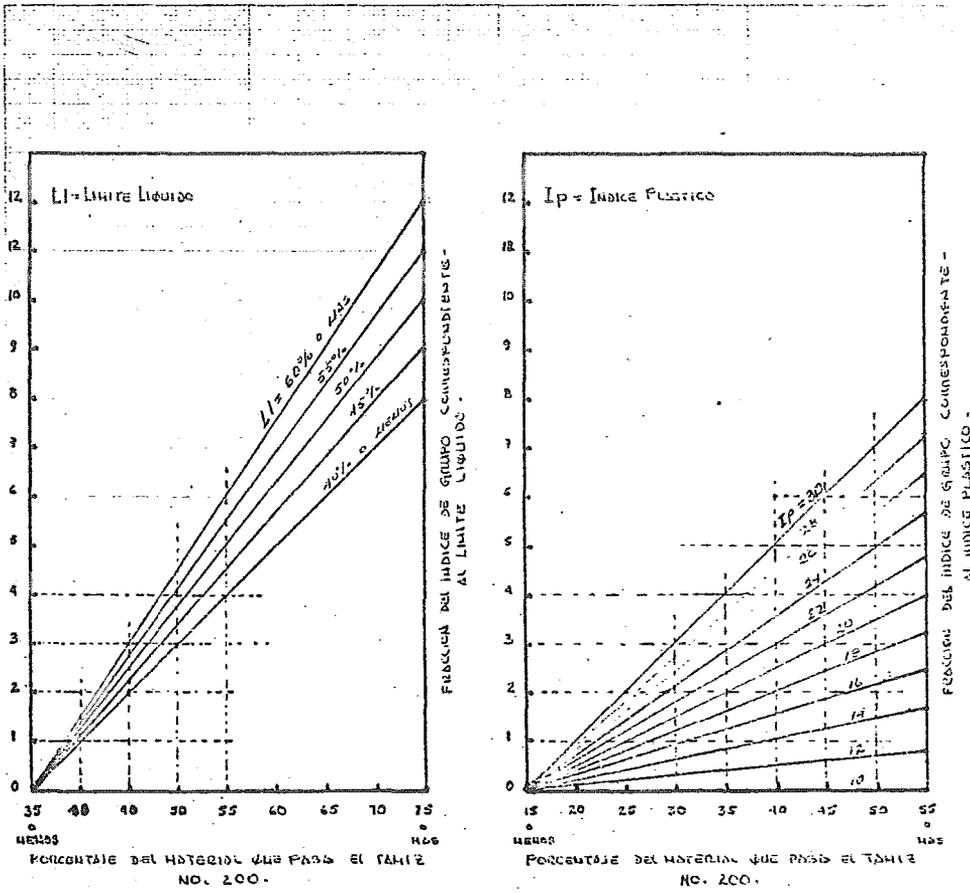


FIGURA ( 8 ) .- Diagramas para determinación del Índice de Grupo .  
A-4

b) Para sub-bases y bases compactadas a no menos del 100% de su densidad máxima.

Se supone, asimismo, que los sistemas de drenaje, subterráneo y superficial, son buenos, y que el nivel de la capa freática se encuentra a una profundidad no perjudicial para la estabilidad del terreno de cimentación (mayor de 2m).

TIPOS DE TRANSITO.- Los diferentes tipos de tránsito que se consideran en este método para la determinación de espesores son los siguientes:

Tránsito liviano es aquel que tiene una intensidad comercial menor de 50 camiones y autobuses diarios.

Tránsito mediano es aquel cuya intensidad comercial está comprendida entre 50 y 300 camiones y autobuses diarios.

Tránsito pesado es aquel que tiene una intensidad comercial mayor de 300 camiones y autobuses diarios.

En todos los casos anteriores, se supone que un máximo de 15% de los vehículos, tiene una carga por rueda de 4086 kg (9000 lb).

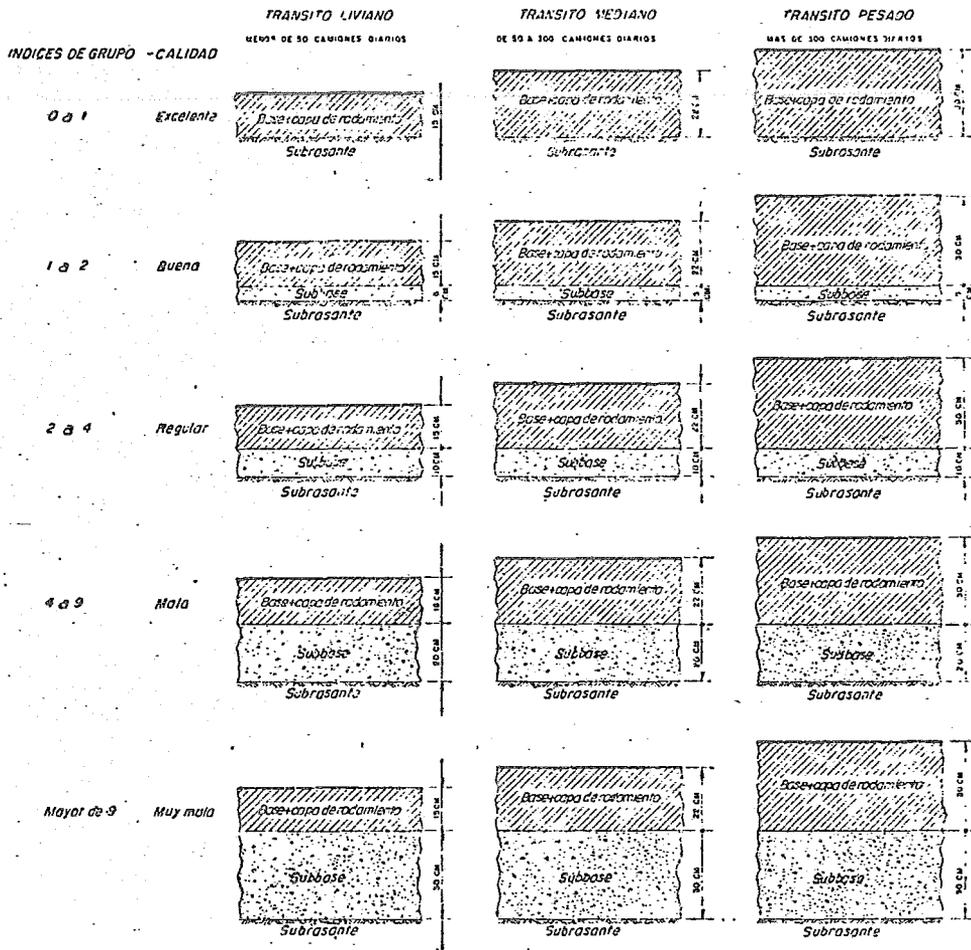
Ejemplo.- Diseñar el pavimento flexible para una carretera cuyo terreno de cimentación esté formado por un suelo arcilloso del tipo A-6. El tránsito que se prevé es de 500 camiones y autobuses diarios, de los cuales aproximadamente un 10% tendrán cargas por rueda de 4086 kg (9000 lb). El índice de grupo del material del terreno de cimentación es 9.

Se recomienda colocar una carpeta de concreto asfáltico de 7.5 cm (3") de espesor.

El tránsito es de tipo pesado.

Solución: Para un terreno de cimentación cuyo índice de grupo es 9, y para un tránsito pesado, tendremos según el gráfico de la figura A-5, lo siguiente:

Sub-base de material seleccionado - - - - 20 cm



NOTA: Los espesores para "SUBBASE" deberan disminuirse a la mitad, si el material es granular (granzon).

FIGURAS 40-101. — Espesores de pavimento flexible para diferentes indices de grupos.

A-3

Base granular - - - - 22.5 cm  
Carpeta asfáltica - - - 7.5 cm  
Suma total del pavimento nos da 50.0 cm

Si en lugar de la sub-base de material seleccionado, se coloca una capa adicional granular, esta base adicional tendría un espesor de 10 cm, es decir la mitad que la sub-base original, quedando el espesor total del pavimento de 40 cm.

#### METODO DE LA SAHOP

Este método, toma únicamente como variantes importantes dos conceptos que son: la intensidad de tránsito y la resistencia a la penetración de los materiales (VRS).

Para la determinación de los espesores, nos basamos en la gráfica de la figura A-6, donde intervienen las dos variables enunciadas anteriormente.

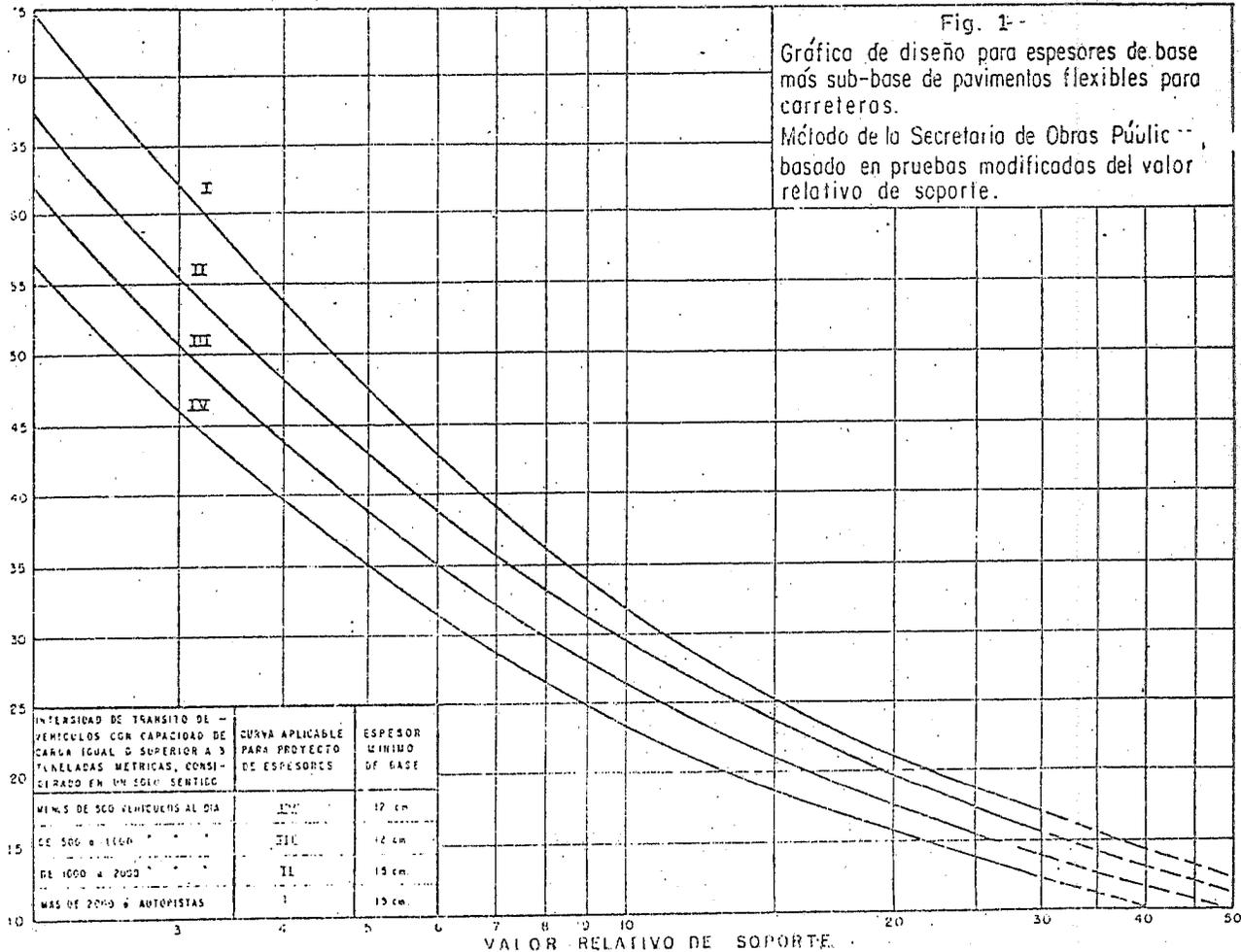
La intensidad de tránsito está condicionada a vehículos con capacidad igual o superior a tres toneladas métricas, en un solo sentido (del tránsito).

El espesor de la carpeta asfáltica, se determina en base a la experiencia obtenida al construir caminos semejantes al proyecto, esta capa varía, desde carpeta construida por el sistema de riegos ligeros, mezcla en el lugar, hasta una de concreto asfáltico, esto dependiendo fundamentalmente de la intensidad del tránsito, condiciones climatológicas, etc.

Ejemplo.- Calcular el espesor del pavimento para una carretera, con una intensidad de tráfico de 2350 vehículos al día, con un peso mayor de 3 toneladas.

Si el VRS del material que forma la capa subrasante es de 8.5%.

Solución: Una vez con los datos necesarios nos vamos a la gráfica de la figura A-6. Para la subrasante tomamos el mínimo por especificación que es de 30 cm.



De la gráfica obtenemos que el espesor de la base más sub-base nos da 35 cm, pero el espesor mínimo para base es de 15 cm (también obtenido en la gráfica). El espesor de la carpeta es de 5 cm.

Resumiendo, los espesores de las capas quedan así:

carpeta asfáltica	5.0 cm
base	15.0 cm
sub-base	20.0 cm
subrasante	30.0 cm
total	70.0 cm

#### METODO DEL INSTITUTO DE INGENIERIA DE LA UNAM

Este método se basa en la teoría de distribución de esfuerzos verticales de Boussinesq, deducida para una carga estática, circular, flexible, apoyada uniformemente en la superficie de un medio elástico, homogéneo e isótropo. Y como caso particular, considera la estructura de capas múltiples y resistencia relativa uniforme, sujeta a cargas repetidas de un eje sencillo equivalente, cuyo peso estático por definición es de 8.2 toneladas y que tiene un coeficiente de impacto constante.

Las características principales de este método son:

a) Elimina el concepto de dualidad terracería-pavimento; substituyendolo por el concepto monolítico de sección estructural de la carretera. Se analizan todas las componentes (capas), adecuándolas a las exigencias, de manera que la sección resista en cada nivel lo necesario.

b) Considera la carretera como una sección estructural, como se hace con cualquier estructura de la ingeniería civil.

c) El diseño del pavimento se desarrolla utilizando las gráficas que se presentan, y se refiere a estructuras en las cuales el espesor de carpeta no excede de 7.5 cms de espesor real.

d) El coeficiente de equivalencia de la carpeta de concreto ag

fáltico respecto a la base (hidráulica) es de 2, o sea que 1 cm de concreto asfáltico equivale a 2 cms de base hidráulica.

e) En rigor en el método de diseño, se calcula el tránsito equivalente (en ejes de 8.2 ton) en las diferentes capas que constituyen la sección estructural, utilizando para ello los coeficientes de daño determinados a diferentes profundidades (mediante la curva de distribución de esfuerzos verticales de Boussinesq, suponiendo una presión de concreto igual a presión de inflado de la llanta y vehículo que se analiza). Sin embargo la investigación llevada a cabo señala que una profundidad  $Z = 15$  cm es el valor más adecuado para el diseño.

f) El diseño se desarrolla, para un nivel de rechazo de 2.5 en la escala de servicio de 0.5, para una carretera de importancia y en condiciones normales. Y un nivel de rechazo de 2.0-2.5 para caminos secundarios en condiciones favorables.

g) El VRS de diseño se determina:

$$VRS = VRS (1-CrVv)$$

donde:

VRS = Estimación del valor relativo de soporte crítico esperado en el campo en la capa colocada a la profundidad  $Z$ .

VRS = Valor promedio de las determinaciones de VRS a la profundidad  $Z$ .

Cr = Factor que depende del nivel de confianza establecido (usualmente se adopta un nivel de confianza del 90% que equivale a un coeficiente de 1.282).

Vv = Coeficiente de variación. Este valor debe estar acorde con el nivel de calidad de la obra y el proceso de construcción y se mueve en los siguientes rangos:

Esta pequeña tabla con dichos rangos se encuentra en la siguiente hoja.

Calidad del proceso de construcción	Valor del coeficiente de variación
Muy buena	0.3
Buena	0.4
Regular	0.5

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO.- Los pasos a seguir son:

1) Se obtiene el número de vehículos en ambas direcciones del camino.

2) Determinar el coeficiente de distribución de vehículos en - ambos carriles. (%)

Número de carriles en ambas direcciones	Coeficiente de distribución para el carril de proyecto
2	50
4	40--50
6 o más	30--40

3) Obtenemos el número de vehículos en el carril de proyecto.

4) Mediante un coeficiente obtenemos el número de vehículos -- cargados y el número de vehículos vacíos.

5) Mediante la curva de Boussinesq, obtenemos los coeficientes de daño que causa cada uno de los tipos de vehículos a la profundidad de diseño (  $Z = 15$  cms y  $Z = 20$  cms ).

6) Obtenemos el número de ejes equivalente de 8.2 ton en el carril del proyecto (esto va a ser el tránsito actual).

7) Obtenemos mediante una gráfica, o bien con un modelo matemático, el tránsito a futuro (dependiendo de la vida útil a que se diseña el camino) y este será nuestro tránsito de proyecto en ejes equivalentes.

8) Con el VRS crítico de cada capa (terracería, subrasante, -- sub-base y base) y el tránsito de proyecto, mediante una gráfica (ya sea para un nivel de rechazo de 2.5 o para 2.0-2.5) obtenemos

el espesor que quedará sobre cada capa en cuestión.

9) Por último se diseñará la carpeta asfáltica.

Ejemplo.- Se tiene una carretera de 2 carriles, cuya composición de tránsito se indica en la tabla TPA (tránsito promedio anual).

Solución: Se valdrá de las tablas siguientes:

Tabla para cálculo del tránsito acumulado en función de ejes sencillos (figura A-7).

Coefficiente de daño por tránsito para vehículos típicos.

Gráfica para estimar el tránsito equivalente acumulado (figura A-8).

Modelo matemático para calcular espesores.

Tránsito equivalente ( $Z = 0$ ) = 9200 (195.57)  
= 1799244 ejes (8.2 Ton)

Tránsito equivalente ( $Z=15$ ) = 9200 (69.47)  
= 639124 ejes (8.2 Ton)

Para diseño tomamos 639 124 (tránsito de proyecto)

VRS terracerías	2.1%	
VRS subrasante	5.4%	Son datos obtenidos en
VRS sub-base	16.0%	pruebas de campo.
VRS base hidráulica	80.0%	

Con el valor de 639 124 se aproxima a  $10^6$  y se entra a la tabla de modelo matemático y con el VRS de 2.1% de terracerías; se obtiene que el espesor será de 80 cms.

Espesores reales (de tablas)

Subrasante = 80 - 50 = 30cms

sub-base = 50 - 25 = 25 cms

Base = 80 - 55 = 25 cms

De la tabla (modelo matemático) para espesores mínimos:

$$2 D_1 = 10 \text{ cm} \quad \text{carpeta}$$

$$D_2 = 12.5 \text{ cm} \quad \text{base}$$

$$D_1 = 5 \text{ cm} \quad (\text{por especificación})$$

$$a_1 D_1 + a_2 D_2 = 25 \text{ cm}$$

$$10 + 1 D_2 = 25 \text{ cm}$$

$$D_2 = 15 \text{ cm}$$

Sección final:

Carpeta asfáltica = 5 cm

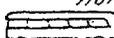
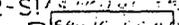
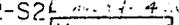
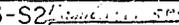
Base = 15 cm

Sub-base = 25 cm

Capa subrasante = 30 cm

Carretera \_\_\_\_\_ Tramo \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

Notas \_\_\_\_\_

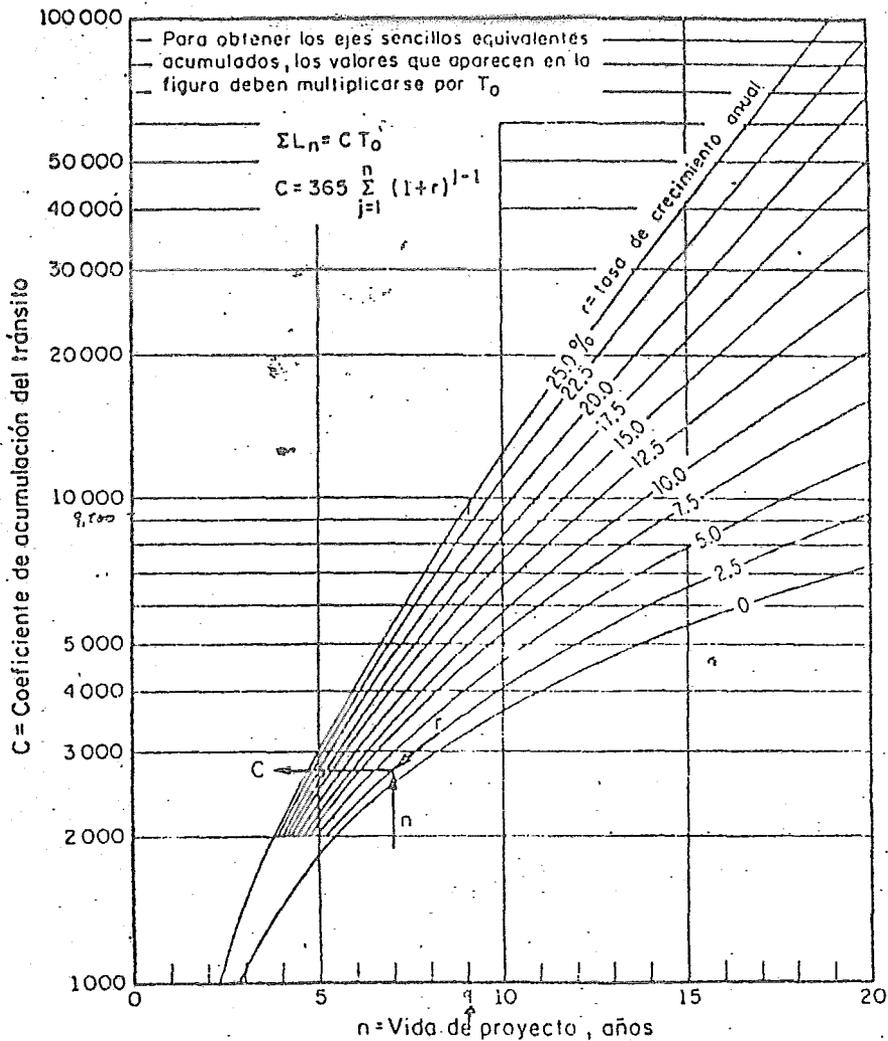
TIPO DE VEHICULO	Número de vehículos en ambas direcciones	Coeficiente de distribución	Número de vehículos en el carril de proyecto (L x S)	Coeficiente de vehículos cargados o vacíos (N <sub>1</sub> , N <sub>2</sub> )	Número de vehículos cargados o vacíos por carril (N <sub>1</sub> , N <sub>2</sub> )	Coeficientes de daño por tránsito, F, F'		Número de ejes equivalentes de 8.2 ton	
						z=0 cm	z=15 cm	N <sub>1</sub> , N <sub>2</sub>	
								z=0 cm	z=15 cm
Ap <i>Rute</i> 	124.64	0.5	61.32	C: 1.00 V: 0.0	61.32 0.0	0.005	0	0.31	0
Ac <i>Lumineta pick-up</i> 	52.44	0.5	26.22	C: 0.30 V: 0.70	7.87 18.35	0.34	0.042	2.60	0.33
B <i>Autobuses</i> 	35.22	0.5	17.61	C: 1.0 V: 0.0	17.61 -	2.0	1.150	35.22	35.22
C2 <i>Lumineta con motor</i> 	47.90	0.5	23.95	C: 0.63 V: 0.37	31.47 12.48	0.88	0.465	27.69	19.63
C3 <i>Lumineta con motor</i> 	26.40	0.5	13.20	C: 0.79 V: 0.21	10.43 2.77	0.88	0.675	9.18	6.90
T2-S1 <i>camión de 2 ejes con cabina</i> 	7.18	0.5	3.59	C: 0.7 V: 0.3	2.51 0.96	3.0	0.740	10.84	6.31
T2-S2 <i>camión de 2 ejes con cabina</i> 	17.8	0.5	8.90	C: 0.78 V: 0.22	6.74 1.96	4.0	1.570	27.76	10.70
T3-S2 <i>camión de 3 ejes con cabina</i> 	12.58	0.5	6.29	C: 0.79 V: 0.21	5.07 1.55	5.0	1.300	36.30	9.44
Total			191.46			T <sub>0</sub> , T <sub>0'</sub> : Tránsito equivalente inicial:		175.57	69.47

NÚMERO DE CARRILES EN AMBAS DIRECCIONES	COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN PARA EL CARRIL DE PROYECTO
2	50
4	40-50
6 o más	30-40

Tasa de crecimiento anual,  $r = 9.5\%$   
 Coeficiente de acumulación del tránsito,  $C = 9.25$  de la fórmula  $T_{10}$   
 Tránsito acumulado,  $\sum L_n \cdot C T_0 = \dots$   $\sum L_n \cdot C T_0' = \dots$

Fig. A.4. Tabla para cálculo del tránsito acumulado en función de ejes sencillos equivalentes de 8.2 ton



$\Sigma L_n$  tránsito acumulado al cabo de  $n$  años de servicio, ejes equivalentes de 8.2 ton

$C$  coeficiente de acumulación del tránsito, para  $n$  años de servicio y una tasa de crecimiento anual  $r$

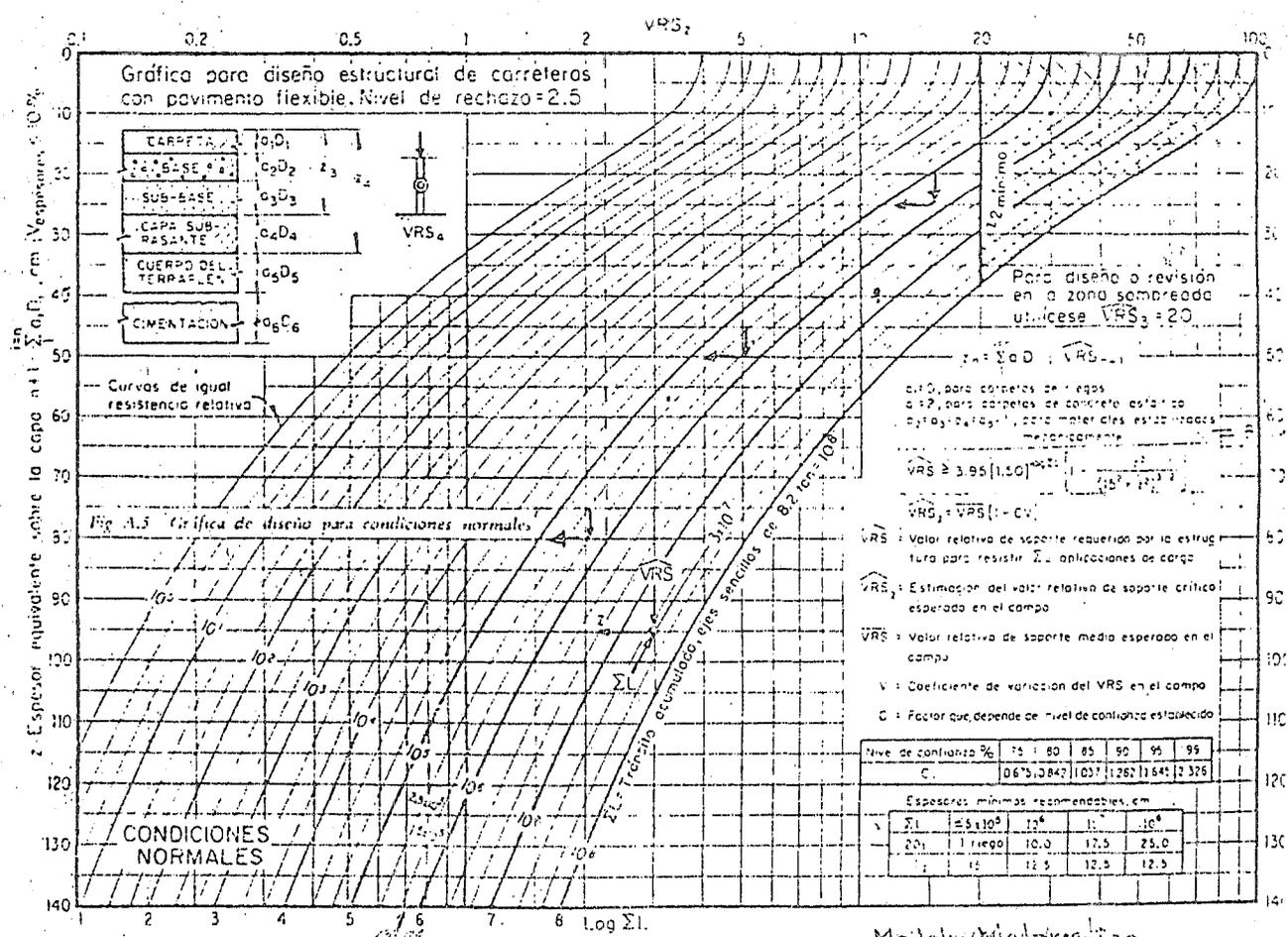
$T_0$  tránsito medio diario por carril en el primer año de servicio, ejes equivalentes de 8.2-ton

$$T_0 = \Sigma N_i F_i + \Sigma N_i' F_i'$$

$N_i, N_i'$  promedio diario por carril de vehículos tipo  $i$  (cargados o descargados respectivamente), durante el primer año de servicio

$F_i, F_i'$  coeficiente de daño relativo producido por cada viaje del vehículo  $i$  (cargado o descargado, respectivamente), ejes equivalentes de 8.2 ton

Fig. A.3. Gráfica para estimar el tránsito equivalente acumulado



Para diseño o revisión en la zona sombreada utilícese  $VRS_3 = 20$

$V = VaD \cdot VRS_{-1}$

$a = 0$ , para carpetas de riegos  
 $a = 2$ , para carpetas de concreto estriado  
 $a = 0.5$ , para materiales estratificados horizontalmente

$VRS \geq 3.95 [1.50]^{0.25}$

$VRS_1 = VRS [1 - CV]$

$VRS_1$ : Valor relativo de soporte requerido por la estructura para resistir las aplicaciones de carga

$VRS_2$ : Estimación del valor relativo de soporte crítico esperado en el campo

$VRS_3$ : Valor relativo de soporte medio esperado en el campo

$V$ : Coeficiente de variación del VRS en el campo

$C$ : Factor que depende de nivel de confianza establecido

Módulo de elasticidad  $E$

## b) PAVIMENTO HIDRAULICO

Las condiciones de las losas de pavimento de concreto están regidas por las propiedades de las infraestructuras, así como de las capas de asiento. El concreto soporta esfuerzos de compresión relativamente elevados, pero tiene muy poca resistencia a la tensión. Debido a su resistencia baja a la tensión, la resistencia a la flexión de las losas también es baja. El concreto, como otros materiales, se dilata o se contrae cuando la temperatura aumenta o disminuye. También se encoge inmediatamente después del colado a medida que el mortero se endurece y el cemento se hidrata. Bajo ciertas condiciones el volúmen aumenta con la edad.

Los cambios en la temperatura y en el contenido de humedad no solamente crean alabeos y esfuerzos de flexión, sino que también ocasionan un alargamiento y un acortamiento global de las losas. Si las losas estuvieran perfectamente libres para moverse, estos cambios volumétricos tendrían lugar sin producir esfuerzos. Sin embargo, las infraestructuras sobre las que los pavimentos descansan, ofrecen una considerable resistencia al movimiento horizontal. De tal modo, la tendencia de las losas a acortarse debido a la baja de temperatura o al secado crea esfuerzos de extensión, mientras que la tendencia a alargarse debido al aumento de la temperatura o al aumento de la humedad crea esfuerzos de compresión.

### SUB-BASE Y SUELOS DE APOYO DEL PAVIMENTO HIDRAULICO

Como ya se dijo, un pavimento rígido tiene como elemento estructural fundamental una losa de concreto. Esta se apoya sobre una capa de material seleccionado, a la que se da el nombre de sub-base; cuando la subrasante del pavimento tenga una calidad suficientemente buena, la losa de concreto puede colocarse directamente sobre ella, prescindiéndose así de una sub-base especial.

Hasta después de la Segunda Guerra Mundial se le dió importan

cia a la sub-base, antes de esto las losas se colocaban directamente sobre el material de terracería, cuando mucho llevaba una capa subrasante.

En la actualidad se ha establecido la norma de construir una sub-base apropiada en todas las carreteras de tráfico pesado y en la mayoría de las aeropistas. Esta sub-base consiste de una o más capas de materiales granulares, muchas veces estabilizados; pero cuando la subrasante cumpla de por sí las características que se estiman deseables para la sub-base podrá evitarse construirla en forma especial.

Las principales funciones de la sub-base de un pavimento rígido son las siguientes:

- 1.- Proporcionar apoyo uniforme a la losa de concreto.
- 2.- Incrementar la capacidad portante de los suelos de apoyo, respecto a la que es común en las terracerías y capa subrasante.
- 3.- Reducir a un mínimo las consecuencias de los cambios de volumen que puedan tener lugar en el suelo que forme las terracerías o la subrasante.
- 4.- Reducir a un mínimo las consecuencias de la congelación en los suelos de las terracerías o de la capa subrasante.
- 5.- Evitar el bombeo.

Dada la rigidez comparativa de las losas de concreto y su resistencia, los esfuerzos que se transmiten a la sub-base son pequeños, por lo que la resistencia no suele ser un requisito importante. En cambio, el correcto trabajo de las losas exige que estén uniformemente apoyados y que este apoyo se mantenga en buenas condiciones durante toda la vida del pavimento; un buen apoyo debe incluir transiciones graduales en donde haya cambios abruptos en la capacidad portante del terreno, tal como suele suceder,

por ejemplo, en las transiciones de corte a terraplén o de terraplén a terreno firme, como en las secciones en balcón.

Cuando el ancho de las bandas de circulación sea tal que pueda considerarse que las ruedas de los vehículos pesados se mantienen en la zona interior de las losas, puede estimarse que el esfuerzo que llegue a la sub-base estará en el orden del 3 al 4% de la presión actuante en la superficie de la losa; esto ocurrirá con bandas de ancho superior a 3.5 m. Por el contrario, con bandas de circulación del orden de 3 m, las llantas exteriores de los vehículos pesados circulan muy cerca del borde exterior de las losas y en esas zonas se inducen en la sub-base mayores esfuerzos.

Para la sub-base de un pavimento rígido define como material ideal uno granular bien compactado, relativamente grueso y de granulometría más bien uniforme. Cuando estos materiales no se encuentran a la mano, debe tenerse presente la estabilización de materiales de mala calidad, sobre todo con cemento mejora mucho su comportamiento, especialmente en lo referente a bombeo y susceptibilidad a cambios volumétricos, además de que permite la formación de una superficie de apoyo sin accidentes y garantizar una apropiada resistencia.

Los cambios volumétricos en el terreno de apoyo, causados por cambios en el contenido de agua, puede ser causa importante para que las losas pierdan su apoyo uniforme, especialmente si se compactan en el lado seco materiales con susceptibilidad a la expansión; a los mismos problemas puede llegarse si se permite que se sequen en exceso por evaporación antes de ser cubiertos por la losa, materiales que hayan sido compactados con un contenido de agua conveniente.

La susceptibilidad a la expansión deberá vigilarse también en los materiales de terracería, porque si éstos sufren grandes cam-

bios de volumen se tendrán deformaciones de importancia en la superficie de la sub-base, con los correspondientes problemas de pérdida de apoyo, aún si la subrasante y la propia sub-base están formadas con materiales no susceptibles. Desde este punto de vista, las regiones áridas son de peligrosidad especial.

Cuando hayan de utilizarse terracerías o subrasantes expansivas, por no tener en disponibilidad otros materiales más apropiados, deberán tomarse las precauciones necesarias. La colocación de un revestimiento de material no susceptible a los cambios volumétricos, que además actúe en cierta medida como sobrecarga sobre los materiales expansivos, es probablemente la solución que más se ha usado en conexión con pavimentos rígidos. También, como se dijo, para eliminar la susceptibilidad a los cambios volumétricos de los suelos finos, la mezcla de una cierta cantidad de cemento, ha dado buenos resultados.

El bombeo es un efecto que se presenta en los pavimentos rígidos, por desgracia muy frecuente cuando no se toman medidas precautorias. Para evitar el bombeo es preciso que el material de soporte de la losa no sea muy fino. Los materiales que propician el bombeo, en ese orden, son los suelos CH, CL, MH y ML.

La experiencia parece indicar que los efectos de bombeo pueden presentarse sólo si la intensidad de tránsito es superior a 300 ó 400 vehículos diarios.

Para intensidades de tránsito superiores a 1000 vehículos diarios, además de lo anterior, se recomienda que la sub-base cumpla con los siguientes requisitos: El tamaño máximo de los materiales constitutivos no debe ser mayor que  $1/3$  del espesor de la sub-base. No debe contener más del 15% de material que pase por la malla N<sup>o</sup> 200. El índice de plasticidad del material debe ser menor que 6. El LL del material constitutivo debe ser menor que 25%.

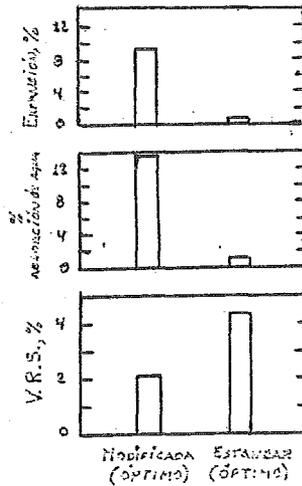
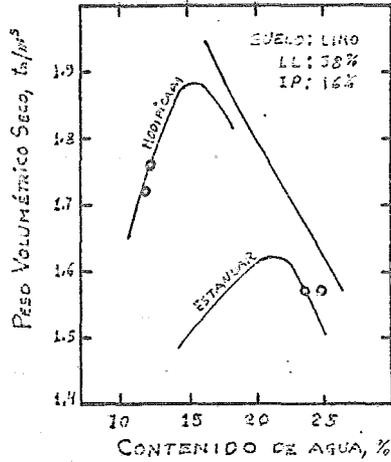


FIGURA B-1.- En la parte superior, las características de un suelo y las curvas de compactación obtenidas en las pruebas AASHO estándar y modificada. Abajo, características de expansión, absorción de agua y V.R.S. de un suelo compactado en pruebas AASHO estándar y modificada, después de construida una subrasante al alcanzar la condición de equilibrio bajo las losas de un pavimento rígido.

## DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS

Los pavimentos de concreto generalmente se diseñan con base en las ecuaciones de Westergaard, que usan el valor del módulo de reacción de la subrasante,  $k$ , obtenido de una prueba de placa, realizada sobre dicha subrasante. Desde luego, que si se coloca subbase sobre la subrasante al valor de  $k$  se le hará una corrección.

El módulo de reacción de la subrasante,  $k$ , se define con la siguiente expresión:

$$k = \frac{P}{A}$$

Donde:

$P$  es la presión que se aplica al suelo, y  $A$  es la deformación correspondiente.

Las ecuaciones de Westergaard generalmente conducen a cálculos laboriosos, por lo que en la práctica se usan poco. La Asociación de Cementos Portland (Portland Cement Association, PCA) ha desarrollado gráficas para calcular los espesores de losa sin cálculos laboriosos, pero necesitamos conocer la carga de la rueda de diseño, la presión de inflado de la llanta de diseño, el módulo de reacción de la subrasante,  $k$ , y el módulo de resistencia del concreto a la tensión en flexión,  $MR$ . El módulo de reacción influye relativamente poco en el espesor de la losa, sobre todo en cargas no muy grandes, por lo que se obtiene frecuentemente de correlaciones empíricas. El  $MR$  se expresa como un esfuerzo y puede determinarse experimentalmente probando una viga estándar, pero es más frecuente obtenerlo de correlaciones con el valor  $f'_c$ , resistencia del concreto a la compresión simple con 28 días de fraguado. Esta correlación se ve influenciada por el tipo de cemento que se use y la naturaleza de los agregados.

En general:

$$MR = 0.10 f'_c \leq 0.17 f'_c$$

Pero en México es conveniente usar el valor:

$$MR = 0.12 f'_c$$

Este valor de MR corresponde a la condición de ruptura. Porque - en las gráficas de la PCA el valor de MR que aparece es de trabajo, con un factor de seguridad de 1.75 a 2 respecto al de ruptura.

Las gráficas de diseño están obtenidas a partir de la teoría para ruedas simples, arreglo doble y tandem, colocadas en el interior de la losa. Se supone en ellas un módulo de elasticidad - del concreto de  $280000 \text{ kg/cm}^2$  ( $4 \times 10^6 \text{ lb/plg}^2$ ) y una relación de Poisson igual a 0.15 . En las gráficas correspondientes a aeropistas se supone que la carga actúa en el interior de la losa, lo que es una suposición razonable, e implica que debe existir buena unión entre las losas, con juntas apropiadas. En el caso de carreteras, se acepta que la carga está aplicada sobre la junta y que éstas tienen sus esquinas protegidas, es decir, provistas de los elementos adecuados para transmitir carga a las losas adyacentes.

La PCA recomienda un criterio para la valuación de k en la fórmula (h-1). Con el cual el valor de k se obtiene dividiendo la presión que haya producido en la placa una deflexión total de 0.13cm (0.5 plg), entre el valor de dicha deflexión.

Cuando se hace la prueba de placa, en los materiales con alto módulo de reacción, se produce alguna flexión en la placa y se distorsionan los resultados de la prueba. La figura (B-2) permite establecer una corrección por este concepto.

Los pavimentos rígidos poseen generalmente una sub-base sobre la subrasante cuyo módulo de reacción se haya calculado, de manera que resulta mejorado el apoyo de la losa. El efecto de la sub-base debe tomarse en cuenta haciendo pruebas de placa sobre ellas, pero si tal cosa no resultara práctica puede estimarse corrigiendo el valor de k correspondiente a la subrasante, para obtener el valor final con que debe entrarse en las gráficas de diseño. La figura (B-3) proporciona los medios para establecer tal corrección.

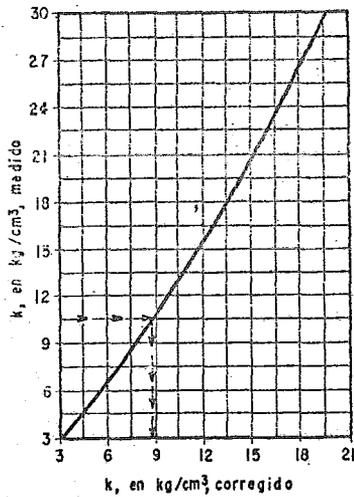


FIGURA B-2.- Gráfica para - corregir el valor de k por flexión en la placa.

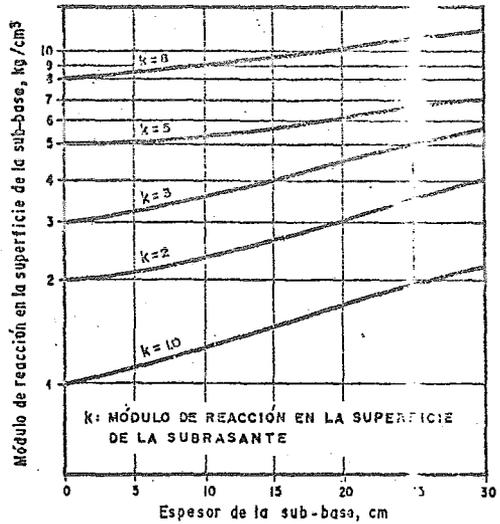


FIGURA B-3.- Gráfica para obtener el valor de k sobre la sub-base, conocido el mismo, sobre la subrasante. Sub-bases no estabilizadas.

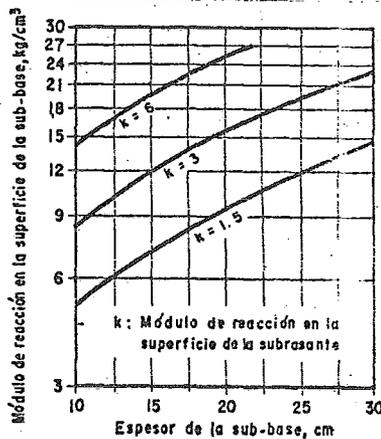


FIGURA B-4.- Gráfica para obtener el valor de k sobre la sub-base, conocido el mismo sobre la subrasante. Sub-bases estabilizadas con cemento.

lación para sub-bases no estabilizadas.

La figura (B-4) da la información para sub-bases estabilizadas.

Generalmente el espesor de la sub-base de los pavimentos rígidos se saca de receta establecida por la costumbre. Nunca se construyen de menos de 10 cm, y si se colocan 15 cm que mejor, es una buena dimensión mínima. En condiciones normales casi no se utilizan espesores superiores a 20 cm, pero si hay susceptibilidad al congelamiento o a la expansión en los materiales de la terracería o de la capa subrasante, pudiera ser necesario utilizar espesores de sub-base mucho mayores.

Las figuras (B-5, B-6, B-7, B-8, B-9, B-10, B-11 y B-12) presentan las gráficas de diseño de pavimentos rígidos para aeropistas que corresponden a los aviones más comunes en la actualidad.

Se especifican, en cada caso, características del tren de aterrizaje, de presión de inflado y otras de interés. El funcionamiento de todas las gráficas es el mismo. Con la resistencia a la tensión en flexión del concreto, el módulo de reacción del suelo de apoyo y el peso de la combinación de las ruedas de la aeronave, puede obtenerse el espesor de la losa de concreto trazando una horizontal por el valor de MR, hasta cortar la recta de la carga; a partir del punto así obtenido, se traza otra vertical hasta la curva del correspondiente valor del módulo de reacción, definido un nuevo punto a partir del que se determina el espesor de la losa por medio de una horizontal.

En el caso de carreteras los procedimientos de diseño de carreteras varían bastante según la experiencia de cada institución; en lo que sigue se glosará el método propuesto por PCA.

Comenzando con valuar la denominada Relación de Resistencias:

$$R_r = \frac{MR \text{ (actuante)}}{MR \text{ (disponible)}}$$

Para ello, deberá conocerse el valor de la resistencia a la

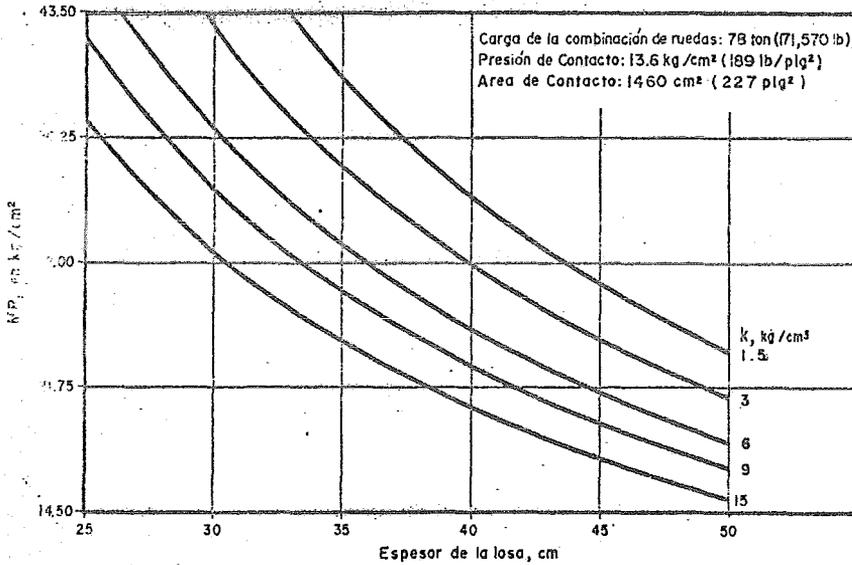


FIGURA B-5.- gráfica de diseño de espesores de losa de concreto. Avión Concorde.

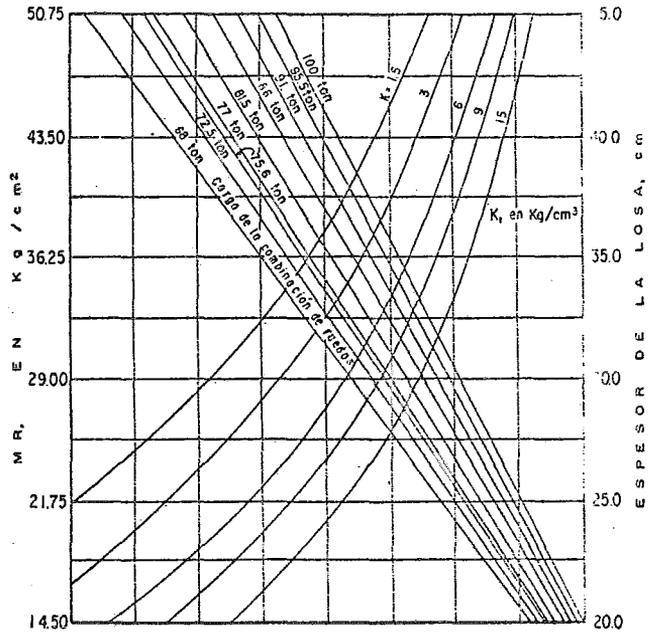
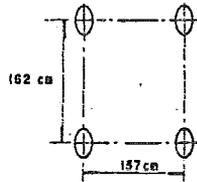
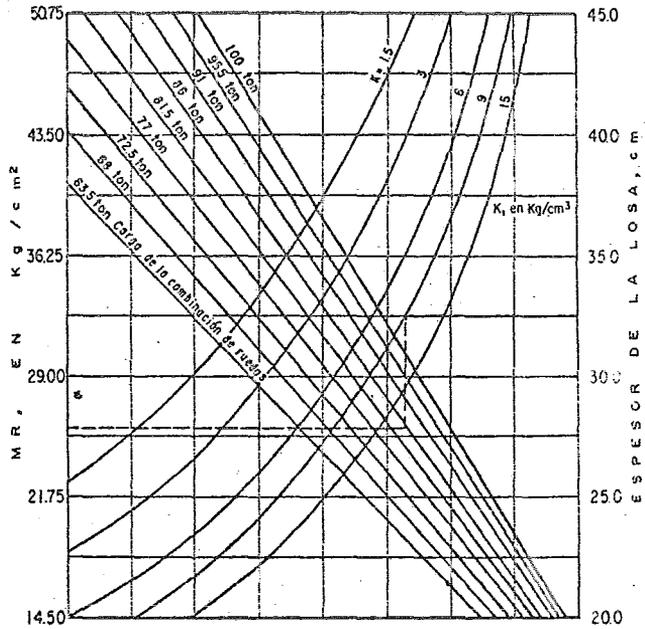


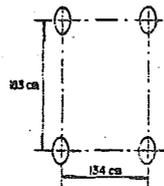
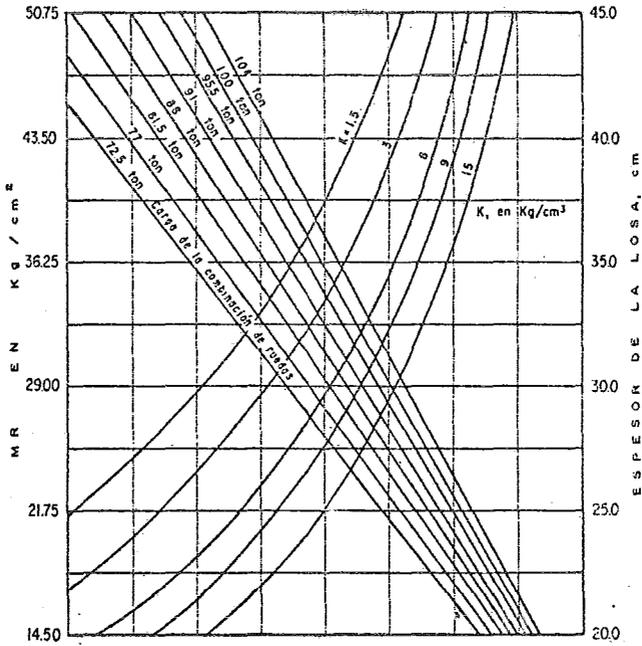
FIGURA B-6.- Gráfica de diseño de espesores de losa de concreto. Avión B-747.





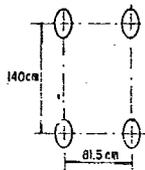
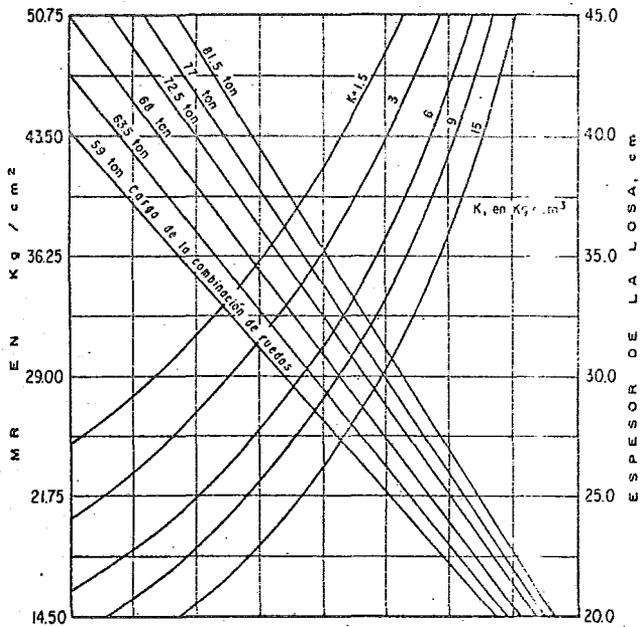
AREA DE CONTACTO POR LLANTA:  
1640  $\text{cm}^2$  (254  $\text{plg}^2$ )

FIGURA B-7.- Gráfica de diseño de espesores de losa de concreto. Avión DC-10.



AREA DE CONTACTO POR LLANTA:  
1550 cm<sup>2</sup> (240 piq<sup>2</sup>)

FIGURA B-3.- Gráfica de diseño de espesores de losa de concreto. Avión Lockheed L-500.



AREA DE CONTACTO POR LLANTA:  
1420 cm<sup>2</sup> (220 plg<sup>2</sup>)

FIGURA B-9.- Gráfica de diseño de espesores de losa de concreto. Avión DC-8.

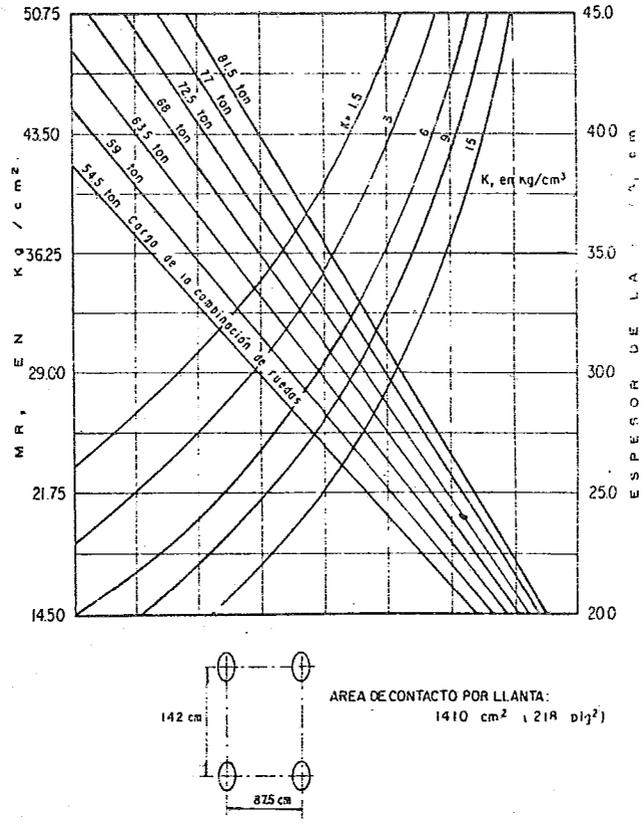
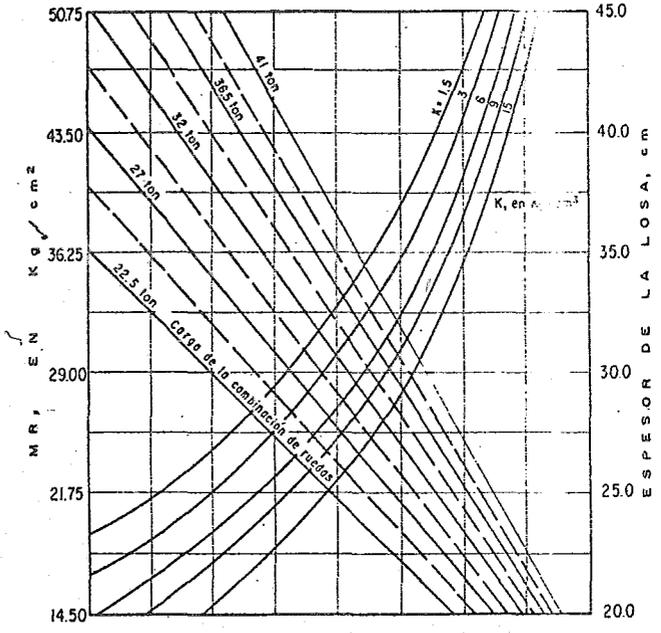


FIGURA B-10.- Gráfica de diseño de espesores de losa de concreto. Avión B-707.



AREA DE CONTACTO POR LLANTA:  
1530 cm<sup>2</sup> (237 plg<sup>2</sup>)

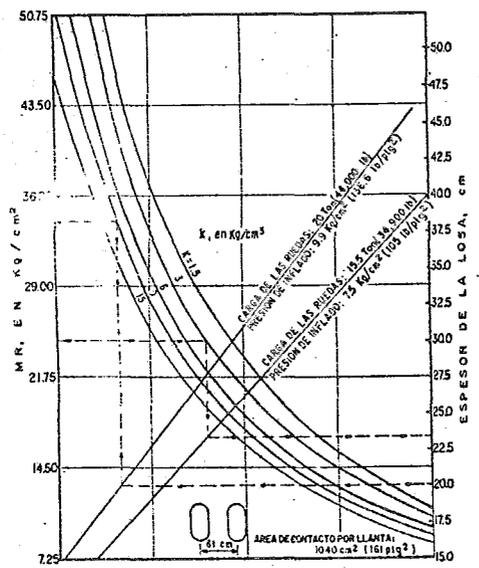


FIGURA B-11.- Gráfica de diseño de espesores de losa de concreto. Avión B-727.

FIGURA B-12.- Gráfica de diseño de espesores de losa de concreto. Avión DC-9.

tensión en flexión que se aplicará a las losas, así como el valor de dicho concepto que sirva de base al proyecto.

Después deberá establecerse el nivel de repeticiones de carga actuante que corresponde al valor de la Relación de Resistencias que se haya obtenido; la correlación entre ambos valores es empírica y es proporcionada en la tabla (B-1), con base en la experiencia acumulada por la institución que propone el método.

En la tabla anterior se supone que una carga que aplique a las losas un valor de MR tal que la Relación de Resistencias sea menor que 0.5, puede aplicarse cualquier número de veces sin falla. Si la Relación de Resistencias es 0.51, la carga correspondiente -- puede actuar 400 000 veces antes de producir la falla de la losa pero una carga actuante que conduzca a una Relación de Resistencias de 0.85 solamente podría aplicarse 30 veces antes de causar la ruptura de la losa.

La carga del tránsito, como recomendación adicional, se afecta por un factor de seguridad para tener el valor de carga a partir del cual se estima el MR actuante. El factor de seguridad es 1.2 para carreteras importantes con tránsito muy abundante de -- vehículos pesados; 1.1 para carreteras o calles sujetas a volúmenes medios de tránsito de vehículos pesados y 1.0 para carreteras y calles con volumen pequeño o nulo de dicho tipo de tránsito.

Es necesario conocer la distribución de las cargas del tránsito para la aplicación del método propuesto por la PCA, saber tanto para el caso de ejes sencillos como para el caso de sistemas tandem, las diferentes cargas que circularán sobre el pavimento. Será preciso saber, por ejemplo, que sobre un pavimento en proyecto circularán vehículos de eje sencillo con carga en dicho eje de 12, 10, 8 y 6 ton, por citar cargas. A la vez será preciso saber que tipos de tandem circularán y cuál será la carga de cada uno.

El método depende, por consiguiente, de una investigación de tránsito cuidadosa.

Para complementar es preciso disponer del módulo de reacción de la subrasante y de dicho valor corregido por la presencia de la sub-base, si la hubiese. También será preciso haber fijado un valor de MR de proyecto, que habrá de satisfacer el concreto que se cuele en la obra.

Hagamos un ejemplo con datos hipotéticos contenidos en la tabla (B-2). En la primera columna aparecen los tipos de cargas esperadas tanto en ejes sencillos como tandem, de acuerdo con el análisis de tránsito que se haya hecho. En la siguiente columna aparecen estos mismos valores multiplicados por el factor de seguridad de carga, que se supuso de 1.2.

Ahora habrá que hacer uso de las figs. (B-13) y (B-14), que son las verdaderas gráficas de diseño en este procedimiento.

Primeramente se manejará la fig. (B-13), que se refiere a cargas con ejes sencillos. Entrando con las diferentes cargas por eje que se tienen en la tabla, es posible, manejando los gráficos como muestran las trayectorias de flechas punteadas, calcular el valor de MR actuante, bajo una hipótesis de espesor de losa que ha de hacerse (en este caso 21.5cm) y conociendo el valor de  $k$  - corregido, módulo de reacción de la subrasante y sub-base (supuesto en la tabla B-2 de  $3.9 \text{ kg/cm}^3$ ). Los valores de MR que el tránsito aplica a la losa, se anotan en la tercera columna de la tabla.

En el ejemplo también se acepta, que el MR de proyecto del concreto a usar en las losas será  $49.6 \text{ kg/cm}^2$ . Con este valor podrán anotarse los de  $R_r$  en la cuarta columna de la tabla (B-2).

Con los valores de  $R_r$  podrán calcularse las reueticiones permisibles de la carga en cuestión antes de provocar la falla con base en la tabla (B-1) y los valores correspondientes se han anotado en la quinta columna de la tabla (B-2).

FIGURA B-13.- Gráfica de diseño para cargas en ejes sencillos. Pavimentos rígidos de carreteras.

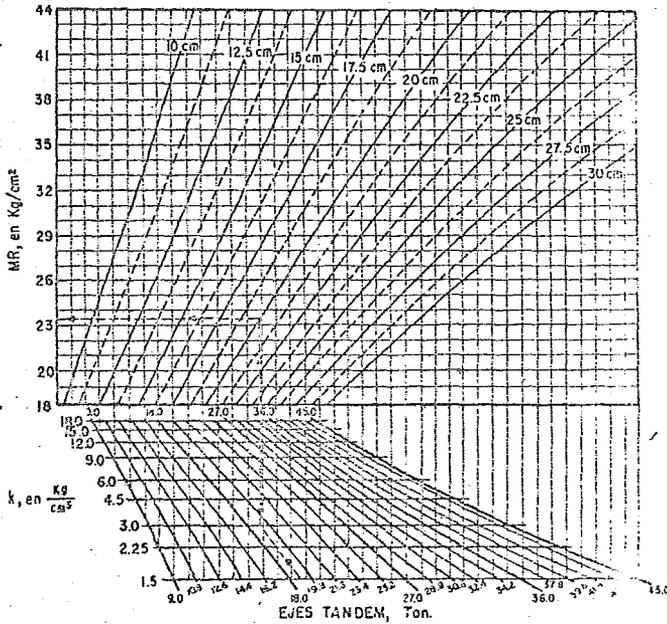
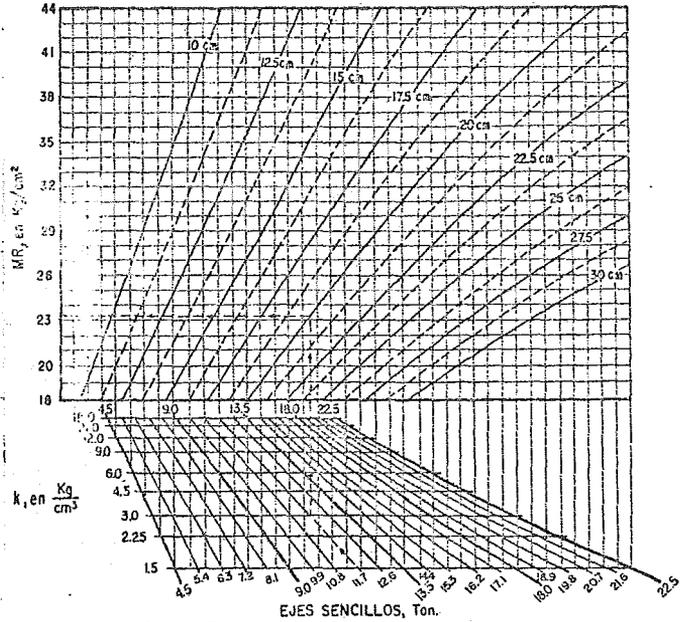


FIGURA B-14.- Gráfica de diseño, para carga en tandem. Pavimentos rígidos de carreteras.

M-0028707

TABLE B-2

Tabla de diseño de espesores de pavimentos rígidos de carreteras según la PCA.

Carga	Carga $\times F_s$	MR (actuante)	$R_r$	Repeticiones permisibles	Repeticiones esperadas	Porcentaje utilizado de la capacidad total
ton	ton	kg/cm <sup>2</sup>	—	—	—	—
Ejes Sencillos						
13.6	16.3	26.0	0.52	300,000	3,100	1
12.7	15.2	25.0	0.51	400,000	3,100	1
11.8	14.2	23.3	Menor que 0.50	Sin límite	—	0
10.9	13.1	—	—	" "	—	0
10.0	12.0	—	—	" "	—	0
Ejes Tandem						
24.5	29.4	29.3	0.59	42,000	3,100	7
23.6	28.3	28.2	0.57	75,000	3,100	4
22.6	27.2	27.4	0.55	130,000	30,360	23
21.8	26.1	26.6	0.54	180,000	30,360	17
20.8	25.0	25.6	0.52	300,000	48,140	16
20.0	24.0	24.5	Menor que 0.50	Sin límite	—	0
19.0	22.8	—	—	" "	—	0
18.1	21.8	—	—	" "	—	0

$\Sigma : 69\%$

TABLE B-3

Espaciamento recomendado para dispositivos de transmisión de carga entre losas de pavimentos rígidos en carreteras.

Tipo y grado de acero	Esfuerzo de trabajo kg/cm <sup>2</sup>	Espesor del pavimento cm	Longitud total cm	Barras Nº 4			Barras Nº 5			
				Espaciamento, cm Ancho de banda			Longitud total cm	Espaciamento, cm Ancho de la banda		
				3 m	3.30 m	3.60 m		3 m	3.30 m	3.60 m
Acero grado estructural de lingote o de eje	1,500	15	50	115	105	95	60	120	120	120
				98	90	82		120	120	120
				85	77	70		120	120	112
				75	70	62		120	107	100
				67	62	57		107	97	90
Acero grado intermedio de lingote o de eje	1,900	15	60	120	120	117	68	120	120	120
				120	110	100		120	120	120
				105	95	87		120	120	120
				92	85	77		120	120	120
				85	77	70		120	120	120
Acero de grado o de lingote o de eje, grado	2,300	15	68	120	120	120	83	120	120	120
				120	120	120		120	120	120
				120	117	107		120	120	120
				115	105	95		120	120	120
				102	92	85		120	120	120

El espaciamento de las barras de sujeción no debe exceder de 1.2 m

En la sexta columna de la tabla (B-2) deberan anotarse los valores de las repeticiones que se esperan realmente para cada una de las cargas anotadas, dentro de la vida útil del pavimento. Este dato depende de la estimación del tránsito que se haya efectuado y de la correspondiente predicción de su desarrollo futuro; estas estimaciones se suponen hechos por alguno de los métodos que hoy se manejan. En la columna seis de la tabla (B-2), se anotan simplemente las repeticiones esperadas en cada caso.

Si se dividen los números de la columna seis entre los correspondientes de la columna cinco, expresando el cociente como un porcentaje se obtendrá lo que la PCA denomina "Porcentaje utilizado de la capacidad total del pavimento", que podría considerarse que expresa lo que contribuye a la falla final del pavimento cada una de las cargas que circularán en él. En la columna siete se han anotado los porcentajes, asignando el valor cero a aquellos casos en que la carga es suficientemente baja como para que pueda repetirse cualquier número de veces sin falla, aceptando que tales cargas no repercuten en la capacidad del pavimento.

La suma de todos los porcentajes anotados en la columna siete se acepta como un índice de la capacidad total del pavimento. En el caso de los números anotados en la tabla (B-2) dicha suma resultó 69%, que se debe considerar como baja; el valor idealmente correcto para la suma en cuestión será 100%, pero la PCA permite en su método aceptar inclusive cifras mayores, con tal de no exceder el 125%. Naturalmente el porcentaje aceptable dependerá de la importancia de la carretera, el desenvolvimiento futuro del tránsito y demás factores ya tantas veces analizados.

En el caso del ejemplo, habría de ser repetida la secuela de cálculo, efectuando un nuevo tanteo en todo igual al expresado, en el que se utilizase un espesor de losa menor que el de 21.5cm

que se consideró en el caso anotado. Así habría que proceder tanteando diferentes espesores de losa hasta encontrar uno que produjera un porcentaje adecuado de utilización de la capacidad estructural de las losas.

Los tanteos que se han venido describiendo podrían hacerse enfatizando otras variables; por ejemplo, disminuyendo el valor de  $M_R$  de proyecto, lo que equivaldría a utilizar un concreto de menor resistencia y, por lo tanto de menor costo.

La fig. (B-15) proporciona un gráfico para el cálculo del espesor de pavimentos hidráulicos en carreteras, únicamente en función de la carga más pesada transmitida por un vehículo de eje sencillo y rueda doble. La gráfica considera el caso, por otra parte normal, de que existan en las esquinas de las losas elementos adecuados para transmitir la carga a las losas adyacentes.

La gráfica de la fig. (B-15) utiliza los mismos valores de los elementos mecánicos del concreto mencionados para gráficas anteriores y esta basada en fórmulas desarrolladas por Pickett. Para utilizar la gráfica deberá de multiplicarse por 1.2 la carga correspondiente al eje dual más pesado que se espere ( $F_s=1.2$ , para cargas) y de dividir el módulo de resistencia a la tensión en flexión del concreto a la ruptura, entre 2, para obtener un valor de trabajo ( $F_s=2$  en la resistencia del concreto).

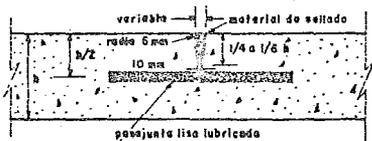
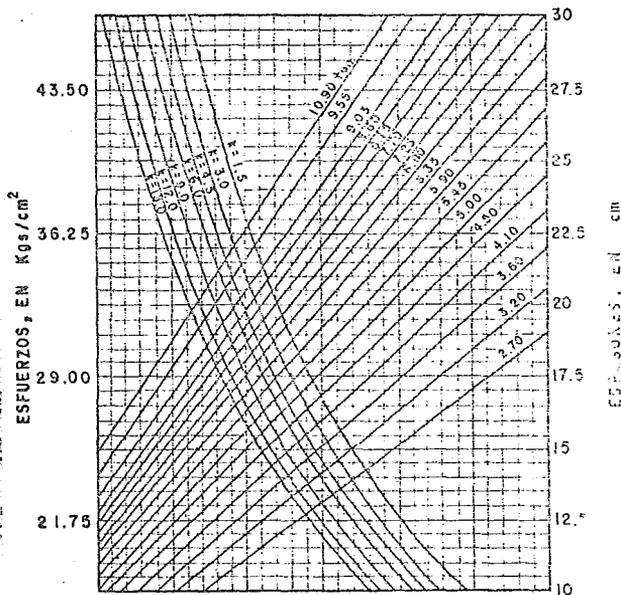
Los pavimentos de concreto se aplicarán siempre a carreteras importantes, de alto volumen de tránsito, en las que éste obviamente estará bien estudiado.

#### JUNTAS EN PAVIMENTOS HIDRAULICOS

En los pavimentos hidráulicos tenemos cuatro grupos principales de juntas: Juntas de contracción, juntas de expansión, juntas de construcción, juntas de alabeo o articulación.

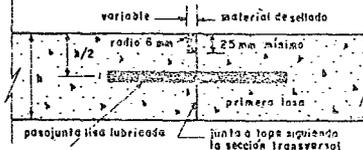
También las juntas tienen otra denominación, ya sea longitudinales o transversales, según el sentido en que estén dirigidas -

FIGURA B-15.- Gráfica de la P.C.A. para el cálculo de espesor de pavimentos rígidos en caminos, carga de rueda doble.



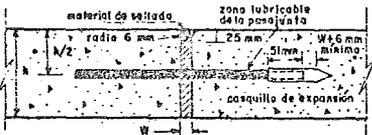
a.

JUNTA DE CONTRACCIÓN CON RANURACIÓN PARA DESARROLLO ULTERIOR DE GRIETA.



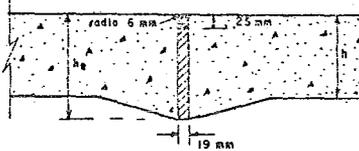
b.

JUNTA DE CONTRACCIÓN CON LOSAS A TOPE.



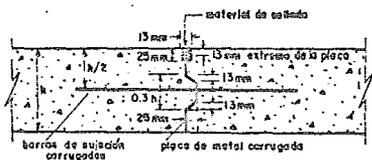
c.

JUNTA DE EXPANSIÓN CON PASAJUNTA Y CASQUILLO.



d.

JUNTA DE EXPANSIÓN SIMPLE.



e.

JUNTA DE CONSTRUCCIÓN MACHIHEMBREADA.



f.

JUNTA DE ALABEO.

FIGURA B-16.- Juntas comunes en pavimentos rígidos.

dentro de la aeropista o la carretera.

Las juntas de contracción se colocan para aliviar los esfuerzos de tensión causados por las contracciones del concreto. Las juntas de expansión se disponen para permitir que las losas de concreto se expandan una contra otra sin causarse daño. Las juntas de construcción corresponden a las interrupciones de las operaciones de colado y deben garantizar la continuidad estructural. Por último, las juntas de alabeo o juntas articuladas tienen por finalidad evitar los agrietamientos a lo largo del eje central de los pavimentos o en las líneas de unión de las diferentes hileras de losas que se producirían al elevarse sus bordes cuando la losa es cargada.

Las juntas casi siempre se hacen o bien ranurando el concreto, pero garantizando la continuidad a través de la junta por apoyo de concreto contra concreto, o provocando una ranura que se rellena de algún material apropiado o, finalmente, estableciendo la continuidad a ambos lados de la ranura con barras de acero liso (pasajuntas) o corrugado (barras de sujeción).

La figura (B-16) muestra los tipos de juntas más comunes en carreteras. La diferencia entre las juntas de contracción A y B es triba en que en la A se ha formado la ranura en forma incompleta, rellenando con material plástico la oquedad que se produce; la grieta se propagará por sí sola posteriormente a partir de la ranura formada; en la junta B, dos losas quedan unidas a tope y su eventual separación se combate con el material plástico que rellena la ranura superior que se realiza. En todas las juntas de contracción se coloca pasa-junta liso lubricado para que las losas puedan retraerse sin generar fuerzas que las agrieten. Las partes C y D demuestran juntas típicas de expansión. La C tiene pasa-junta con casquillo para permitir movimiento relativo, en tan

to que la D es una junta sencilla, en la que se ha engrosado el borde de la losa para protección adicional. La junta E es un ejemplo claro de una junta de construcción, con una barra de sujeción corrugada para ayudar a la transmisión de los esfuerzos. La parte F de la figura muestra una típica junta de alabeo o articulada, también protegida por una barra corrugada de sujeción.

En carreteras el uso de las pasa-juntas y barras de sujeción es recomendable en las juntas de expansión, pero suelen suprimirse en las de contracción cuando el espaciamiento entre juntas sea menor de 6m, a no ser que se trate de zonas en que las condiciones de servicio sean particularmente severas, como cruces o uniones de pavimentos rígidos diferentes.

En el caso E (figura B-16), la junta machihembrada se utiliza también a veces como junta de alabeo. Donde estos efectos sean de temer convendrá siempre dotar las juntas de barras.

La tabla B-3 describe los requerimientos mínimos recomendados para la colocación de pasa-juntas y dispositivos de transmisión de carga en pavimentos de diferentes espesores. El dispositivo típico es una varilla lisa, redonda de acero. La barra de sujeción corrugada no se diseña como un dispositivo típico de transmisión de carga en general; se coloca para resistir las fuerzas de tensión que se generan por las restricciones de fricción que existen entre la losa y la sub-base. Cuando estos elementos sean necesarios, su espaciamiento debe ceñirse también a las normas de la tabla (B-3).

#### REFUERZO DE ACERO

El acero de refuerzo en el pavimento de concreto evita la ampliación de las grietas producidas por la flexión y mantiene las caras fracturadas en íntimo contacto. En esta forma, el cierre del agregado es conservado, y la introducción de suciedad o de a

gua es evitada. Pocas veces se toma en cuenta el refuerzo para resistir los esfuerzos de flexión producidos por las cargas o el alabeo.

Para diseñar el acero se hace la suposición de que el acero de refuerzo debe ser lo suficientemente fuerte para tirar de ambos extremos de cada losa individual sobre el subrasante hacia su centro. Esta idea, expresada como formula, se convierte en lo siguiente.:

$$As = \frac{Lfw}{2S}$$

Donde:

As = Centímetros cuadrados de sección transversal de acero por metro de anchura de la losa.

L = Longitud de la losa entre las juntas, mts.

f = Coeficiente de fricción entre la losa y la infraestructura: También denominado coeficiente de resistencia de la infraestructura. Las suposiciones para el mismo, generalmente varían de 1 a 2 siendo de 1.5 el valor más común.

W = Peso de la losa por metro cuadrado de superficie de pavimento, kg.

S = Esfuerzo de trabajo en el acero de refuerzo, kgs. por centimetro cuadrado. Este se toma usualmente como el 50% del esfuerzo correspondiente al límite elástico.

### c) RECICLAJE

El proceso inflacionario ha dado por resultado un incremento bastante notable en el costo de los materiales, lo que dificulta -- notoriamente la construcción de carreteras. Por otro lado, las ca-- rreteras se deterioran mucho más rápido de lo que se reconstruyen. Todo esto obliga a que se pongan en práctica nuevas técnicas y mé-- todos que hagan rendir los recursos económicos. Que mejor forma -- de hacer ésto que recuperando los materiales de los pavimentos as-- fálticos existentes, y lo más importante su reuso.

Para la conservación de las carreteras el factor más importan-- te es su mantenimiento oportuno, de lo contrario, se presentarían sin lugar a dudas daños, tanto en la carpeta asfáltica como en -- las capas inferiores, a tal grado que en algunos casos pudiera re-- querirse reconstrucción total.

Afortunadamente se ha venido imponiendo un gran interés en -- en la recuperación y reuso de los materiales de los pavimentos as-- fálticos. Lo que ha llevado a cabo, entre otros, la aplicación de métodos químicos como el llamado "Método del Reciclado".

El método consiste en escarificar la carpeta y trasladarla a la planta donde se realiza el reciclado. La remoción de la carpe-- ta se realiza con una fresadora. Así pues, el procedimiento para restaurar las propiedades deseadas de los materiales de los pavi-- mentos existentes es el calentamiento y mezclado de los materiales recuperados, junto con agregados y asfalto nuevos, en alguna plan-- ta modificada o adaptada para tal efecto.

Desde hace algunos años, existe gran variedad en éste método para el proceso de calentamiento. Los primeros trabajos implica-- ron una modificación y adaptación de las plantas asfálticas. De -- un tambor mezclador, para un calentamiento y un mezclador unita-- rio a fuego directo, dando salida a los gases de la combustión -- por medio de conductores de escape localizados en el tambor rota-- torio.

El proceso fué bastante aceptable, sin embargo los eficaces - inherentes en el calentamiento indirecto, causaron contaminación de gases producidos por la combustión del combustible al realizar el calentamiento de la mezcla de los materiales recuperados, y - por si fuera poco, hubo una baja productividad y un alto uso de combustibles, haciendo caro el proceso ahorrativo de materiales.

Pero afortunadamente siempre hay personas interesadas en superar todos estos problemas, han desarrollado plantas y técnicas - en las que se cuida mucho el aspecto del calentamiento del asfalto de la mezcla antigua de tal forma que las llamas no la toquen y por otra parte, se han instalado dispositivos que eliminan en parte el problema de la contaminación. Para ello se han instalado condensadores de gas o lavadores de gases y estructuras de filtros.

#### OBJETIVOS DEL RECICLAMIENTO EN GENERAL

Los objetivos básicos del reciclamiento de los pavimentos asfálticos son los mismos que los de cualquier industria, son dos: Primero resolución de un problema de reposición, y segundo, salvar la materia prima valiosa contenida en el material descartado.

Los costos del reciclamiento son, antes que nada, consecuencia del costo del equipo, mano de obra y transportación. Además, como no se usan ni agregado ni asfalto nuevos, el costo del material es comunmente menor, lo que constituye la principal atracción económica del reciclamiento.

Las capacidades y detalles del equipo disponible son bien conocidos tanto por los distribuidores como por sus fabricantes. La decisión final en lo referente al empleo del equipo y selección de procedimientos debe siempre hacerse por el ingeniero de diseño encargado de la obra y familiarizado con las condiciones.

Las operaciones de reciclamiento pueden efectuarse en el lugar o fuera de él y pueden hacerse ya sea en caliente o en frío. El

reciclamiento puede involucrar la profundidad total de un pavimento o solamente la parte superior de 5 cm, lo que se llama reciclamiento superficial. El reciclamiento superficial in situ es el menos caro y a la vez, el más simple. Sin embargo, la efectividad del reciclamiento superficial, depende de que la base y sus condiciones estructurales sean adecuados:

Existe equipo disponible para todas las combinaciones posibles en la ejecución de una obra de reciclamiento.

#### MECANICA DEL RECICLAMIENTO

Los aspectos básicos que deben considerarse en todas las operaciones de reciclamiento siempre son los mismos.

Los pasos ejecutados también son los mismos, y consisten en: desbastar el pavimento viejo, analizar su composición, determinar la cantidad requerida de agente rejuvenecedor, mezclar los ingredientes, que en algunos casos puede incluir pequeñas cantidades de agregados y asfalto nuevos, finalmente tender el pavimento reciclado.

El primer hecho básico, que debe considerarse, es que el calentamiento es benéfico en todas las operaciones desde el desbastado del pavimento hasta la etapa final de tendido de la nueva mezcla.

El calentamiento moderado reduce la viscosidad del cemento asfáltico envejecido y por lo tanto ayuda a desmenuzar los trozos de la carpeta vieja sin triturar el agregado; el mezclado en caliente agiliza la combinación de los ingredientes (asfalto viejo y aditivos) y ayuda a la distribución uniforme del cemento asfáltico nuevamente formado, a través del agregado; el calentamiento empleado al pavimentar, ayuda a la compactación y agiliza las operaciones de acabado. Otro punto importante es que en todas las operaciones, el calentamiento, reduce el uso del equipo empleado. Al escoger el equipo, el proporcionamiento de calor, en adición

a las operaciones mecánicas eficientes, será siempre preferido.

Un segundo aspecto básico que debe considerarse, es que entre mayor sea el volumen del aditivo que se incorpore en la mezcla los resultados son mejores. Es difícil, y frecuentemente imposible, distribuir uniformemente una pequeña cantidad de fluido a través de una cantidad grande de ingredientes sólidos secos. Una masa porosa seca, como la de un pavimento viejo desmenuzado, absorberá rápidamente - cualquier tipo de hidrocarburo líquido a el lugar donde se adicione antes de que pueda ser distribuido uniformemente en toda la mezcla. La situación se agrava si se usa más de un aditivo. Por ejemplo si los ingredientes que van a mezclarse son (1) el pavimento viejo desmenuzado, (2) un agente rejuvenecedor, (3) agregado nuevo, y (4) asfalto nuevo, la práctica mejor será premezclar (1) con (2) y (3) - con (4) y hasta entonces combinar dichas mezclas.

Claro está, que todo éste mezclado múltiple de ingredientes múltiples requiere de consideraciones especiales en cuanto al equipo y tiempo de mezclado empleados en cada paso.

El cumplimiento de lo dictado en este segundo aspecto básico requiere que solamente se use un aditivo para rejuvenecer un pavimento viejo y que el volumen de fluido agregado sea tan grande como sea permisible. Esto se cumple mejor usando el aditivo en la forma de emulsión en la cual el contenido de agua es el máximo que puede tenerse bajo las condiciones de temperatura y tiempo determinados por el equipo y las condiciones ambientales. El uso de un aceite estable, en una emulsión con agua, tiene la ventaja adicional de proporcionar tiempo suficiente para la distribución uniforme de la fase - aceite antes de ser absorbido y combinado con el asfalto envejecido.

La figura C-1, es una microfotografía de una gota de emulsión diluida.

El tercer aspecto básico a considerarse, es que la trabajabilidad mecánica de una mezcla o la apariencia de una nueva capa de pa

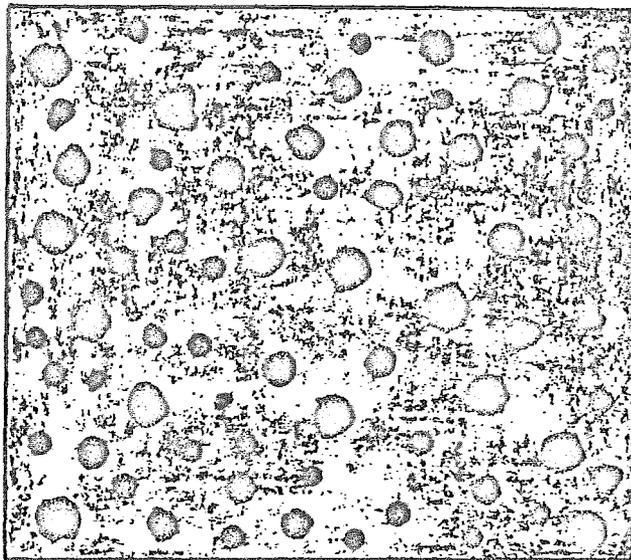


FIGURA C-1,- ACEITE EN EMULSION CON AGUA (AMPLIFICACION  
530X)

vimiento no es garantía del valor en términos de comportamiento y - durabilidad. El cumplimiento de la calidad requerida solamente puede lograrse por la recuperación del asfalto envejecido hasta una - consistencia (medida por la viscosidad o penetración) del asfalto con grado de pavimentación con una composición química que asegure un alto grado de resistencia al envejecimiento.

Para cumplir estos dos requerimientos (consistencia y composición) se debe usar un agente rejuvenecedor que imparta al asfalto recuperado la viscosidad y otras propiedades reológicas del asfalto y que corrija su composición química hasta contener, dentro de ciertos límites, un mínimo de componentes susceptibles a la oxidación y a otras reacciones asociadas con el envejecimiento. Estos - ciertos límites están definidos por el requerimiento de que el cemento asfáltico nuevamente formado sea estable y libre de sinéresis.

La experiencia en el laboratorio y en el campo práctico ha mostrado que un agente rejuvenecedor que imparte a un cemento asfáltico envejecido la consistencia de un CA-10 y un parámetro de composición de  $(N+A_1)/(P+A_2)$  de 0.4 a 1.2, preferentemente de 0.4 a 0.8 será efectivo en casi todos los casos.

Es apropiado explicar la pertinencia de la química en la ingeniería en este punto. La química del asfalto es más importante cuando se examina la durabilidad. Ya que la falta de durabilidad es la causa del deterioro, y restaurar la utilidad de los pavimentos deteriorados constituye la esencia del reciclamiento, por lo que es conveniente poner un poco de atención a la química involucrada.

#### FUNDAMENTOS FISICOS Y QUIMICOS DEL RECICLAMIENTO

El comportamiento mecánico del asfalto y de los agregados, así como de las mezclas de los dos está gobernado por las leyes de la física. Los principales factores que deben considerarse son los efectos de la temperatura y de las fuerzas mecánicas aplicadas. Esta es el área donde el equipo eficiente es más importante. Actual-

mente se tiene disponible maquinaria que proporciona, en el lugar o fuera de él, mezclado efectivo y calentamiento cuando se requiera. Se está desarrollando nuevo equipo para cumplir con las necesidades y adaptarse con los procedimientos de procesamiento mejorados. Los fabricantes de equipo cumplen muy bien en el campo de la pavimentación.

La investigación química ha creado agentes rejuvenecedores que pueden recostituir los cementos asfaltos envejecidos hasta una calidad superior en durabilidad al asfalto originalmente empleado en el pavimento viejo y, aún mejor, a la de muchos asfaltos que cumplen solamente los requerimientos de la especificación física. La composición de los agentes rejuvenecedores puede especificarse, ahora, para asegurar la compatibilidad deseada con todos los asfaltos envejecidos, y un alto grado de durabilidad del asfalto nuevamente formado.

Las figuras (C-2) y (C-3) muestran los cambios físicos y químicos de un asfalto durante el envejecimiento, reciclamiento, y reenvejecimiento.

El requerimiento importante de que el agente rejuvenecedor debe impartir ligazón a la mezcla durante la compactación, sino también adhesión y fusión de las capas, si un pavimento es tendido en dos o más niveles.

Los principios químicos pertinentes que gobiernan el comportamiento de un asfalto pueden explicarse y entenderse fácilmente con unos cuantos hechos fundamentales. Los asfaltos consisten de cinco grupos de componentes:

A - Asfaltenos - que producen consistencia

N - Bases de nitrógeno, o compuestos polares instaurados-peptizador (solvente) para A.

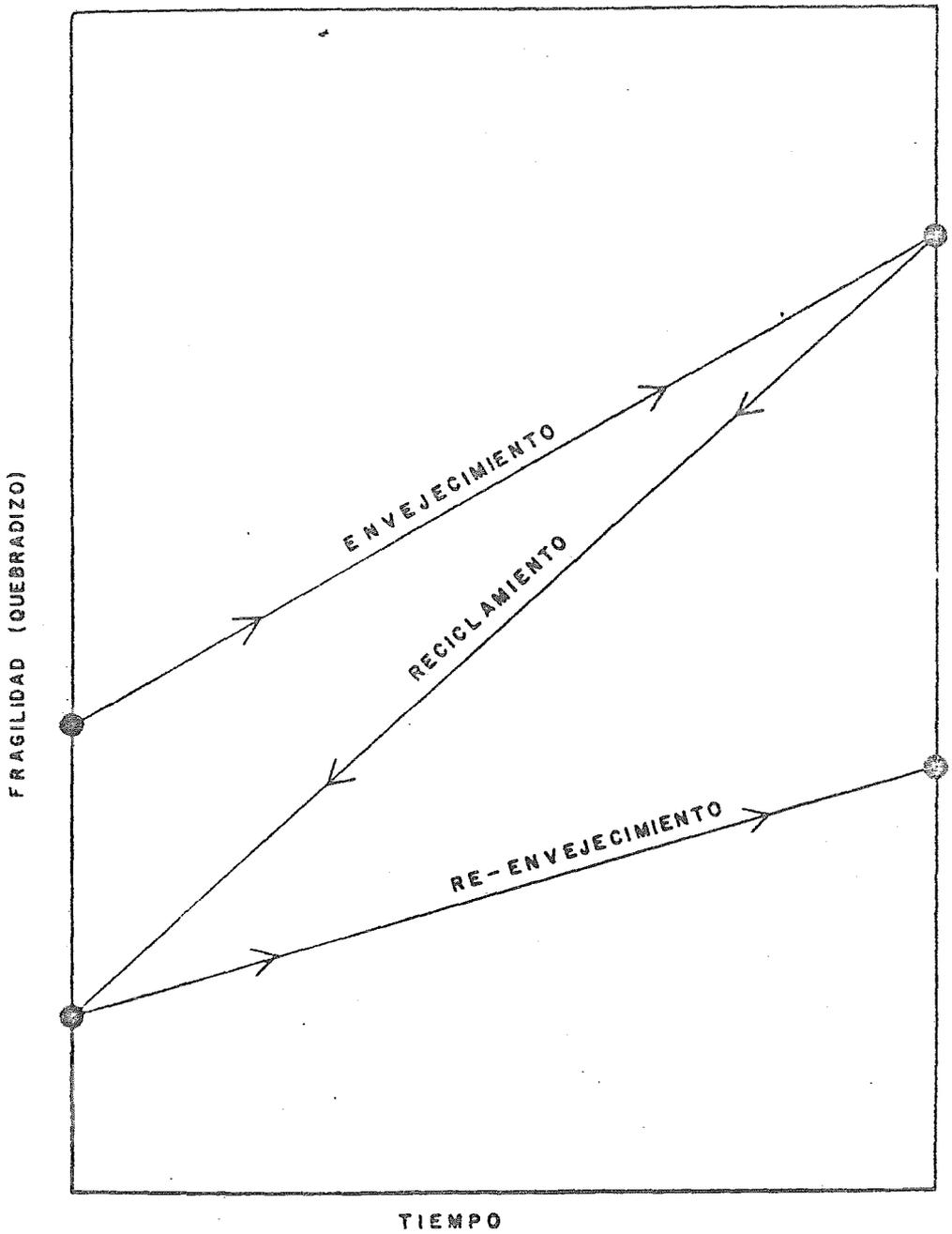


FIGURA C-2.- CAMBIO EN LAS PROPIEDADES DEL COMPORTAMIENTO

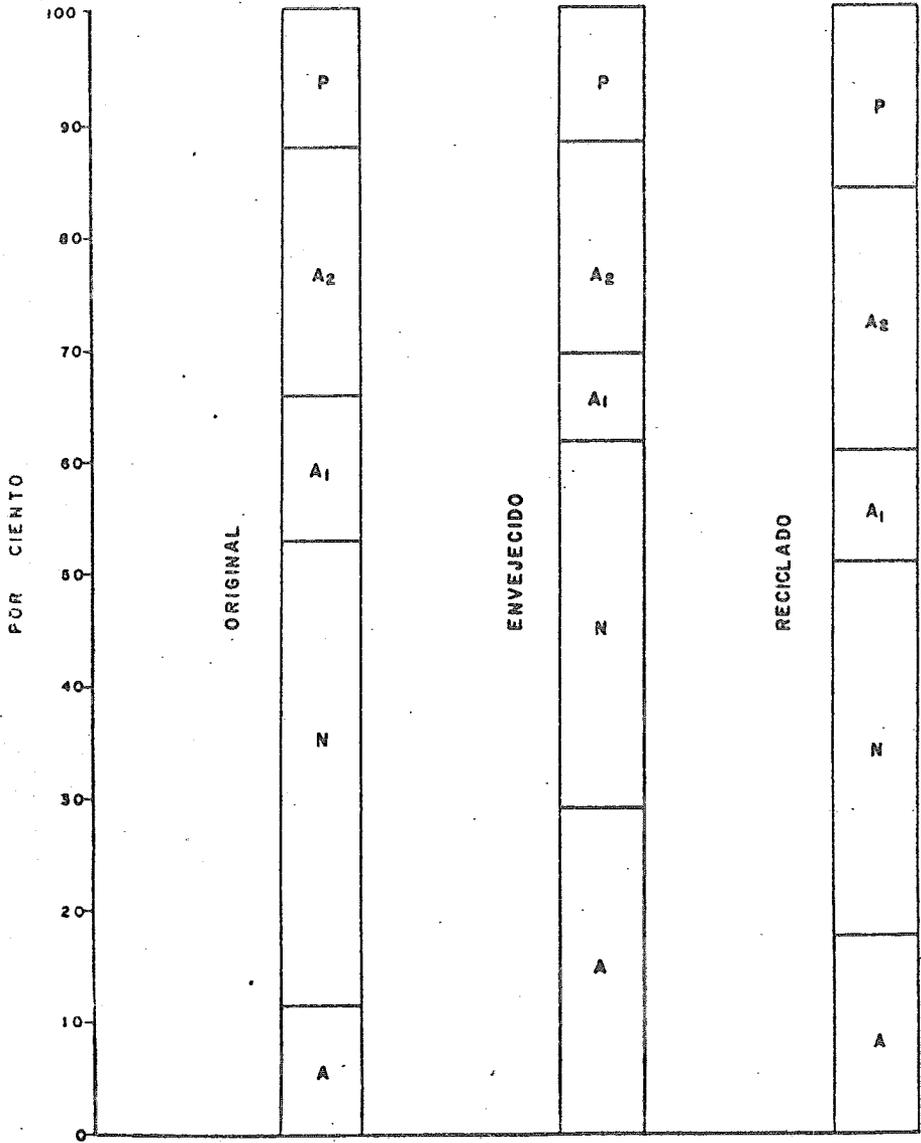


FIGURA C-3.- CAMBIOS EN LA COMPOSICION QUIMICA DE UN ASFALTO

- $A_1$  - Primeros acidoafines, o hidrocarburos insaturados,  
Grupo I solvente para A, peptizadora
- $A_2$  - Segundos acidoafines, o hidrocarburos insaturados,  
Grupo II - solventes para A, peptizada.
- P - Parafinas, o hidrocarburos saturados-agente gelizante (floculante) para A.

Estos son los últimos grupos básicos de componentes y su función en el asfalto. El hecho de que los grupos individuales de componentes contengan una multitud de compuestos químicos es inmaterial, ya que cada grupo químicamente identificable se comporta de una manera predecible y tiene propiedades específicas genéricas. Es importante, sin embargo, que los cinco componentes estén presentes debidamente balanceados para asegurar el comportamiento satisfactorio durante un período largo de tiempo. Para funcionar como un agente cementante adecuado el asfalto debe ser un sistema homogéneo que contiene todos los cinco componentes en la forma de una solución estable.

Los cuatro componentes N,  $A_1$ ,  $A_2$  y P, también llamados maltenos, son mutuamente solubles en todas las proporciones. La fracción A (asfaltenos) es, sin embargo, solamente soluble en la fracción N y en los maltenos que contienen una cierta cantidad de N, que funciona como peptizador para A. La fracción P es el agente gelizante para A y, aunque juega una parte importante en la durabilidad y en las propiedades reológicas, no debe exceder de un cierto límite. Expresado en forma diferente, una solución de A en N puede ser diluida con las otras fracciones de maltenos ( $A_1$ ,  $A_2$  y P) sin floculación de A mientras se mantienen las relaciones balanceadas de A a N y de N a P.

Las fracciones N y  $A_1$  son las componentes químicamente más activas del asfalto y por lo tanto más susceptibles al envejecimiento

to que las otras dos fracciones de maltenos,  $A_2$  y P. Todos estos hechos son tomados en cuenta por la simple especificación de que la relación de composición,  $(N+A_1)/(P+A_2)$ , debe estar para un asfalto altamente durable entre 0.4 y 0.8.

La relación, N/P, cantidad de peptizador (solvente) para el agente gelizante (floculante), regula la sinéresis, o sea la compactibilidad de las fracciones. La viscosidad de los maltenos la mezcla de N,  $A_1$ ,  $A_2$  y P, juega un papel significativo para formar un asfalto de acuerdo con la cantidad de agente estructurador (A) necesario para satisfacer los requerimientos de consistencia del asfalto. Un asfalto con valor de penetración de 60 (por ejemplo, BPR 348) que contiene maltenos con una viscosidad de 300,000 poises a 25°C contiene solamente 11% de asfaltenos, mientras que un asfalto con igual penetración (por ejemplo asfalto BPR 349) que contiene maltenos con viscosidad de 6,000 poises a 25°C tiene aproximadamente 28% de asfaltenos.

El envejecimiento de un asfalto se inicia al aplicarlo. El envejecimiento causa un desequilibrio de estos componentes, resultando en un incremento de asfaltenos a expensas de la fracción de maltenos, los cuales se convierten gradualmente en asfaltenos.

El efecto sobre los pavimentos es de endurecimiento, pérdida de cohesión, desprendimiento, agrietamiento y desgarramiento. - Estos efectos adversos del envejecimiento son progresivamente más severos con el contenido de vacíos incrementado del pavimento. Un agente rejuvenecedor debidamente formulado reconstituye al asfalto envejecido rebasteciéndole la cantidad requerida de las fracciones de maltenos, formando un nuevo cemento asfáltico altamente durable.

Esto es en forma simplificada, toda la química que el ingeniero de pavimentos necesita para especificar un agente rejuvenece-

dor adecuado.

#### PROCEDIMIENTOS DE OPERACION

El principal pre-requisito para un procedimiento de diseño racional es entender y conocer la validez de los principios científicamente establecidos aplicables al reciclamiento. No darse cuenta de los hechos inalterables es una garantía de falla. Antes de iniciar cualquier operación el ingeniero debe conocer la condición del pavimento que va a ser reciclado, las cantidades de material involucradas, y el uso específico final del material reciclado, por ejemplo, si va a ser usado para material de base, para nivelar una capa que se va a recubrir, para la construcción de un pavimento en la misma manera que con mezcla de concreto asfáltico nuevo, o como una revoltura para incrementar el volumen de una mezcla que contiene esencialmente cemento asfáltico y agregado. En el significado correcto del término, el reciclamiento verdadero es solamente la parte de la operación que comprende la combinación del pavimento viejo para que sea analizada en un laboratorio de prestigio, donde se le determinará:

- a) Los porcentajes de agregado y de asfalto viejo.
- b) La granulometría de los agregados, y
- c) La consistencia (penetración o viscosidad del asfalto viejo extraído.

Con esta información se puede establecer la cantidad y tipo de agente rejuvenecedor para la mezcla.

Existe una fórmula matemática que puede usarse para calcular la cantidad de asfalto necesaria en la mezcla reciclada, lo mismo que la cantidad de agente rejuvenecedor que debe agregarse, - la cual igualará a la demanda de asfalto menos la cantidad de asfalto en la mezcla vieja. Esta fórmula es la que a continuación describimos:

## CALCULO DE LA DEMANDA DE ASFALTO DE LA MEZCLA

$$P = \frac{4R + 7S + 12F}{100} \quad 1.1$$

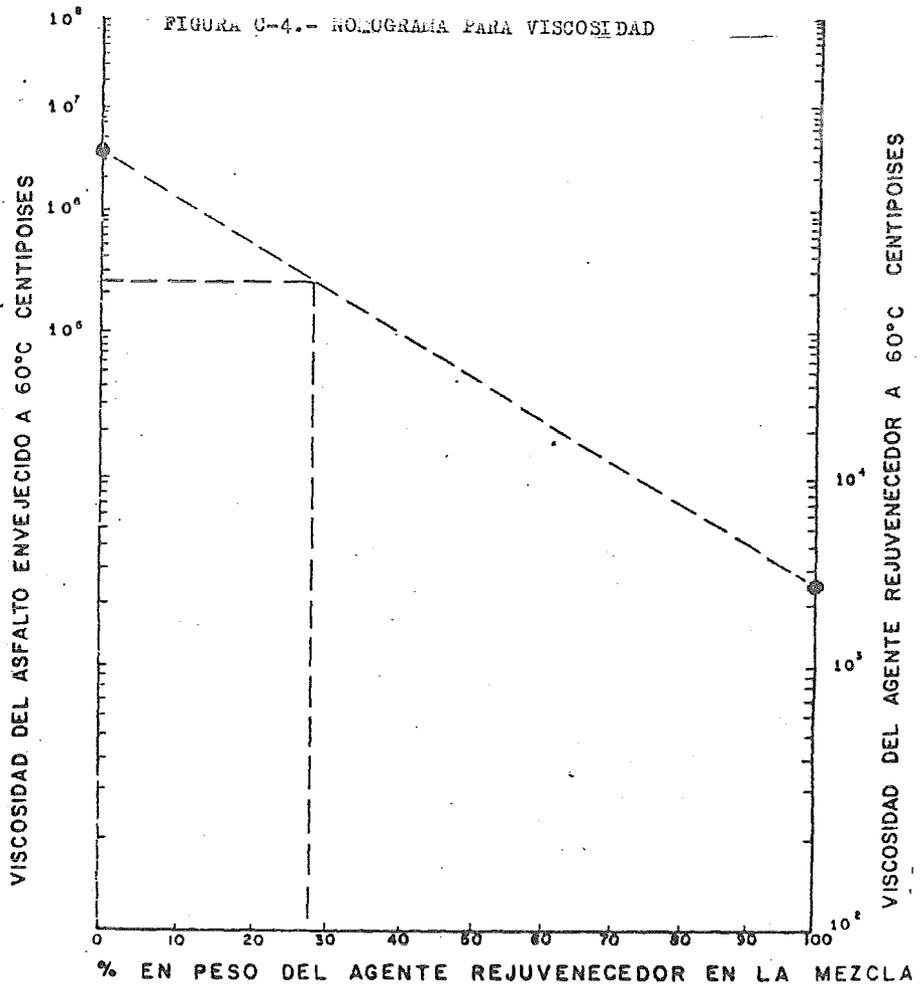
P = % Total de asfalto requerido en la mezcla reciclada (asfalto viejo + agente rejuvenecedor)

R = Grava (retenida en malla N° 8)

S = Arena (pasa malla N° 8; se retiene en N° 200)

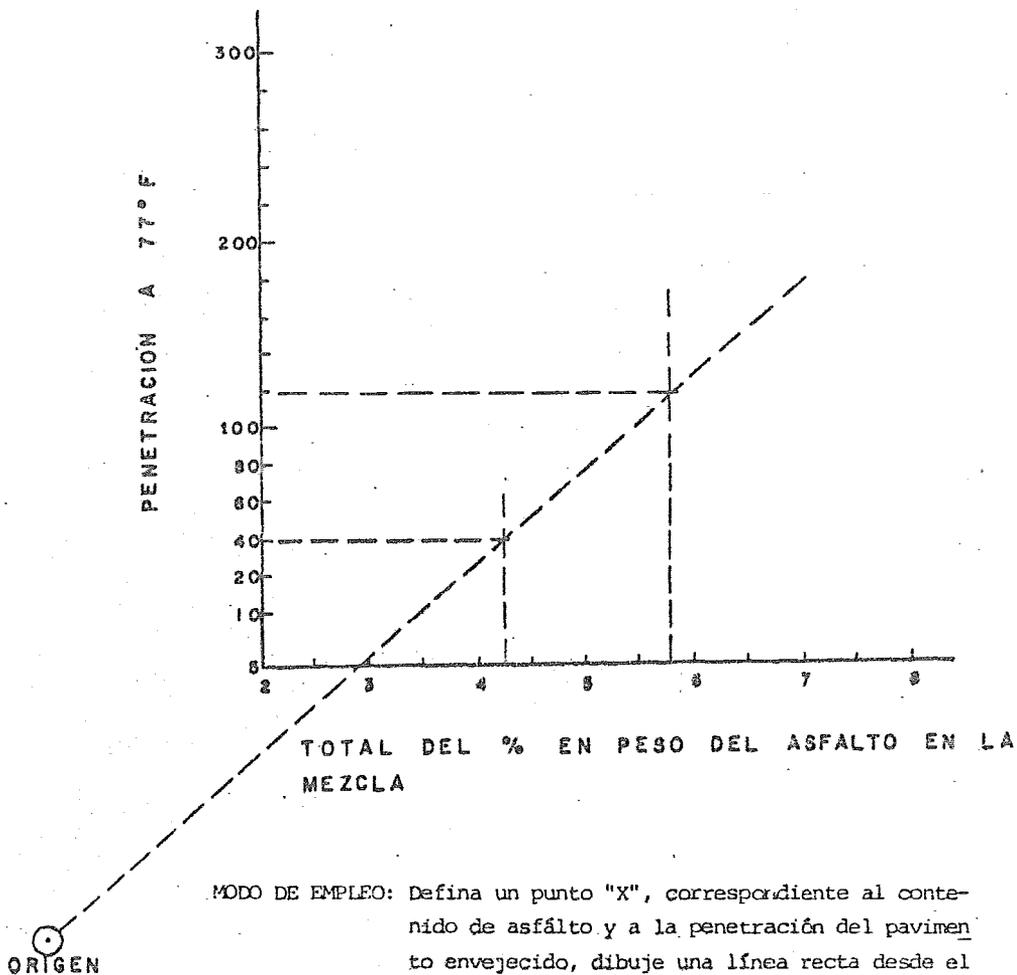
F = Finos (pasa malla N° 200)

La viscosidad de penetración del asfalto reciclado puede leerse en los nomogramas. La fórmula en la tabla 3 y las gráficas mostradas en las figuras (C-4) y (C-5) son para un agente rejuvenecedor específico y para un cemento asfáltico reciclado, con la viscosidad de un asfalto # 10. La experiencia ha mostrado que un simple agente rejuvenecedor del tipo especificado y con una viscosidad de un asfalto # 10, se pueden satisfacer casi todas las operaciones de reciclamiento. Pueden hacerse ajustes para lograr algún fin deseado, usando un agente rejuvenecedor de viscosidad más alta o más baja. Si el agente rejuvenecedor cumple con las especificaciones que limitan la composición química ya citada, la durabilidad del asfalto reciclado estará asegurada. Solamente es necesario tener cuidado del contenido final del asfalto y de la viscosidad.



**MODO DE EMPLEO:** Trace una línea recta que conecte la viscosidad del asfalto envejecido con la viscosidad del agente rejuvenecedor, trace una línea vertical hacia arriba desde el por ciento de agente rejuvenecedor en la mezcla, la intersección de las dos líneas define aproximadamente la predicción de la viscosidad del asfalto reciclado.

FIGURA C-5.- NOMOGRAMA PARA LA PENETRACION



MODO DE EMPLEO: Defina un punto "X", correspondiente al contenido de asfalto y a la penetración del pavimento envejecido, dibuje una línea recta desde el origen 0, a través de X, la intersección de esta línea con una línea vertical que representa el contenido de asfalto deseado para el pavimento reciclado (asfalto envejecido + agente rejuvenecedor) da la predicción aproximada de la penetración del asfalto rejuvenecido.

## CAPITULO III

### UNA NUEVA ALTERNATIVA EN LOS PAVIMENTOS ( HULE )

#### a) OBTENCION DEL HULE

El hule natural del Amazonas se obtiene de ciertas plantas que exudan sustancias blancas, lechosas cuando se hace una incisión, producen látex, varias especies silvestres de Hevea, aunque la más usada actualmente es la hevea Brasiliensis, originaria de la región del Amazonas.

El tamaño del árbol es de una altura media, de doce a quince metros y requiere de un clima cálido-húmedo, con una precipitación pluvial de ciento ochenta a doscientos cincuenta milímetros, aunque también puede crecer en zonas templadas, pero su rendimiento es notablemente bajo. Su vida económica empieza a los seis años después de haber sido plantado si es tratado adecuadamente, puede llegar a una vida activa de veinte años.

El hule se obtiene del árbol por medio de un tratamiento sistemático de sangrado, que consiste en hacer un corte en forma de ángulo a través de la corteza, profundizándose hasta el "cambium", donde el jugo lechoso fluye lentamente por la herida realizada. La composición del látex varía en las distintas partes del árbol; generalmente el porcentaje del hule (hidrocarburo) decrece del tronco a las ramas y hojas, también en determinadas épocas del año afectan a éste, así como el tipo de suelo.

El caucho es una secreción irreversible cuanto más se extrae tanto más la planta lo regenera, este es producido en el protoplasma por reacciones bioquímicas de polimerización ca-

talizadas por enzimas.

El análisis del látex ha demostrado que se compone aproximadamente de: 35% de caucho, 3% de sustancias no gomosas y el 62% de agua.

Por otra parte tenemos el arbusto guayule perteneciente a la familia de las compuestas, es una fuente de hule natural en América del Norte, es un árbol indígena en el centro y norte de México y se extiende hasta Texas; para el cultivo de éste arbusto que habita en un ambiente semidesértico, es necesario un tiempo mínimo de tres años de vida para que el guayule adquiera la madurez.

Lo contrario que en el árbol de Hevea, el látex circula por un sistema de canales, el hule en el guayule está encerrado en células. Para obtener el producto se deshoja el arbusto en agua hirviendo (las hojas contienen una cantidad insignificante de látex), se corta en trosos de unos tres milímetros, se muelen con piedras de pedernal en un molino parcialmente lleno de agua, se deja flotar el hule, se sedimentan los residuos en un tanque de flotación con agua, se hierven para extraer el material ocluido, se hace otra nueva flotación y se seca el caucho bruto. Los resultados de látex obtenidos por este procedimiento son aproximadamente de 70% de hidrocarburo de caucho, que es principalmente celulosa y lignina. Al alcanzar mayor madurez, las plantas dan mejor calidad de hule.

El caucho de guayule es químicamente idéntico al caucho bruto de Hevea. Una vez que se ha extraído el látex del árbol, este requiere algunos procesos de limpieza para efectuar seguidamente el ciclo de coagulación, que se desarrolla añadiéndose algunos ácidos como: el fórmico, que está considerado como el

mejor de los coagulantes, así como el ácido acético, el alumbre ordinario y el alumbre de amonio, etc., cuya dosificación depende del estado de los árboles y de las condiciones climáticas.

Tenemos otros tipos de árboles pertenecientes a la familia de las sapotaceas de los que se obtiene la guatapercha, son árboles indígenas de Malaya, Borneo y Sumatra. La guatapercha silvestre se obtenía en un principio cortando el árbol y despojándolo de la corteza; el tronco exudaba entonces la goma, que se arrancaba del mismo por rascado en masas coaguladas. Hoy la mayor producción se obtiene de plantaciones formadas por híbridas de especies de paladium. Las hojas maduras se recogen periódicamente y se trituran en molinos que liberan las fibras de guatapercha con poca desintegración del polímero. La masa se trata entonces con agua a unos 70°C de temperatura durante treinta minutos para que los tejidos de las hojas se ablanden, esta masa se sumerge en agua fría y la guatapercha asciende a la superficie, de donde es recogida. Además de la extracción de la guatapercha de las hojas, los árboles pueden ser sangrados sistemáticamente como se hace con el hevea.

La guatapercha tiene la misma fórmula empírica que el hidrocarburo del caucho, pero mientras el caucho es el isomero cis, la guatapercha es el isomero trans. Lo contrario que el caucho, es insoluble en la mayoría de los hidrocarburos alifáticos, pero se disuelve en los hidrocarburos aromáticos y clorados.

A partir del año 1860, muchos investigadores científicos se dedicaron a la tarea de encontrar sustitutos del hule natural, el Inglés Greville Williams, descubrió que por destilación del

hule se obtenía un líquido (isopreno) del que se producía una masa blanca, esponjosa y elástica. Poco después el Francés - Gustave Bouchardot, mezcló ácido clorhídrico con isopreno, lo calentó en un tubo cerrado y obtuvo una masa sólida parecida al hule natural. En 1884, Sir William Tilden preparó isopreno con esencia de trimentina y lo convirtió en otro producto semejante al hule.

Por este mismo tiempo, Charles Goodyear patentó su descubrimiento de calentar el hule con el azufre, a fin de aumentar su resistencia a la tracción, su elasticidad y la resistencia del producto al hinchamiento.

Posteriormente se desarrollaron nuevos ajustes en la mezcla vulcanizada, agregándole ciertas sustancias de aceleración para que se efectuara con mayor rapidez el proceso de vulcanización.

#### b) METODO DE APLICACION A LOS PAVIMENTOS

El método para incorporar el hule a los materiales de pavimentación depende del material que se va a utilizar. Así tenemos que en tratamientos superficiales es esencial dispersar el hule en el aglomerante, mientras que en los aglomerados es posible añadir el polvo de hule o el látex en el mezclador. El método de adición del hule, cuando es distinto de la dispersión directa en el aglomerante, varía con el tipo de mezcla utilizado.

Es posible verter el látex en el asfalto en caliente pero se debe tener cuidado con el proceso. El látex se añade muy lentamente para evitar la formación de espuma o en todo caso se puede utilizar un agente antiespumante. Si se añade el látex rápidamente agitando inmediatamente puede producirse un in

cremento de volumen hasta de 200%. Otra alternativa es añadir azufre con el látex, para producir modificaciones adicionales en las propiedades del aglomerante. Se ha observado que dejando reposar el látex sobre la superficie del asfalto durante treinta segundos aproximadamente, se reduce la formación de espuma, pero el hule tiende a coagularse y es necesaria una agitación prolongada o una circulación entre 150 y 170°C para dispersarlo adecuadamente. Si ha de utilizarse un asfalto fluidificado, el látex puede dispersarse en el disolvente antes de su adición al asfalto base. Sin embargo la mezcla hule-disolvente tiende a gelificarse atrapando agua, en cuyo caso es necesario el calentamiento durante una hora a 160°C para producir una mezcla que pueda verterse.

El método de añadir el hule en forma de latex a un asfalto fluidificado ha sido desarrollado por el Road Laboratory. Se añade el látex a una mezcla de disolvente y asfalto a temperatura ambiente. Esta mezcla con hule se calienta después aproximadamente a 120°C, en cuyo momento el agua se habrá evaporado para de esta manera no formar espuma. El material resultante contiene hule no degradado y puede mezclarse fácilmente con el resto del asfalto por circulación en el depósito de un distribuidor. Las principales ventajas del empleo comercial del látex son el reducido costo del hule y el incremento de las propiedades deseables del aglomerante que produce el latex.

El polvo de hule puede añadirse al asfalto en caliente recirculando la mezcla aproximadamente a 150°C para dispersar el hule. El polvo no vulcanizado se dispersa más fácilmente como consecuencia del estado del hule y la finura del hule en polvo. Los polvos vulcanizados son más gruesos y como conse--

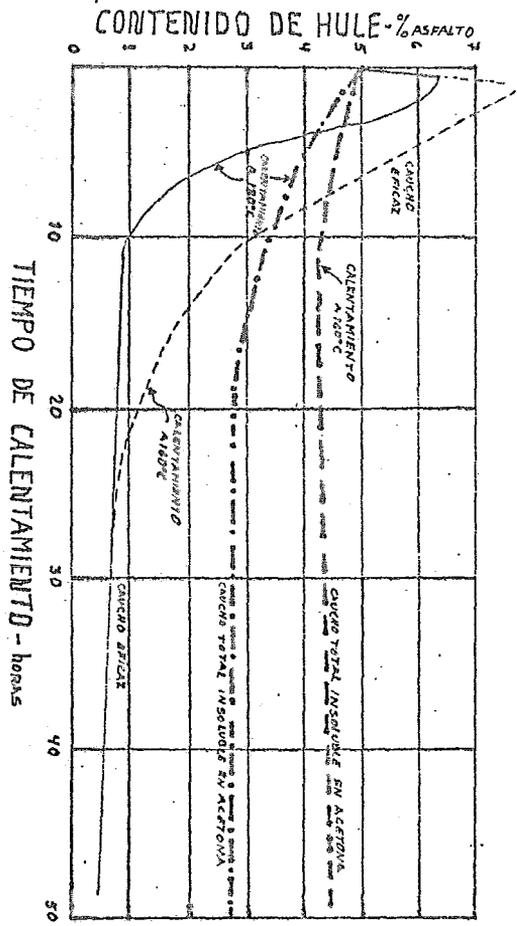
cuencia de la vulcanización son más difíciles de dispersar.

El hule en hojas se ha dispersado en asfalto con éxito, pero es necesario primeramente masticar el hule para degradarlo, de tal forma que pueda obtenerse una buena dispersión. Sin embargo, la ventaja que supone ligeramente menor de este tipo de hule puede ser superada por el costo del proceso de masticación. En caso de ser necesaria una dispersión fina de hule, como la necesaria para los tratamientos superficiales, no es posible utilizar goma de neumáticos molida, ésta sin embargo, puede dispersarse en grado suficiente para su adición al mástico asfáltico.

#### EFFECTOS DEL CALOR Y LA MASTICACION EN EL HULE AÑADIDO AL ASFALTO

La molécula de hule natural se compone de una cadena muy larga de muchas unidades tipo isopreno ( $-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-n$ ) retorcida en forma helicoidal, lo que produce la elasticidad del hule. Esta cadena larga puede dividirse en varias más pequeñas por diversos procesos, en cuyo caso se dice que el hule se degrada.

El calentamiento y el molido son dos de los procesos que conducen a la degradación del hule. La velocidad de degradación depende de la temperatura y del material en que se dispersa el hule. La figura de la hoja siguiente muestra el efecto del calentamiento sobre pequeñas muestras de un asfalto de penetración -50 fluidificado con un 17% de keroseno y que contiene un 5% de hule (respecto al asfalto sin fluidificar). El calentamiento se llevó a 160 y a 180°C. El contenido total de hule de aglomerante se estimó utilizando como criterio el índice de yodo y el contenido "efectivo" de hule se determinó midiendo la viscosidad específica de una solución del aglomerante en benceno. Se verá



que por calentamiento se produjo cierta perdida del contenido total de hule, particularmente a la temperatura más elevada; el contenido de hule "efectivo" se elevó durante un breve periodo inicial, descendiendo despues rápidamente, particularmente a la temperatura más elevada. Despues de veinticuatro horas de calentamiento solamente era efectiva aproximadamente la decima parte del hule añadido.

#### TIPOS DE HULE NATURAL UTILIZADOS EN PAVIMENTACION

1) LATEX.- Es una suspensión de globulos de hule en un suero acuoso. La composición del latex varia en el proceso utilizado tanto en concentración como en los agentes estabilizantes añadidos.

HOJA DE HULE.- Pueden utilizarse varios tipos de hojas de hule compuestas de látex coagulado.

POLVO DE HULE.- Se fabrica por pulverización y secado del latex o por molido de coagulos ligeramente vulcanizados.

NEUMATICOS MOLIDOS.- Es el polvo procedente de la molienia de neumáticos usados.

Los polvos de hule pueden obtenerse comercialmente en varias formas, que son las siguientes:

"PULVATEX"--- Polvo de hule no vulcanizado que contiene aproximadamente un 40% de filler inerte.

"MEALORUB"--- Polvo ligeramente vulcanizado que contiene aproximadamente un 96% de hule, actualmente no suele encontrarse.

"HARCROMB"--- Esencialmente similar al mealorub. Se fabrica en Indochina.

"RODORUB" --- Polvo ligeramente vulcanizado que contiene un 75% de hule natural y un 25% de filler inerte.

Para incorporar y homogeneizar el hule en estado líquido viscoso con el asfalto, es necesario transformar el hule en polvo al estado líquido viscoso y obviamente se necesita un disolvente apropiado. En el mercado existen algunos productos comerciales, derivados de la destilación del petróleo, que pertenecen a la familia de los aceites aromáticos y nafténicos, que son útiles para este propósito. A continuación una lista de dichos productos:

NOMBRE DEL PRODUCTO	CASA COMERCIAL
Aceite Ameyol 300-U	Cia. Química Ameyol, S.A.
Aceite Ameyol 310	Cia. Química Ameyol, S.A.
Proar-295	Protecín, S.A. de C.V.
Proar-280	Protecín, S.A. de C.V.
Proar-2230	Protecín, S.A. de C.V.
Pronaf-290	Protecín, S.A. de C.V.
Pronaf-1300	Protecín, S.A. de C.V.
Pronaf-1500	Protecín, S.A. de C.V.

Para la elaboración de una mezcla asfalto-aceite-hule, llevada a cabo por el Ing. Arnoldo Román Lizarraga, se eligió como disolvente el aceite Ameyol 300-U (aceite aromático manchante). Teniendo el aceite plastificante para el hule vulcanizado, se procedió a la preparación de cinco mezclas aceite-hule, con diferentes porcentajes de ambos componentes, así como el tiempo y las temperaturas a que fueron sometidos según la tabla siguiente:

COMPONENTES	% EN PESO	RANGO DE TEM- PERATURA DE FUSION °C	TIEMPO DE FUSION (min)	APARIENCIA
HULE	ACEITE			
20	80	230-245	90	muy fluida
				continúa tabla

continuacion tabla.

25	75	230-245	99	fluida
30	70	230-245	107	viscosa
35	65	230-245	115	muy viscosa
50	50	230-245	140	plástica

De las mezclas anteriores se tomo la tercera (30% hule y 70% aceite).

Finalmente se procedió a las mezclas asfalto-hule-aceite, para lo cual se estimó conveniente precalentar ambos componentes a la misma temperatura, para posteriormente mezclarlos y homogeneizarlos durante un periodo de tiempo igual en todos los casos. -- Los proporcionamientos, temperaturas y tiempo de mezclados se informan en la siguiente tabla:

COMPONENTES % EN PESO ASFALTO.	MEZCLA HULE-ACEITE (30-70)	TEMPERATURA DE MEZ- CLADO DE LOS COMPO- NENTES °C	TIEMPO DE MEZCLADO EN min.
97	3	140	10
94	6	140	10
91	9	140	10
88	12	140	10

Para conocer la calidad de un producto y tener una idea del posible comportamiento del mismo, bajo condiciones de servicio, es necesario someterlo a una serie de pruebas que nos permitan detectar sus características importantes.

Con este fin, a las mezclas asfalto-aceite-hule, anteriormente descritas, se les hicieron pruebas que las Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas marcan para los productos asfálticos que se

emplean en la construcción de carpetas de rodamiento y cuyos resultados fueron:

CARACTERISTICAS	ASFALTO SOLO	PROPORCIONES % EN PESO DE LA MEZCLA ASFALTO-HULE-ACEITE (30-70)			
		97-3	94-6	91-9	88-12
		Penetración 100 gr. en 5 seg. a 25°C	78	94	140
Viscosidad saybolt-fu rol a 135°C en seg.	225	218	198	178	159
punto de inflamación copa cleveland en °C	260	260	265	260	258
punto de reblandeci- miento en °C	44	46	53	52	49
ductilidad a 25°C en cm.	118	56	51	45	40
peso específico a 25°C/25°Cgr./cc	1035	1038	1040	1042	1044

### c) VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL HULE

Quienes han trabajado en esto, están de acuerdo en que la incorporación del hule al asfalto tiene un efecto considerable sobre los resultados obtenidos en los diversos ensayos aceptados para la clasificación de los asfaltos. Así entonces, aunque es sencillo incrementar la viscosidad de un aglomerante normal, con el consiguiente aumento de la fragilidad. Desglosando, tenemos:

## PROPIEDADES VISCOSAS

La adición de hule a un aglomerante alterará siempre sus propiedades de fluencia medidas por diversos ensayos normalizados -- como pueden ser; los de penetración y punto de reblandecimiento. El efecto aparente del hule depende del ensayo utilizado, como consecuencia de las diferentes condiciones impuestas al material ensayado. Durante un período de calentamiento inicial la dispersión del hule parece crecer y los cambios debidos a su presencia son progresivamente más intensos durante este tiempo. Es de notar que si se prolonga el calentamiento durante un tiempo más largo o a una temperatura elevada, los efectos observados tienden a disminuir otra vez. El hule sufre cambios importantes y en dichos casos puede actuar como un aceite fluxante que reblandece el aglomerante. Todas las propiedades de fluencia dependen también del tratamiento térmico de la mezcla.

### VISCOSIDAD ABSOLUTA

Si se mide la viscosidad absoluta del aglomerante en un viscosímetro de cilindros coaxiales del tipo Couette, se encuentra -- que la adición de hule hace crecer los valores obtenidos, siendo mayor el incremento cuanto mayor es el porcentaje de hule. El incremento es más acentuado con los asfaltos más blandos, y el incremento del logaritmo de la viscosidad a 25°C era proporcional al contenido de hule.

### PUNTO DE REBLANDECIMIENTO

Se ha observado que la adición de hule hace crecer el punto de reblandecimiento del aglomerante. El efecto sobre el punto de reblandecimiento, en terminos generales, es menor si se utiliza un polvo vulcanizado. Los experimentos realizados por Welborn y Babashak han mostrado en el punto de reblandecimiento al agregar

le hasta un 15% de azufre libre en el látex de hule.

#### PENETRACION

El hule tiene por efecto reducir la penetración de un aglomerante en casi todos los casos, con algunas excepciones. Como en el caso de Welborn y Lewis, utilizando un asfalto de California de bajo contenido de asfaltenos, observaron un aumento en el valor de la penetración con contenidos crecientes de hule. Así como la adición de azufre libre con el hule hace crecer la penetración.

#### SUSCEPTIBILIDAD TERMICA

Para valorar numéricamente la susceptibilidad térmica de los aglomerantes se utilizan varias fórmulas. La más empleada en las investigaciones sobre hule-asfalto es el índice de penetración de Pfeiffer entre 25°C y el punto de reblandecimiento. De Decker y Nijveld utilizan un "coeficiente de susceptibilidad" para temperaturas comprendidas entre 15 y 25°C. Mientras que Smith utilizó el coeficiente de temperatura logarítmico. Sea cual sea la fórmula utilizada, se ve que el hule reduce la susceptibilidad térmica en todo el campo de temperaturas, observándose los efectos más intensos con los asfaltos más blandos.

#### ELASTICIDAD

Cuando se dispersa el hule en el asfalto, es fácilmente observable el aumento de la elasticidad. Las mediciones de la recuperación elástica muestran un aumento de la elasticidad con todos los tipos de asfalto y hule. De Decker observó que inicialmente el polvo de hule no vulcanizado producía una mejora más importante en este aspecto; pero después de periodos de calentamiento más prolongados el hule vulcanizado dió mejores

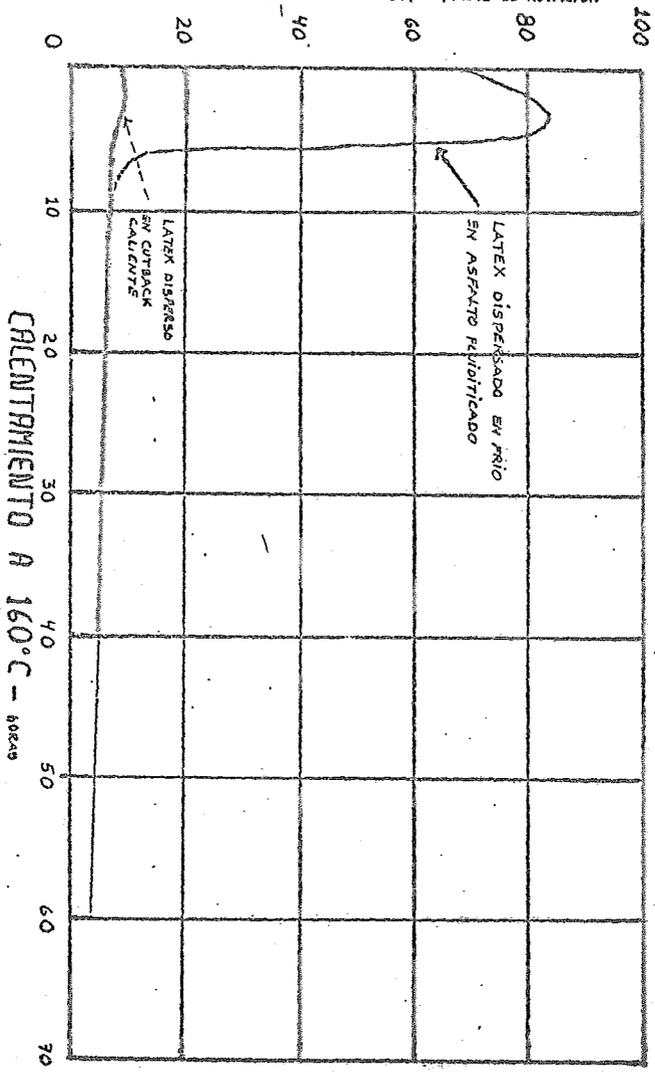
resultados. Esto puede deberse a la velocidad de dispersión, - que es mayor cuando se emplean materiales no vulcanizados. Investigaciones del Road Research Laboratory han indicado que si se dispersa bien el látex en el asfalto a temperatura ambiente, calentando después, se obtiene, después de un breve período de calentamiento, una elasticidad muy mejorada respecto a la de un material preparado por dispersión a alta temperatura. (ver figura de la hoja siguiente).

#### DUCTILIDAD

No se observaron mejoras en esta propiedad a menos que se añadiera un 10% de azufre con respecto al hule.

Como se ve, las ventajas que se obtienen en las carpetas asfálticas al agregarle hule son considerables.

RECUPERACION ELASTICA - GRADOS DE ROTACION



CALENTAMIENTO A 160°C - HORAS

LATEX DISPERSADO EN ASFALTO FLUIDIFICADO

LATEX DISPERSADO EN CUTBACK CALIENTE

## CAPITULO IV

### PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE UN PAVIMENTO CON HULE

#### a) MANTENIMIENTO

Los procedimientos para la construcción de pavimentos asfálticos son aplicables a la construcción de pavimentos con hule como aditivo.

El hule se añade algunas veces al agregado y en otras ocasiones va unido al material asfáltico. Antes que nada, hablemos un poco del asfalto. Como sabemos, el asfalto, químicamente es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene de la destilación del petróleo. La destilación puede ser natural o en plantas construidas por el hombre, para tal objeto.

#### CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS

De acuerdo con las especificaciones de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas y Petróleos Mexicanos, los asfaltos para caminos se clasifican en: Asfaltos Rebajados

Cementos Asfálticos

Emulsiones Asfálticas

Los Asfaltos Rebajados a su vez se sub-dividen en:

	F.L-0
	F.L-1
Fraguado Lento	F.L-2
	F.L-3
	F.L-4
	F.M-0
	F.M-1
Fraguado Medio	F.M-2
	F.M-3
	F.M-4

F.R-0

F.R-1

F.R-2

Fraguado Rápido F.R-3

F.R-4

Tenemos los siguientes tipos de Cementos Asfálticos:

Número 3

Número 6

Número 7

Número 8

Número 9

Números 10 y 10-2

Las Emulsiones Asfálticas pueden ser:

Fraguado Rápido

Fraguado Lento

El asfalto refinado se produce en una variedad de tipos y calidades, que varían desde los sólidos duros y quebradizos hasta líquidos casi tan fluidos como el agua. La forma semisólida conocida como cemento asfáltico es el material básico, pues de él se parte para la obtención de los asfaltos rebajados y las emulsiones. Definamos cada uno de ellos:

a) Cementos Asfálticos, que son los productos de la destilación del petróleo asfáltico al que se han eliminado sus solventes volátiles y parte de los aceites, cuya penetración normal varía entre 40 y 300 grados.

b) Asfaltos rebajados de fraguado rápido, que son los productos que se obtienen mediante la adición de gasolina o nafta a un cemento asfáltico.

c) Asfaltos rebajados de fraguado medio, que son los productos que se obtienen mediante la adición de kerosene a un cemento asfáltico.

d) Asfaltos rebajados o residuales de fraguado lento, que son residuos asfálticos de la destilación del petróleo crudo o cemento asfáltico rebajado con destilado de volatilización lenta. A estos asfaltos se les llama también aceites para caminos y rara vez se obtienen partiendo del cemento asfáltico.

e) Emulsiones asfálticas, que son dispersiones estables de un cemento asfáltico en agua.

En la figura (IV-1) se representa el proceso de destilación que se sigue en la obtención de los productos asfálticos del petróleo. En la figura (IV-2), representamos gráficamente y fuera de escala los componentes de cada uno de los productos asfálticos líquidos. Asimismo, en la figura (IV-3) tenemos un cuadro gráfico que, además de tabular las características de los productos asfálticos.

#### PAVIMENTOS ASFALTICOS

Los pavimentos asfálticos, de acuerdo con los materiales empleados y los procedimientos de construcción se clasifican en dos grupos principales, que a su vez comprenden sub-grupos:

##### I. Carpetas construidas a base de mezclas. (Concreto asfáltico)

a) Por el sistema de mezclas en planta estacionaria.

b) Por el sistema de mezclas en el lugar.

##### II. Carpetas construidas a base de riegos.

a) Tratamiento de un solo riego (incluyendo el riego de in-regnación a la base).

b) Tratamiento de riegos múltiples (dos o cuatro riegos).

El primer grupo, seleccionado para tránsito pesado, incluye las carpetas que se construyen mediante el mezclado, tendido y compactación de materiales pétreos y asfalto o un producto asfáltico.

El segundo grupo, seleccionado para tránsito ligero, incluye las carpetas que se construyen mediante uno o más riegos de pró

DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LA RECUPERACION Y REFINO DE PRODUCTOS ASFALTICOS DE PETROLEO

POZO DE PETROLEO

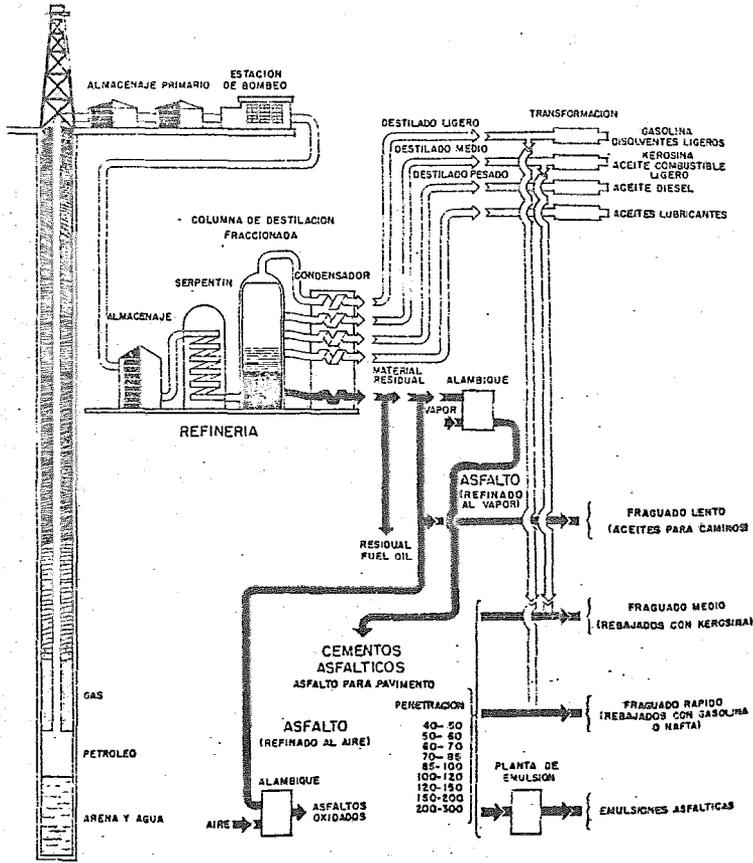


FIGURA IV-1.- GRAFICA DE MARCHA

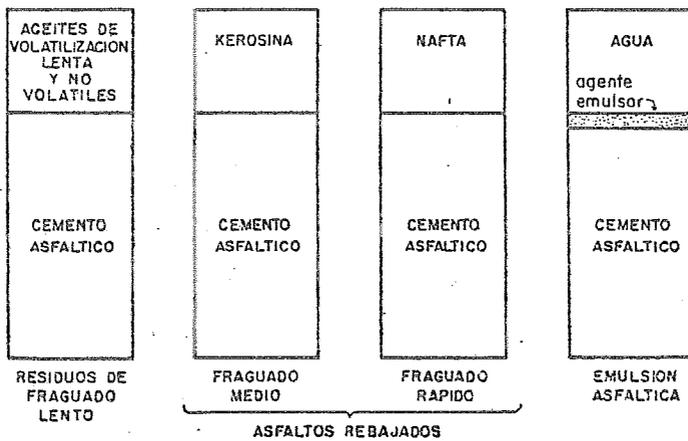


FIGURA IV-2.- PRODUCTOS ASFALTICOS LIQUIDOS

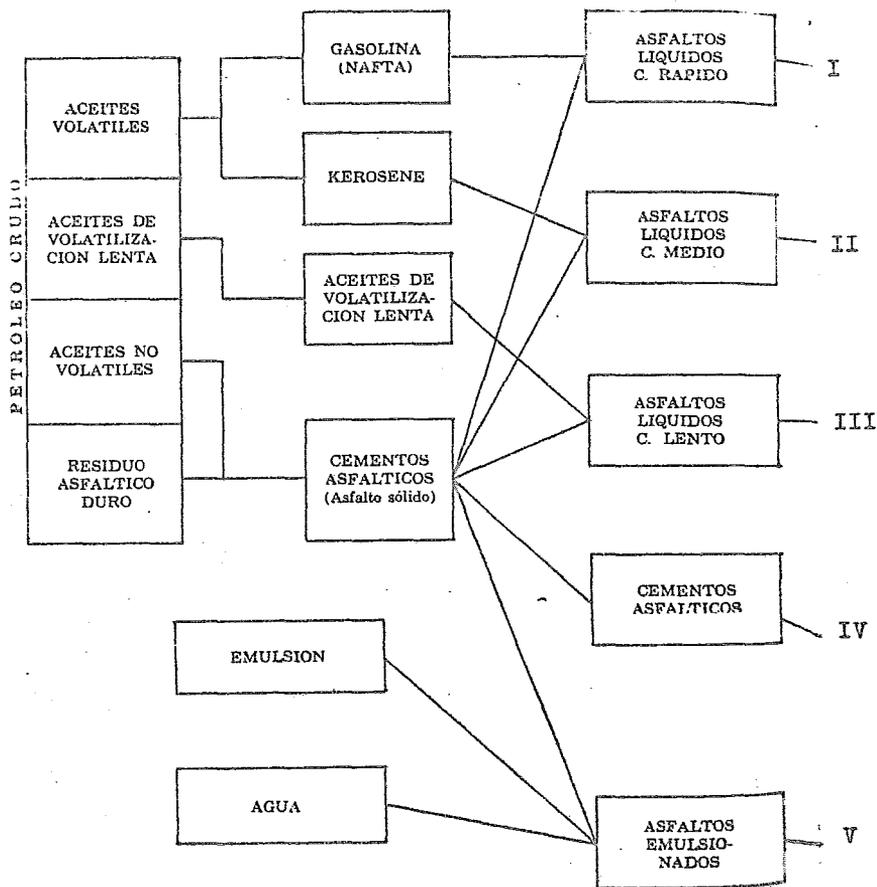


FIGURA IV-3.- TIPOS DE ASFALTOS USADOS EN PAVIMENTACION

(CONTINUA TABLA..)

Desig- nación	Viscosidad furoi		Contenido de asfal- to sólido 80-120 pe- netración. Mínima	Temp. de aplicación en °C			
	Temp.	Seg.		Tendido		Mezcla	
				Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
FR-0	a 25°C	75-150	50%	10°C	49°C	10°C	49°C
FR-1	a 50°C	75-150	60%	27°C	65°C	27°C	52°C
FR-2	a 60°C	100-200	67%	38°C	79°C	27°C	65°C
FR-3	a 60°C	250-500	73%	65°C	93°C	52°C	93°C
FR-4	a 82°C	125-250	78%	79°C	120°C	79°C	107°C

I

(120-300)

FM-0	a 25°C	75-150	50%	10°C	49°C	10°C	49°C
FM-1	a 50°C	75-150	60%	27°C	65°C	27°C	65°C
FM-2	a 60°C	100-200	67%	38°C	93°C	65°C	93°C
FM-3	a 60°C	250-500	73%	79°C	121°C	79°C	93°C
FM-4	a 82°C	125-250	78%	93°C	134°C	93°C	118°C

II

(100)

FL-0	a 25°C	75-150	40%	10°C	49°C	10°C	49°C
FL-1	a 50°C	75-150	50%	32°C	93°C	27°C	93°C
FL-2	a 60°C	100-200	60%	65°C	93°C	65°C	93°C
FL-3	a 60°C	250-500	70%	79°C	121°C	79°C	120°C
FL-4	a 82°C	125-250	75%	79°C	121°C	79°C	120°C

III

IV

Desig- nación	Penetra- ción a 25°C	Ductilidad a 25°C mínimo	Temperatura de fusión o reblandecimiento	Temperatura de aplicación
Núm. 3	180-200	100	37°C-43°C	120°C-160°C
Núm. 6	80-10	100	45°C-52°C	120°C-160°C
Núm. 7	80-70	100	48°C-56°C	120°C-160°C
Núm. 8	40-50	100	52°C-60°C	120°C-160°C

V

Desig- nación	Características del asfalto sólido				
	Visco- sidad furoi a 25°C en seg	Demulsi- bilidad con Ca Cl <sub>2</sub>	Penetra- ción a 25°C	Ducti- lidad a 25°C	Tempe- ratura de aplicación
FR	100 máx	30% mín	100-200	+40 cm	5°C-40°C
FL	100 máx	1% mín	100-200	+40 cm	5°C-40°C

FIGURA IV-3 (CONTINUACION)

ductos asfálticos, cubiertos sucesivamente con capas de materiales pétreos de diferentes tamaños.

Un componente principal en una mezcla asfáltica es el material pétreo y ocupa un volumen aproximado del 85% del total, por lo que es necesario tomarlos en cuenta.

#### AGREGADOS

Para toda carpeta asfáltica, el agregado contribuye a su estabilidad mecánica, soporta el peso de los vehículos y al mismo tiempo transmite las cargas a la sub-base a una presión reducida. Constituyen también a causa del gran tonelaje empleado en la construcción de carreteras, un elemento costoso, siendo el factor principal el acarreo; para lo cual es necesario seleccionarlo, buscando su economía de acuerdo al servicio que ha de prestar la carretera. El constructor deberá, por lo tanto, considerar los agregados de la localidad, estudiando su costo de preparación y compararlo con el de los agregados distantes que resultan caros por el transporte.

Los materiales pétreos para carpetas o superficies asfálticas se clasifican en tres grupos:

- a) materiales naturales que no requieren ningún tratamiento, tales como: arenas de río, limos para mejoramientos, gravillas con arena, arenas graníticas, areniscas, etc.
- b) Materiales naturales o escorias de fundición que requieren un tratamiento previo de cribado o trituración.
- c) Mezclas de materiales del grupo (a), del grupo (b), o de ambos.

La estabilidad de un material suelto se alcanza, generalmente, cuando se logra su máxima compacidad; para ello, se requiere una sucesión de tamaños, a modo de que los huecos dejados por las partículas mayores sean ocupados por partículas de menor tamaño y que a la vez, los huecos que dejan éstas sean ocupadas por partí

culas más finas y así sucesivamente. La granulometría se determina por la separación, mediante tamices de abertura cuadrada de los diversos tamaños de las partículas, pesando las porciones retenidas en cada tamiz, a fin de relacionar dichos retenidos como un porcentaje de la muestra total. La composición granulométrica así obtenida representa la distribución de los diferentes tamaños que componen el material granular.

La gráfica de la fig. (IV-4) representa zonas granulométricas entre las cuales ha de quedar comprendida la curva representativa de cualquier material granular que se selecciona para una carpeta asfáltica; debiendo afectar una forma semejante a las de las curvas ideales que limitan las zonas, por lo menos, en dos terceras partes de su longitud, sin presentar cambios bruscos de pendiente. Se aconseja que el tamaño máximo del agregado sea menor que dos tercios que el espesor de la carpeta.

Para que un material granular grueso sea satisfactorio para integrar las carpetas asfálticas, es necesario que tenga suficiente tenacidad para resistir la acción del planchado durante la construcción y la acción del tránsito sin que sufran fractura bajo la carga impuesta. Es lo que se llama Resistencia al Desgaste.

El material pétreo ha de ser resistente y estable a la acción intempérica y los que no resisten a esta acción deben de considerarse defectuosos y malos como agregados para pavimentos.

Los materiales pétreos granulares que han de utilizarse en la formación de carpetas asfálticas, deben estar limpios de polvos y sin contaminación de sustancias orgánicas, arcillas, etc.

Los agregados debido a su forma externa presentan una mayor o menor resistencia al deslizamiento de sus partículas bajo la acción de la carga rodante. Esta resistencia motivada por el acúñe o trabazón de las partículas y por la fricción superficial de las mismas, es la propiedad denominada fricción interna de los agre-

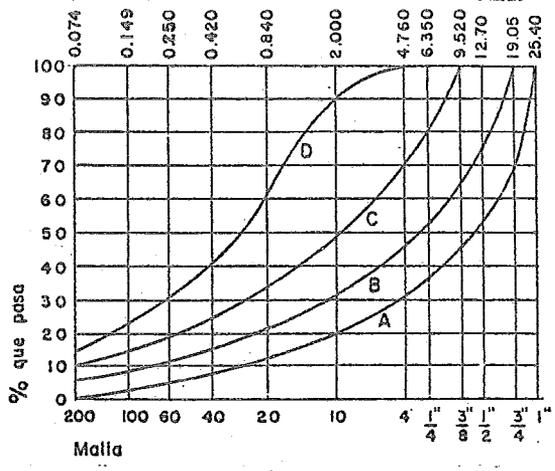


FIGURA IV-4.- GRAFICA DE COMPOSICION GRANULOMETRICA

gados.

No todos los agregados se adhieren con igual facilidad a los asfaltos, aquellos que presentan alta afinidad se denominan "Hidrófobos" y básicamente son de origen calcáreo, como los basalitos, calizas y dolomíticas; en cambio los agregados de naturaleza silicosa, como la cuarcita, presentan dificultad para ser cubiertos por los asfaltos y con facilidad se desprenden de los mismos; a éstos se les llama "Hidrófilos".

Las fallas encontradas en los pavimentos asfálticos, debidas a falta de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, obedecen en la mayor parte de los casos a la introducción del agua en la carpeta asfáltica. Si el agregado pétreo, o mejor dicho, su superficie presenta mayor afinidad al agua que al asfalto, la primera es atraída hacia la superficie de la partícula, desalojando la película de asfalto, quedando destruida la adherencia existente entre ambos materiales, tan necesaria para darle estabilidad a la carpeta.

#### IMPREGNACION

Antes de proceder a la construcción de cualquier tipo de carpeta asfáltica, hay necesidad de impregnar la base terminada. Esto se logra con el riego de un producto asfáltico rebajado de fraguado medio o lento, cuya función es impregnar superficialmente y hasta la profundidad que penetra el asfalto, permitiendo una transición entre la base y la carpeta asfáltica. El riego de impregnación o de imprimación, tiene por objeto actuar como agente adherente, así como sello de junta entre la base y el nuevo pavimento, dando a la base mayor impermeabilidad, resistencia al intemperismo y a la abración, y protección durante el tiempo que transcurre entre su terminación y la construcción de la carpeta o nuevo pavimento.

Terminada la base, de acuerdo con las normas que rigen su --

construcción, la impregnación de la misma se ha de sujetar a los siguientes puntos generales:

- 1.- Barrido, con escobas, cepillos de mano o barredoras mecánicas, con el objeto de eliminar de la base todo el polvo suelto y materias extrañas que se encuentran en su superficie. El clima elimina ese lubricante entre la base y la nueva superficie de rodamiento, que impide toda adherencia en detrimento de la durabilidad del pavimento.
- 2.- Riego de asfalto, por medio de una petrolizadora, dotada de equipo de calentamiento, bomba de presión, tacómetro y todos los aditamento necesarios para su buen funcionamiento y la distribución uniforme del número de litros/m<sup>2</sup> que hayan sido especificados. Este riego deberá aplicarse cuando la temperatura ambiente sea mayor de 5° C, cuando no amenace lluvia o que la base no se encuentre mojada, y cuando la intensidad del viento no impida una distribución uniforme del producto.
- 3.- El tipo de producto asfáltico (generalmente los rebajados de fraguado medio FM-0 y FM-1), la cantidad por m<sup>2</sup> que se riegue, así como si conviene ser regada en una o dos aplicaciones, deberá de fijarse en las especificaciones que gobiernan la construcción del camino. El asfalto tipo FM-0 se usa para bases cerradas y la cantidad recomendada varía entre 0.9 l/m<sup>2</sup> y 1.6 l/m<sup>2</sup>. El tipo FM-1, que proporciona mejores resultados sobre base de tipo abierto, se aplica entre 1.4 y 2.8 l/m<sup>2</sup>. Las cantidades señaladas son los límites y la cantidad adecuada depende del tipo base. Cualquiera que sea la cantidad de asfalto seleccionado deberá de ser absorbido entre las 24 horas después de ser aplicada, con un periodo normal de curación de 48 horas.

4.- Deberá procurarse siempre calcular la cantidad de asfalto, y se aconseja una disminución en vez de aumento, pues así, cualquier cantidad no absorbida es tomada por el material del nuevo pavimento y la superficie no mostrará exudación alguna, que es perjudicial.

5.- Se debe exigir que la base impregnada sea cerrada al tránsito, hasta que el producto asfáltico haya penetrado y -- fraguado superficialmente. Si esto no es posible, el rie-- go asfáltico de impregnación deberá de cubrirse con arena fina y seca para evitar el afloramiento del asfalto. An-- tes de aplicar la carpeta asfáltica, deberá barrerse la - superficie para quitar la arena que ha quedado suelta.

#### CARPETA ASFALTICA

Tenemos dos procedimientos para construir la carpeta asfáltica: por el sistema de riegos y a base de mezclas. Las primeras son - las que se construyen mediante uno o más riegos de productos asfálticos cubiertos sucesivamente con capas de material pétreo de diferentes tamaños, triturados o cribados. Estas carpetas pueden ser de uno, dos, tres o cuatro riegos de productos asfálticos, y se les designa por el número de riegos que intervienen en su cons-- trucción. Dado el sistema constructivo que se sigue en este tipo de carpetas asfálticas se les designa también con el nombre de - Carpetas Asfálticas de Penetración Invertida, o de Tratamiento - Superficiales.

Los materiales pétreos que se emplean en la construcción de - carpetas por el sistema de riegos, según las normas de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, se clasifican - como se indica en la tabla (IV-1).

En la construcción de carpetas por el sistema de riegos, la - combinación de los distintos tamaños de materiales pétreos, así

TABLA IV-1

CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS PARA CARPETAS CONSTRUIDAS POR  
EL SISTEMA DE RIEGOS

Material pétreo	Que pasa por malla	Que se retiene en malla
Núm. 0	3.81 cm (1½")	2.54 cm (1")
Núm. 1	2.54 cm (1")	1.27 cm (½")
Núm. 2	1.27 cm (½")	0.63 cm (¼")
Núm. 3-A	0.95 cm (⅜")	Núm. 3
Núm. 3-B	0.63 cm (¼")	Núm. 3

TABLA IV-2

CANTIDADES DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION DE CARRETERAS  
ASFALTICAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS

Material Pétreo	Un riego	Dos riegos	Tres riegos	Cuatro riegos
Núm. 0				de (0.6 a 1.1) 0 de 30 a 40
Núm. 1			de (0.6 a 1.1) 1 de 20 a 26	de (1.4 a 1.8) 1 de 15 a 25
Núm. 2		de (0.6 a 1.1) 2 de 8 a 12	de (1.0 a 1.4) 2 de 8 a 12	de (0.8 a 1.1) 2 de 8 a 12
Núm. 3	de (0.9 a 1.2) 3-A de 8 a 10	de (0.8 a 1.1) 3-B de 6 a 8	de (0.7 a 1.0) 3-B de 6 a 8	de (0.7 a 1.0) 3-B de 6 a 8

NOTA. Los valores dentro de paréntesis corresponden al material asfáltico (l/m²) y los valores subrayados al material pétreo (l/m³).

como las cantidades de éstos y de asfalto (cemento asfáltico, - contenido en los productos rebajados o emulsiones) en litros por metro cuadrado, (ver tabla IV-2).

Dentro de las carpetas construidas a base de mezclas, se agrupan todos los pavimentos construidos a base de mezclas asfálticas, mismas que pueden fabricarse en plantas estacionarias, plantas móviles o por mezclas directas sobre el camino. Dentro de estas mezclas se encuentran los concretos asfálticos, mismos que pueden elaborarse en caliente con colocación también en caliente o puede elaborarse en frío y tenderse también en frío.

Los concretos asfálticos se definen como mezclas hechas en -- plantas estacionarias, de materiales pétreos con cemento asfáltico o con un producto asfáltico, que se tienden y compactan sobre bases convenientes y con los que se obtienen carpetas de rodamiento de máxima calidad.

Las mezclas asfálticas o concretos asfálticos por el sistema de mezclado en el lugar, son todas aquellas con las que se forman carpetas asfálticas, mismas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla asfáltica hecha por mezclado sobre el camino, de materiales pétreos con un producto asfáltico; pudiendo hacer el mezclado directo sobre el camino.

#### EL HULE EN LA CARPETA ASFALTICA

Debido a que la adición del hule reduce la manuableidad de la mezcla, es necesario que la operación de compactación se lleve a cabo tan pronto como sea posible después de colocar la mezcla.

Se ha empleado el hule como aditivo en una proporción de 3 a 10% por peso del asfalto. Se han efectuado trabajos para mejorar la carpeta de antiguos pavimentos con un espesor de 6cm de la -- mezcla caliente.

Cuando se emplea el asfalto con hule se emplea emulsificado,

se calienta la mezcla, el agregado se precalienta a 232°C. La emulsión se coagula conforme entra en contacto con el agregado y la rápida evaporación del agua enfría la mezcla a una temperatura de 149°C. La mezcla se hace de la misma forma que en la planta de mezclado. La emulsificación resulta en un asfalto liso y homogéneo. La dispersión del hule en materiales bituminosos da un pavimento aún más fino y más cerrado.

Las temperaturas en el horno de alrededor de 205°C despolimerizan el hule y una gran parte de sus efectos se pierden en el asfalto, por esta razón los asfaltos con hule nunca se deben calentar a una temperatura mayor de 190°C.

Los tratamientos superficiales de pavimentos existentes, por medio de grava y asfalto con hule emulsionado es otra fase del empleo del hule con material bituminoso.

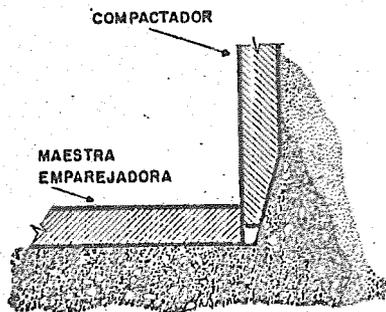
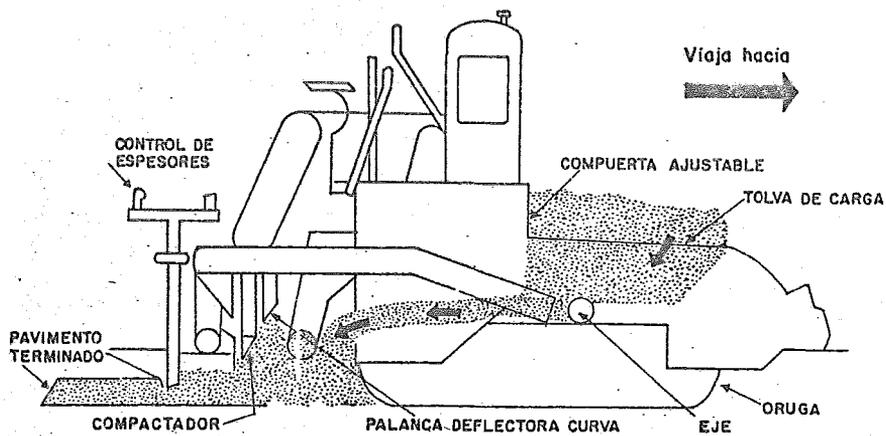
En el capítulo anterior se ve el método de aplicación del hule a los pavimentos, sería un poco repetitivo seguir hablando de lo mismo, sin embargo, agregaré sobre el comportamiento del hule en tratamientos superficiales. Se ha demostrado que la adición de hule al asfalto, reduce la tendencia del aglomerante a subir a la superficie, de forma que es bastante menos probable la exudación bajo tráfico pesado en tiempo cálido. En condiciones desfavorables de extendido, por ejemplo cuando se ha utilizado piedra húmeda o se ha presentado la lluvia poco después de la construcción, se ha observado mayor fijación de la piedra cuando el aglomerante contenía hule. Cuando el tratamiento se ha aplicado sobre una superficie ya agrietada, el empleo de hule-asfalto ha permitido observar un agrietamiento inicial ligeramente menor.

El aglomerante con hule tiene tendencia a endurecerse por calentamiento más de lo que podría preverse por pérdida de disolventes.

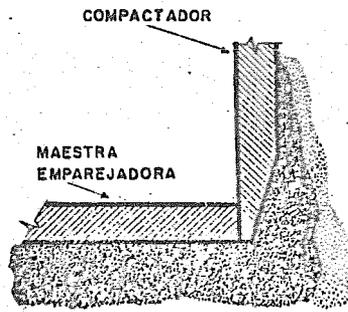
## EJECUCION DE LA CARPETA

Para la ejecución de toda carpeta asfáltica, a base concreto asfáltico, hay necesidad de sujetarse a las siguientes normas:

- a) La base estará preparada e impregnada.
- b) Deberá aplicarse un riego de liga a base de un producto asfáltico de fraguado rápido (generalmente F.R-2). Este riego deberá darse con petrolizadora mecánica sobre toda la superficie que habrá de quedar cubierta con la carpeta, previo barrido de la base ya impregnada, para que ésta quede exenta de materias extrañas y polvo.
- c) La mezcla hecha en la planta deberá transportarse en vehículos de caja metálica y cubrirse con una lona que la preserve del polvo y materias extrañas, así como para evitar pérdidas máximas de calor durante el trayecto.
- d) El tendido de la mezcla deberá hacerse con máquinas apropiadas para este trabajo, de propulsión propia, con dispositivo para ajustar el espesor y el ancho de la mezcla tendida, y dotada de un sistema efectivo que permita la repartición uniforme de la mezcla sin que se presenten clasificaciones en la misma. La fig. (IV-5) representa esquemáticamente una pavimentadora Barber-Greene que satisface las condiciones pedidas. La mezcla debe de vaciarse dentro de la caja de la pavimentadora y ser extendida por ésta inmediatamente con el espesor, sin compactar, con ancho y temperatura fijadas en el proyecto. La velocidad de la máquina debe de regularse de modo que el tendido siempre sea uniforme. Las juntas de construcción, tanto transversales como longitudinales, en caso de que el tendido se haga en dos o más fajas, con un intervalo de más de un día entre faja y faja, deberán cubrirse con un producto asfáltico de fraguado rápido, para proceder inmediatamente después al tendido de la siguiente faja.



POSICION SUPERIOR



POSICION INFERIOR

FIGURA IV-5.- PAVIMENTADORA

e) Después del tendido, el concreto asfáltico deberá plancharse uniformemente por medio de un rodillo tipo tándem de ocho a doce toneladas, para dar un acomodo inicial a la mezcla, debiendo efectuarse el planchado siguiendo la longitud del camino y a media llanta. Para la compactación total se utilizarán rodillos neumáticos con peso de cinco a siete toneladas, hasta alcanzar el por ciento de compactación deseada, finalmente se planchará con rodillo tipo tándem de ocho a doce toneladas, con objeto de borrar las huellas dejadas por el rodillo neumático. Cuando la mezcla haya sido elaborada con cemento asfáltico, inmediatamente después del planchado inicial deberá continuarse la compactación con los rodillos neumáticos. Cuando se trate de concretos asfálticos elaborados con productos asfálticos rebajados, la compactación con los rodillos neumáticos se iniciará cuando la relación solvente asfalto de la mezcla sea la fijada.

f) No deberá tenderse el concreto asfáltico sobre una base húmeda, encharcada o cuando esté lloviendo.

## CAPITULO V

### ANALISIS COMPARATIVO ENTRE UN PAVIMENTO TRADICIONAL Y OTRO CON HULE

Para el análisis de un precio unitario, con respecto a un asfalto modificado con hule, se debe tomar en cuenta la instalación complementaria, ya que va a formar parte integral de una planta de asfalto que junto con ella hará posible la producción de mezclas asfálticas modificadas con hule.

Según el estudio hecho por el Ing. Arnoldo Román, que hizo el diseño de una instalación complementaria, de tal manera que esta trabaje eficientemente en forma continua para proporcionar a la planta de asfalto, el volumen de la mezcla hule-aceite que requiere para producir 200 ton/hr de mezcla asfáltica modificada con hule.

Pero antes de seguir adelante hagamos la descripción de la instalación complementaria, que cuenta con lo siguiente:

- 1.- Tanque de almacenamiento para el aceite.
- 2.- Depósito para almacenar el hule en polvo.
- 3.- Dosificador electrónico para el pesado de ambos componentes.
- 4.- Mezcladora para producir y homogeneizar hule-aceite en estado líquido viscoso, con un sistema agitador de gusano o aspas, con calefacción para elevar la temperatura hasta 300°C y termostatos para controlar y regular la misma.
- 5.- Un segundo dosificador electrónico para pesar la mezcla hule-aceite y el cemento asfáltico.
- 6.- Finalmente otra mezcladora de características similar a

la anterior, cuyo sistema de calefaccion permite elevar la temperatura a  $200^{\circ}\text{C}$ .

A continuación un esquema de la instalacion complementaria:

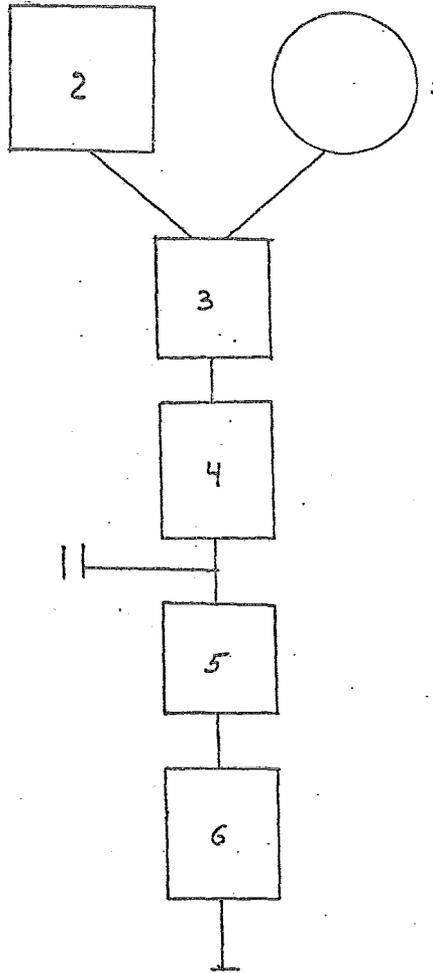


DIAGRAMA DE LA INSTALACION COMPLEMENTARIA.

COSTO APROXIMADO DEL EQUIPO PARA LA INSTALACION COMPLEMENTARIA

Según datos del estudio en cuestión, el costo aproximado del equipo es el que a continuación se relaciona, cabe hacer la aclaración de que los precios no son actuales, dichos precios son:

EQUIPO	COSTO
Tanque de almacenamiento	\$ 75,000.00
Depósito de hule	\$ 90,000.00
Primer dosificador	\$ 65,000.00
Primera mezcladora	\$ 100,000.00
Segundo dosificador	\$ 125,000.00
Segunda mezcladora	\$ 150,000.00
Accesorios (tuberías, bandas, y válvulas, etc.) 15%	\$ 90,750.00
	<hr/>
GOSTO TOTAL	\$ 695,750.00

MANO DE OBRA (costo)

Para el manejo de la instalación complementaria, es necesario contar con personal calificado. El costo de esta mano de obra se consigna en la siguiente tabla:

CATEGORIA	NUMERO DE PERSONAS	JORNADAS DE TRABAJO (8 horas)	SALARIO DIARIO
Laboratorista	1	1	\$ 452.10
pesadores	1	1	\$ 301.40
Operadores	1	1	\$ 301.40
Ayudantes	2	1	\$ 419.80
			<hr/>
			\$ 1474.70
			<hr/>
Equipo de uso personal 2%			\$ 29.48



ii) CONSUMOS :

Diesel : 50 litros (\$ 1.00)	= 50.00
Corriente eléctrica :	= 10.00
	<u>-----</u>
SUMA DE COSTO POR CONSUMO POR HORA	\$ 60.00
	<u>-----</u>

iii) OPERACION :

	Laboratorista	\$ 452.10
Salarios:	Pesador	\$ 301.40
	Operador	\$ 301.40
	Ayudantes (2)	\$ 419.80
		<u>-----</u>

\$ 1474.70

Equipo de uso personal 2% : 29.18

-----  
\$ 1503.88

Operación :  $O = \frac{S}{H} = \frac{1503.88}{7.2} =$  \$ 208.87

H = 90% de 8 horas

SUMA DE COSTO OPERACION POR HORA -----  
\$ 208.87

COSTO DIRECTO HORA-MAQUINA (HMD) -----  
\$ 305.39

CALCULO DEL COSTO DE UNA TONELADA DE MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA CON HULE EN ESTADO LIQUIDO VISCOSO.

Costo del aceite Ameyal 300-U \$ 2.60 ltr.

Una tonelada de mezcla  $2.646 \left( \frac{1}{0.998} \right) (2.60) =$  \$ 6.89/ton.

Costo del hule en polvo \$ 0.50/kilogramo

Tonelada de mezcla:  $1.134 (0.50) =$  \$ 0.57/ton

SUMA DE COSTO DEL HULE-ACEITE -----  
-----  
\$ 7.46

Costo del equipo complementario para producir una tonelada de mezcla asfáltica modificada con hule.

$$\frac{\$ 305.39}{200 \text{ ton}} = \$ 1.53/\text{ton}$$

COSTO TOTAL DE EQUIPO, HULE-ACEITE

\$ 8.99/ton

Este costo, es lo que se refiere al hule-aceite, es decir, el costo adicional de lo que costaría una tonelada de mezcla asfáltica normal, en lo que se refiere a producción únicamente. Todavía no tomamos en cuenta el costo para colocarlo en el pavimento, sin embargo, creemos que en este renglon aumentará muy poco, pero en fin eso lo veremos después.

Haciendo una comparación del costo de la producción de una tonelada de mezcla asfáltica normal, con otra de mezcla asfáltica modificada con hule, tenemos:

Costo de una tonelada de mezcla asfáltica normal.	\$ 280.00
Costo de una tonelada de mezcla asfáltica modificada con hule.	\$ 288.99

Como se ve, el empleo de hule para mejorar las mezclas asfálticas normales, aumenta su costo \$ 8.99, o sea un 3.2 % en tonelada; aparentemente no es mucho tomando en cuenta las mejoras que aporta, sin embargo no es todo lo que hay que tomar en cuenta, porque falta hacer otras comparaciones entre los costos de ambos pavimentos, como pueden ser: durabilidad, mantenimiento, etc., para saber si es conveniente o no, la aplicación de este elemento (hule).

## CAPITULO VI

### RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

#### a) RECOMENDACIONES

Es recomendable hacer muchas pruebas en el laboratorio para - obtener una combinación adecuada de hule y aceite.

Es conveniente construir tramos experimentales de pavimentos sometidos a diferentes grados de exposición, para conocer su comportamiento en diferentes condiciones de servicios.

#### b) CONCLUSIONES

i) Ciertos tipos y porcentajes de hule mezclados con ciertos tipos de materiales asfálticos en operaciones de plantas mezcladoras incrementa en forma marcada la estabilidad y la cohesión.

ii) La adición del hule con los agregados minerales retarda - la pérdida de partículas ligeras en el pavimento. Esta pérdida - se experimenta por efectos climatológicos, reduciendo o evitando el exudado.

iii) Existe la evidencia de que la mezcla que contiene hule - es más elástica que las mezclas normales y sirve mejor para amortiguar las vibraciones y las cargas del tráfico.

iv) La adición del hule incrementa su ablandamiento, su viscosidad, elasticidad y cohesión. Además dan un pavimento cuya durabilidad se incrementa y es además menos susceptible a los cambios de temperatura.

v) No es conveniente incorporar el hule en polvo al cemento - asfáltico durante el período de calentamiento, puesto que se vuelve un material heterogéneo y por lo tanto imposibilita la determinación de sus características físicas como son: penetración, viscosidad, ductilidad y peso específico.

vi) Es posible obtener un ligante homogéneo mezclando en caliena

te el hule en estado líquido viscoso con el cemento asfáltico, - el cual fácilmente se puede determinar sus características físicas.

vii) Para la fabricación de la mezcla con hule no se requiere hacer modificaciones notables en las instalaciones de las plantas tradicionales, el hule que se emplea es abundante y actualmente se desperdicia, el aceite tiene un precio relativamente bajo, lo cual permite que el incremento en su costo de producción respecto al de la mezcla normal sea mínimo (3.2%) y por lo tanto factible de adoptarse si se toman en cuenta las ventajas que de su uso se derivan.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) CARRETERAS, CALLES Y AEROPISTAS  
Raúl Valle Rodas  
Ed. El Ateneo
- 2) ESTRUCTURACION DE LOS PAVIMENTOS  
Seminario de pavimentos  
Secretaría de Obras Públicas  
México, 1975
- 3) INGENIERIA DE CARRETERAS Y AEROPUERTOS  
Legault, Adrián R.  
Ed. Continental S. A.
- 4) MATERIALES BITUMINOSOS EN  
CONSTRUCCION DE CARRETERAS  
Road Research Laboratory  
Madrid, 1965
- 5) ENCICLOPEDIA DE TECNOLOGIA QUIMICA  
Raymond e. Kirk y Donald F. Othmer  
Ed. Uteha
- 6) MECANICA DE SUELOS, tomo II.  
Juárez Badillo, Eulalio  
Rico Rodriguez, Alfonso  
Ed. LIMUSA
- 7) INGENIERIA DE CARRETERAS  
Laurence I. Hewes  
Ed. Continental S.A
- 8) LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS  
VIAS TERRESTRES, vol. 2  
Alfonso Rico y Hernilo Del Castillo  
Ed. LIMUSA

- 9) CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS  
MODIFICADAS CON HULE Y APROVECHAMIENTO DE  
NEUMATICOS USADOS. (TESIS) 1979  
Arnoldo Román Lizárraga
- 10) LOS ASPECTOS QUIMICOS DEL RECICLAMIENTO  
DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS QUE DEBE  
CONOCER EL INGENIERO.  
William Cenessa  
Golden Bear Division Witco Chemical  
Corporation, Oildale, California.
- 11) TRATADO DE CONSTRUCCION, tomo I.  
Antonio Miguel Saad  
CECSA

M-0028707