

3197

FACULTAD DE INGENIERIA

DESCARTE

- Aplicaciones de la Mecánica de Suelos en el Diseño y Construcción de Pavimentos Asfálticos

ALICIA
JACIMBA

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO CIVIL
p r e s e n t a :
JOSE IGNACIO HERRASTI AGUIRRE



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.

A mis padres y hermanos, cuya alegría espiritual, entusiasmo por la vida y ejemplo en el actuar, fueron apoyo y aliciente en la realización de mis anhelos profesionales.

A mi querida Facultad de Ingeniería, inolvidable hogar de mis juveniles años y esfuerzos estudiantiles

106036

Mi más sincero agradecimiento para:

The Asphalt Institute (University of Maryland)
Por las Facilidades prestadas durante mi visita a sus laboratorios y por la literatura tan valiosa puesta a mi disposición.

International Road Federation (Washington)
Por su valiosa orientación sobre el problema tratado en mi tesis y por haber puesto a mi disposición literatura tan valiosa.

Ministerio de Trabajos Públicos y de Transportes (Francia) Departamento de Puentes y Caminos.
Por las facilidades prestadas para observar sus modernos procedimientos de pavimentación y por la valiosa literatura proporcionada.

A las Compañías: Frankipilo (England)
Sir Alexander Gibb and Partners.
Por las facilidades prestadas al visitar la construcción de la más moderna carretera inglesa, que va de Langley a Chiswick.
Y por los interesantes datos técnicos proporcionados.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección
Núm. 73-
Exp. Núm. 73/214.2/1.-

Al Pasante señor José I. HERRASTI A.,
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa,
me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado
por esta Dirección propuso el señor profesor Ingeniero Enrique Tamez
G., para que lo desarrolle como tesis en su examen profesional de
Ingeniero CIVIL.

APLICACIONES DE LA MECANICA DE SUELOS EN EL DISEÑO
Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS ASFALTICOS

índice: "que comprende el siguiente

- " I.- Prólogo.
- II.- Clasificación y propiedades de los suelos.
- III.- Diseño del espesor del pavimento.
- IV.- Intervención de los datos de las pruebas básicas
y pruebas auxiliares en el diseño de pavimentos
asfálticos.
- V.- Determinación de los métodos de mezcla
- VI.- Consideraciones económicas de los pavimentos
asfálticos."

Ruego a usted tomar debida nota de
que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones,
deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis
meses como requisito indispensable para sustentar examen profesional;
así como de la disposición de la Dirección General de Servicios
Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los
ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Muy atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D.F. 5 de Diciembre de 1964
EL DIRECTOR

Ing. Antonio Dovalí Jaime

ADJ'MMO' eag.

INDICE

	Pág.
I. PROLOGO	1
INTRODUCCION	2
GENERALIDADES	7
II. CLASIFICACION Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS	43
III. DISEÑO DEL ESPESOR DEL PAVIMENTO.	52
IV. INTERVENCION DE LOS DATOS DE LAS PRUEBAS BASICAS Y PRUEBAS AUXILIARES EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFALTICOS	54
V. DETERMINACION DE LOS METODOS DE MEZCLA	70
VI. CONSIDERACIONES ECONOMICAS DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS	86
VII. EJEMPLO GENERAL, APLICACION	91
BIBLIOGRAFIA	128

PROLOGO

La idea fundamental de este trabajo es presentar en forma simple y ordenada los diferentes criterios usados en el diseño de la estructura de los pavimentos asfálticos desde el momento en que se inicia la exploración del suelo hasta que se hace el diseño de la mezcla de la carpeta asfáltica.

En el primer capítulo se presentan una serie de métodos de exploración del subsuelo y las pruebas de laboratorio recomendables para tener un conocimiento adecuado de sus propiedades.

En el segundo capítulo se enumeran algunos de los sistemas de clasificación de los suelos más utilizados en el diseño y construcción de caminos como es el Sistema de Clasificación de la AASHO y el Sistema Unificado de Clasificación propuesto por el doctor A. Casagrande.

En el tercer capítulo se enumeran los pasos a seguir para el diseño apropiado del espesor de la estructura de un pavimento asfáltico.

En el cuarto capítulo se estudian algunos de los sistemas utilizados para determinar las características necesarias de los materiales y el valor soporte de la subrasante, subbase y base para poder obtener el espesor adecuado de la estructura del pavimento asfáltico.

En el quinto capítulo se estudian algunos de los métodos más usuales para el diseño de mezclas asfálticas y las pruebas que se deberán efectuar.

En el capítulo sexto se hace un análisis económico, enumerando los factores requeridos para determinar el costo anual de un camino.

Finalmente en el capítulo séptimo se presenta una aplicación sencilla de la teoría antes descrita.

INTRODUCCION

Aún se encuentran en nuestro país muestras de la avanzada técnica usada por los Aztecas, los Mayas y los Incas para la construcción de caminos, apesar de que estos no eran destinados al tránsito de vehículos, una muestra evidente fueron las calzadas construídas por los Aztecas para cruzar los lagos que rodeaban a la antigua Tenochtitlán.

Más tarde a mediados del Siglo XVI la carretera fué introducida en américa por Sebastián de Aparicio pero no fué sino hasta principios del Siglo XIX cuando la aparición de la diligencia trae como consecuencia la necesidad de tener buenos caminos.

A principios de este siglo aparece el automóvil de gasolina y rápidamente se convierte en el más popular de los vehículos dando origen a una gran demanda de caminos.

En México en 1925 se crea la Comisión Nacional de Caminos por el Gobierno de la República para ser encargada de la construcción de caminos en nuestro país.

Según las estadísticas de la International Road Federation, México ha alcanzado en los últimos años uno de los más altos niveles en construcción de carreteras en la historia.

En la siguiente tabla se puede ver como en los últimos 10 años se ha construído más del 50% de la red nacional de caminos:

**ESTADO DE LOS CAMINOS CONSTRUIDOS POR LA
FEDERACION Y LOS ESTADOS 1954-1964**

Kilómetros

Año	Total	Terracería	Revesti- miento	Pavimenta- ción
1954	26 353	2 465	6 394	17 494
1955	27 276	3 022	5 880	18 374
1956	28 616	2 432	6 770	19 414
1957	30 227	2 395	6 470	21 362
1958	31 967	2 334	7 328	22 305
1959	37 614	3 758	9 330	24 526
1960	45 089	7 398	10 322	27 369
1961	49 309	7 352	13 310	28 647
1962	53 646	9 425	14 943	29 278
1963	52 763	5 853	15 883	31 027
1964	57 455	6 376	16 518	34 561

Dicho crecimiento, en parte se debe al gran aumento de vehículos en el país:

Año	Automóviles	Camiones	
		De Pasajeros	De Carga
1953	253,354	19,898	179,564
1963	617,960	27,573	352,681

Se podría decir que el 100% de los pavimentos en nuestro país son asfálticos, esto se entiende perfectamente sabiendo que México es uno de los principales productores del mundo, en la siguiente tabla se puede apreciar la producción de petróleo y la fracción correspondiente a los diferentes tipos de asfaltos en México durante 1964 y principios de 1965.

Producción total de petróleo en la República M ³	Asfaltos Semi-sólidos M ³	Asfaltos Rebajados M ³	Emulsiones Asfálticas M ³	Mes
1,716,077	9,393	12,281	---	enero 64
1,599,294	7,385	13,957	---	febrero
1,676,756	9,311	18,087	531	marzo
1,646,603	8,397	25,575	369	abril
1,710,789	9,252	17,586	475	mayo
1,692,309	13,383	27,288	369	junio
1,742,248	10,898	22,556	---	julio
1,779,874	9,729	22,033	511	agosto
1,741,260	11,452	25,220	130	septiembre
1,800,439	14,585	17,592	246	octubre
1,726,893	10,858	22,304	---	noviembre
1,756,250	8,946	21,958	352	diciembre
1,591,684	13,091	18,646	445	febrero 65
1,589,321	12,337	30,937	347	marzo
1,544,899	12,519	25,694	288	abril

Paralelamente al crecimiento de las redes de caminos en los diferentes países se han venido desarrollando las técnicas para calcular los espesores más adecuados y económicos y las mezclas más apropiadas de materiales.

El cálculo del espesor de la estructura de un pavimento asfáltico es un problema de actualidad que aún no se encuentra totalmente resuelto.

Cuando se va a diseñar la estructura de un pavimento asfáltico el primer problema aparece al estudiar las cualidades del suelo que dará soporte a dicha estructura, prácticamente es imposible investigar cada metro

cuadrado de camino y frecuentemente se cometen errores al hacer una apreciación de las cualidades del suelo y augurar su comportamiento bajo los efectos del tráfico y del intemperismo.

Por otra parte vemos que los métodos de cálculo utilizados para determinar el espesor de la estructura de un camino han permanecido bastante rudimentarios, una muestra de ello es la existencia de numerosos métodos para tal motivo.

En parte esto se debe a que el problema no había sido sistemáticamente atacado, sino hasta la segunda guerra mundial (1939-1945) a causa del incremento en el tráfico de camiones y la aparición de aviones bastante pesados.

Antes de la primera guerra mundial la técnica caminera se concretaba a la colocación de un material de fundación a base de grandes piedras cubierto con una capa de macadam, poco más tarde en el período comprendido entre las dos guerras mundiales se usó un material de fundación formado por piedras pequeñas recubiertas con un material a base de grava y betún, dichos caminos se mantenían en buenas condiciones debido al tráfico tan reducido y no fué sino hasta después de la segunda guerra mundial cuando el Cuerpo de Ingenieros de la Armada Americana empezó a hacer una investigación sistemática, inicialmente basada en estudios comparativos de los métodos existentes en los diferentes estados, para así poder lograr un método definitivo y universal que mejorara esos métodos existentes. Dichos estudios concluyeron con la elección del método C.B.R. (California Bearing Ratio) como método oficial para el cálculo de espesores de estructuras de pavimentos asfálticos. Dicho método fué rápidamente difundido y actualmente se ha extendido a toda América, Europa Occidental y a numerosos países de Asia y Africa.

Sin embargo algunos ingenieros técnicos ven en este método la desventaja de estar basado casi exclusivamente en ensayos físicos fundados en consideraciones teóricas sobre la forma de transmisión de esfuerzos y las deformaciones en los pavimentos y han pensado que esto da origen a que las investigaciones permanezcan un poco olvidadas y no progresen los sistemas empíricos de cálculo, por este motivo algunos países Europeos están llevando estudios de métodos netamente empíricos con objeto de mejorar las insuficiencias del método C.B.R., estos estudios están basados principalmente en la hipótesis de que el espesor de un pavimento flexible depende de las rigideces de las capas que lo forman, actualmente se han encontrado algunas ecuaciones que satisfacen las deformaciones y que pueden expresarse bajo la forma de integrales dentro de un campo infinito en las que se hacen intervenir las funciones de Bessel. Estas integrales pueden ser calculadas numéricamente mediante el uso de una máquina electrónica de cálculo y a

partir de ellas se pueden eleborar unos ábacos que nos proporcionarán las presiones en el suelo, a partir de los cuales se podrá obtener el espesor del pavimento.

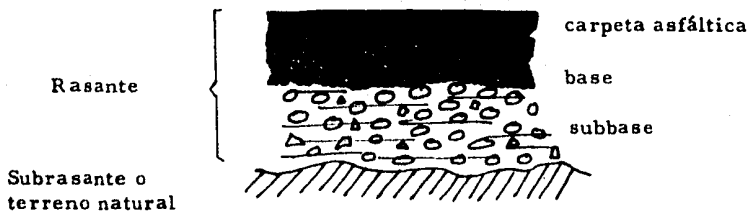
Seguramente dentro de pocos años y a raíz de los estudios que se realizan sobre el conocimiento del suelo, de los materiales usados en la - construcción de caminos y de los materiales bituminosos podremos disponer de métodos de cálculo más exactos que los actuales.

J. I. H. A.

GENERALIDADES

El término suelo, tal y como es usado en ingeniería, incluye todos los materiales inorgánicos y orgánicos cementados o no, que se encuentran en la corteza terrestre y provienen de la desintegración y alteración de las rocas, de desechos orgánicos o de erupciones volcánicas.

Se llama estructura de un pavimento asfáltico, o rasante, al conjunto de una carpeta asfáltica de rodamiento colocada sobre una o más capas de suelo, no rígidas, las cuales se encuentran sobre el terreno natural o subrasante.



El diseño de una estructura de un pavimento asfáltico consiste en determinar el espesor y las características de sus diferentes capas, para que las cargas debidas a vehículos que circulen sobre él, al llegar

a la subrasante, sean compatibles con sus propiedades mecánicas.

La carpeta asfáltica tiene por objeto proteger al resto de la estructura contra el desgaste y la erosión y proporcionar una superficie lisa de rodamiento.

Las propiedades mecánicas de los suelos dependen básicamente - de su composición, de su origen, de su estructura y de su textura. Algunas de las propiedades que más interesan a la ingeniería de caminos, son: la permeabilidad, la elasticidad, la plasticidad, la resistencia al esfuerzo cortante, la comprensibilidad, la expansividad, y la contracción.

Estas propiedades se pueden cuantificar a partir de ensayos de laboratorio y de campo.

A partir de la granulometría, forma, estructura e índices de consistencia de los suelos, factores de los cuales dependen principalmente sus propiedades mecánicas, podrán ser clasificados en grupos con características semejantes, y basándonos en dicha clasificación o en los valores de soporte del terreno, se podrá determinar el espesor requerido, para la estructura del pavimento asfáltico mediante el uso de tablas o curvas empíricas (como las de la página 57) elaborados a partir de la observación de pavimentos que se encuentren bajo condiciones similares de clima, tráfico, etc., y cuya clasificación y valores de soporte han sido previamente determinados.

El primer paso en el diseño de la estructura de un pavimento asfáltico, consiste en la valuación de los materiales disponibles mediante una investigación del suelo.

INVESTIGACION DEL SUELO.

En el diseño y construcción de pavimentos asfálticos se deberá dar una atención especial al muestreo y estudio de los materiales de construcción para obtener un producto resistente y durable; igual atención deberá darse al muestreo y estudio del material del subsuelo que será soporte del camino. Un diseño económico se obtendrá solamente mediante un conocimiento adecuado de las condiciones y propiedades de los materiales usados en la estructura del pavimento y de los que le darán soporte.

Para un conocimiento adecuado del suelo, el ingeniero deberá complementar las investigaciones de ingeniería civil con estudios adecuados de geología, pedología y geofísica, los cuales deben incluirse como parte de la exploración.

Serán necesarias, primero, una exploración preliminar, con objeto de obtener datos sobre la distribución de los suelos, la localización

del agua en el subsuelo y los accidentes topográficos, con miras a obtener una localización económica y razonable del camino, y después, una investigación detallada con objeto de obtener un diseño adecuado para lo cual nos deberá proporcionar datos suficientes que nos permitan obtener:

- a) La localización y selección de los bancos de préstamo para terraplenes y rasante del camino.
- b) La localización y diseño de drenajes, alcantarillas, y demás obras de arte necesarias.
- c) La elección de la sección del camino.
- d) El tratamiento requerido para el material del subsuelo, como puede ser compactación, etc. y
- e) La selección del tipo de pavimento y su diseño.

La investigación del suelo deberá incluir un estudio previo de la información existente relativa al suelo en la zona de localización del camino, un reconocimiento general del lugar para obtención de perfiles del suelo, profundidades críticas de la roca, y localización de condiciones desfavorables, tales como pantanos, zonas de posibles fallas, etc.

A partir del reconocimiento general se deberán elegir los sitios de toma de muestras representativas del suelo con objeto de efectuar pruebas que nos permitan identificar y clasificar los diferentes materiales que forman el perfil del suelo y muestras representativas de los bancos de -- préstamo accesibles para determinar el comportamiento de sus materiales dentro de la estructura del pavimento, y de muestras inalteradas para determinar las propiedades mecánicas de los materiales con objeto de poder realizar un diseño adecuado de la estructura del pavimento asfáltico.

Antes de empezar con los trabajos de campo, se deberá revisar la información existente que será útil para planear y organizar el trabajo de exploración. Esta información podrá consistir en mapas topográficos, aerofotos, mapas geológicos o mapas de agricultura de la región. En áreas donde no existe tal información, será necesario hacer un reconocimiento preliminar de la zona propuesta para el nuevo camino, anotando los perfiles observados en cortes, el tipo de material de la superficie, pendientes, condiciones de drenaje; se podrá, además, establecer algún sistema para identificación de suelos con características similares.

En lugares de difícil acceso, será necesario llevar a cabo los estudios preliminares a base de fotografías aéreas que nos ayuden a planear la exploración del lugar. Los métodos más ampliamente conocidos para -

la investigación preliminar del suelo en trabajos de caminos son, la fotografía aérea y el sistema de clasificación pedológica en conjunto con los mapas de agricultura.

Fotografía aérea. -

Actualmente las técnicas de la fotografía aérea y su aplicación a la ingeniería vial nos proporcionan un método útil, que substituye con ventaja a los métodos antiguos de levantamientos topográficos o exploraciones de grandes zonas, en largos períodos de tiempo y a costos prohibitivos.

La fotografía aérea, además de ahorrar tiempo y dinero, proporciona una información muy completa y especialmente útil en zonas poco accesibles, debido a condiciones climáticas severas, a topografía difícil o a una vegetación exuberante.

Los pares estereoscópicos son fotografías dobles que muestran la superficie de la tierra y que mediante el uso de un estereoscopio permite al operador verla en tres dimensiones. La escala aproximada de la vista en perspectiva es una función de la elevación de la cámara sobre el nivel del suelo y de la distancia focal de la cámara. El operador puede observar las diferencias en elevaciones y mediante un instrumento de dibujo registrar los accidentes topográficos en mapas planimétricos a una escala previamente fijada.

La interpretación de las fotografías aéreas es la técnica usada para apreciar las condiciones del terreno en la zona fotografiada, y requiere de experiencia y de conocimientos de geomorfología, geología, hidrología y mecánica de suelos. Un técnico con estos requisitos podrá interpretar las fotografías aéreas y revelar condiciones del terreno tales como su forma, terrenos de acarreo glaciales, vegetación, pendientes, zonas de deslizamientos, afloramientos rocosos, espesor aproximado del suelo sobre la roca, sistemas de zanjas, formas de erosión, características físicas del suelo, así como obras de la mano del hombre, tales como control del drenaje y la erosión, alineación de caminos, etc. Los detalles de estas condiciones del terreno podrán ser verificados mediante investigaciones directas en el lugar.

Para la investigación preliminar, se deberá preparar un mosaico fotográfico de la región con objeto de obtener un conocimiento general de los aspectos geológicos y geográficos. Dichos mosaicos solo muestran al terreno en dos dimensiones; por lo que se usan como referencia general para cualquier programa de fotointerpretación en tres dimensiones mediante una visión estereoscópica.

Para obtener la tercera dimensión, las fotografías se toman de

modo que las fotos contiguas se superpongan en un 60% para poder ser analizadas con la ayuda de un estereoscopio. En esta forma se pueden identificar las formas de relieve del terreno.

Las fotografías en colores son sumamente útiles en la identificación de los tipos de suelo, a base de elementos patrones de suelo, basados en el principio de que materiales similares originan fotografías similares.

Las fotografías oblicuas, o sea, tomadas formando un ángulo con la vertical, son sumamente útiles para el estudio del trazo de caminos.

El uso de las fotografías aéreas en la exploración del suelo es sumamente ventajoso ya que pueden realizarse exploraciones de grandes zonas en poco tiempo y a bajo costo, obteniendo las condiciones reales existentes en el terreno, las cuales podrán ser estudiadas reiteradamente en el gabinete sin necesidad de regresar al terreno por nuevos datos.

Las principales desventajas de este método son el estar supeditado a las condiciones climáticas, ya que para la obtención de buenas fotografías aéreas se requerirá una atmósfera sin nubes ni niebla; las escalas dependerán de la altura de la cámara, y en algunas regiones dicha altura puede estar restringida; en terrenos boscosos, se prefiere esperar la época en que los árboles han perdido las hojas para la obtención de las fotografías, con objeto de distinguir el suelo.

Determinada la localización definitiva del camino, a partir de fotografías aéreas se podrán obtener, de estas mismas, directamente, las secciones transversales fotogramétricas, cuyos datos podrán representarse por medio de distancias laterales al eje del camino, con sus correspondientes cotas, y ser registrados en tarjetas IBM o en cintas perforadas para poder ser llevadas a la calculadora electrónica.

Las secciones transversales obtenidas a partir de las fotografías aéreas, pueden tener una aproximación de unos 5 cm., dando origen a una precisión final comparable con la obtenida a partir de los métodos comunes de levantamiento en el terreno.

Las máquinas electrónicas pueden tomar información a partir de los datos de las secciones transversales en las tarjetas o en la cinta perforada, y representarlas en papel milimétrico a la escala elegida, o bien tabular los datos en listas de campaña para poder ser usadas por el ingeniero durante los trabajos de campo.

El diseño de carreteras por métodos fotogramétricos da oportunidad a un considerable ahorro de tiempo al permitir determinar los movimientos de tierras en las computadoras electrónicas a partir de las secciones transversales dibujadas y calculadas también electrónicamente.

Los movimientos de tierras pueden obtenerse por medio de las secciones transversales obtenidas fotogramétricamente y registradas en las tarjetas o cinta perforada junto con la pendiente de la rasante y la sección transversal del camino.

Un programa más completo, además del cálculo de movimientos de tierra podría proporcionar datos sobre desagües, drenajes, zanjas laterales, etc.

En localizaciones de caminos a base de fotografías aéreas, se requerirá un número limitado de perforaciones en el campo con objeto de confirmar y complementar los datos obtenidos a partir de las fotografías. A partir de la clasificación de suelos ya confirmada en el campo y de los datos obtenidos en ensayos de mecánica de suelos, para determinar la capacidad de carga y deformación del suelo, se podrá diseñar la estructura del pavimento asfáltico.

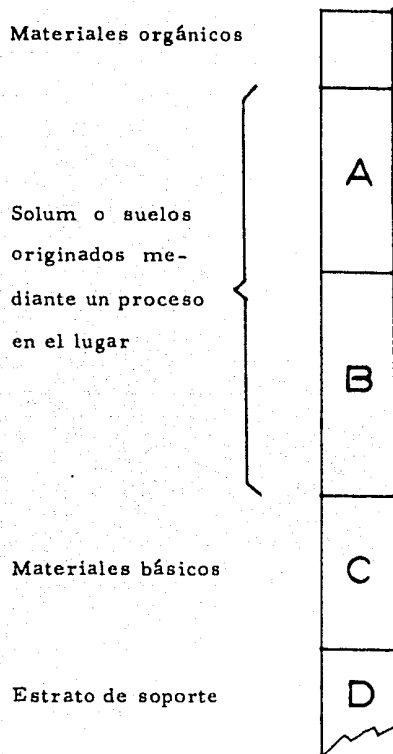
Actualmente se pueden conseguir, fácilmente, programas electrónicos elaborados para determinar las alineaciones horizontales y verticales en intersecciones y pasos a desnivel en carreteras, y con el aparato llamado "Dataploter", se lleva a cabo el trazo automático de secciones -- transversales de carreteras, en papel milimétrico de 75 cm. por 75 cm., usado para determinar el área exacta de la sección transversal del camino, su elevación y la necesidad de corte o terraplen y el desagüe requerido. - Con este método se pueden realizar más de 400 planos de secciones transversales en un día normal de trabajo.

En una obra típica de caminos, después de obtener los datos de las fotografías aéreas y los datos complementarios de campo, se deberán imprimir en la cinta perforada, la cual se coloca en la máquina encargada de transformar los impulsos digitales en impulsos analógicos que hacen mover una mano mecánica, guía, con una pluma para dibujar las secciones transversales sobre el papel milimétrico.

Pedología.-

La pedología se basa en la premisa de que formaciones de suelos con iguales materiales básicos son originados por condiciones idénticas de clima, topografía y tiempo. Los perfiles de suelo son iguales y sólo podrá haber algunas pequeñas variaciones, resultado de cambios en el medio ambiente y a partir de las cuales se puede clasificar e identificar el suelo.

Se considera al perfil del suelo como una sección vertical que atraviesa las diferentes capas, llamadas horizontes, y continúa dentro de los materiales básicos, considerados como originarios de los demás, hasta el llamado "estrato de soporte".



El horizonte A o de coladera y el B o de acumulación son conjuntamente llamados solum; son la parte alterada del perfil como consecuencia del clima y la vegetación y se distinguen por su contenido orgánico, su color, su textura y algunos otros factores; bajo el horizonte B se encuentra el C el cual es independiente de las condiciones exteriores.

El horizonte D es generalmente considerado como un estrato que soporta al horizonte C y diferente a éste, que puede tener o no influencia en la parte intemperizada del perfil; dependiendo de la profundidad a que se encuentre; este estrato tiene poca influencia en los proyectos de estructuras de pavimentos asfálticos.

El horizonte B se caracteriza por su alta densidad originada por

partículas finas provenientes del horizonte A, estas partículas pueden ser transportadas mediante solución química proveniente del horizonte A y que se filtra en el B, o pueden pasar directamente del horizonte A al B a causa de algún movimiento mecánico del suelo. Estos fenómenos dan origen a una reducción del volumen de vacíos en el horizonte B que es ocupada por los finos provenientes del horizonte A lo cual ocasiona un aumento de su plasticidad y un decremento de su permeabilidad, también se origina una acumulación de calcio y carbonato de magnesio en el horizonte B.

El horizonte C se clasifica en pedología mediante nomenclaturas geológicas, dándole la clasificación del tipo de roca de la cual procede, o del tipo de depósito, si se trata de algún material transportado; este horizonte está formado por los materiales inalterados del perfil.

Una primera clasificación pedológica divide al suelo en tres categorías: La primera, llamada zonal, incluye suelos con un perfil bien desarrollado, que refleja una gran influencia del clima y de la vegetación.

La segunda, o intrazonal, agrupa perfiles bien desarrollados, - que muestran la influencia de algún factor local, estos suelos generalmente se encuentran en pequeñas áreas.

La tercera categoría es la azonal, e incluye a aquellos suelos con un perfil mal desarrollado, como podrían ser arenas movedizas, dunas etc.

Estas tres categorías después se dividen en subcategorías, las que a su vez se subdividen en los llamados grandes grupos de suelos.

Mediante una observación cuidadosa de algunas características del perfil de suelo tales como color, textura, estructura, colocación, composición química, espesor de los diferentes horizontes y geología de los materiales, se han dividido los grandes grupos de suelos en series de suelos de igual proceso de formación y originados por materiales iguales, --- esta división en series es básica para los trabajos de ingeniería. Según la textura de los suelos, las series se subdividen en tipos, de acuerdo con los porcentajes de arena, arcilla y limo.

Para la ingeniería de caminos solamente las Series y Tipos de suelos tienen importancia.

La aplicación del método pedológico se ve limitada en nuestro medio, debido a la carencia de mapas de agricultura. Se deberá tener en mente que este método es sumamente útil como una guía general, para ayudar a planear y realizar la investigación del suelo a partir de los mapas de agricultura, y recordando que suelos de una misma clasificación

tienen propiedades similares.

Generalmente, la localización inicial del camino se lleva a cabo por medio de fotografías aéreas y después se procede a explorar el subsuelo directamente en el lugar propuesto.

Exploración del subsuelo en el lugar de la obra.-

Los métodos de exploración en el terreno se pueden dividir en in directos, semidirectos y directos.

Dentro de los métodos indirectos, encontramos a los llamados -geofísicos, consistentes en la medición e identificación de cambios físicos en los materiales de la superficie o cerca de ésta, tales como cambios de gravedad del suelo, de magnetismo, de conductividad eléctrica o de velocidad de propagación de ondas elásticas en el suelo. De acuerdo con el tipo de medición que se haga, el método geofísico será, gravitacional, magnético, eléctrico o sísmico.

Estos métodos geofísicos son útiles para exploración de grandes áreas, rápida y económicamente, y tienen la ventaja de representar las -condiciones del suelo en una superficie y no sólo en una línea vertical o inclinada. Fácilmente pueden detectar irregularidades, a veces no descubiertas en exploraciones a base de sondeos; también son especialmente --útiles para determinar la profundidad de la roca y la localización y los límites de depósitos de materiales de construcción.

Los métodos gravitacionales se basan en la diferencia de densidad de los materiales del subsuelo, y proporcionan un método de exploración eficaz en reconocimientos de grandes áreas para trabajos de caminos.

El método magnético se basa en las diferentes propiedades magnéticas de los materiales del subsuelo. Este método no da una información -tan detallada como los otros, pero es el más simple y rápido, se usa mucho en la localización de petróleo y minerales.

Métodos eléctricos.-

La mayoría de los métodos eléctricos de exploración se basan -en las diferencias de conductividad de los materiales del suelo. La resistividad de una roca densa es mayor que la de sedimentos con grandes volúmenes de vacíos, saturados o con grandes cantidades de sal en el agua de los poros. Los métodos eléctricos más usados actualmente son el llamado de caída de potencial y el de la resistividad; este último es el preferido en

ingeniería de caminos.

Los métodos sísmicos se basan en el hecho de que la velocidad de propagación de una onda en un cuerpo elástico es función del módulo de elasticidad, del módulo de Poisson y de la densidad del material. El impulso elástico puede ser producido por alguna explosión de dinamita, colocada en un agujero. El tiempo requerido por el impulso para viajar del lugar de la explosión a varios puntos de la superficie es determinado por medio de unos pequeños detectores, que transforman las vibraciones en corriente eléctrica para determinar la velocidad de la onda. Para cada tipo de material se tienen velocidades determinadas, ya tabuladas.

El método de la vibración continua utiliza ondas transversales o cortantes continuas. Estas ondas son producidas por un vibrador mecánico, generalmente consistente en un par de discos excéntricos, con una frecuencia que puede variar de 5 a 60 ciclos por segundo. Para una frecuencia dada, la amplitud de las ondas se podrá variar cambiando la excentricidad de los discos. Las ondas transmitidas al suelo son recogidas y registradas en varios detectores sísmicos.

El tiempo de viaje de las ondas, de acuerdo con la frecuencia y la excentricidad de los discos, nos da la profundidad y el espesor del estrato que se estudia en función de la distancia que recorren las ondas.

Cambiando este método con el de refracción sísmica, las velocidades de las ondas de compresión y de las cortantes, podrán determinarse y expresarse por dos ecuaciones independientes, que contienen el módulo de elasticidad, el módulo de Poisson y la densidad del material; conociendo alguno de estos coeficientes para un determinado suelo, los otros dos podrán ser conocidos.

Se han preparado tablas, basadas en correlaciones empíricas, las cuales dan directamente la capacidad de carga del suelo para la velocidad obtenida de las ondas cortantes; este método es útil hasta unos 40 m. de profundidad.

Otro tipo de exploración indirecta es por medio de los métodos de penetración, consistentes en hacer penetrar una barra con una punta cónica en el suelo y observar la resistencia que opone éste a ser penetrado; los valores numéricos de la variación de esta resistencia, permiten conocer algunas de las características físicas del material, por lo que éste método se puede considerar, a la vez, como método de exploración y como prueba en el campo.

La inconveniencia de este método es que se pueden obtener datos erróneos cuando el terreno contiene piedras o guijarros. Una alta densidad

relativa de la arena hace sumamente difícil el hincado a una profundidad -- mayor de tres metros; por el contrario, si la arena es muy suelta, el hincado es sumamente fácil. Con objeto de evitar la fricción, K. Terzaghi propone una punta cónica conectada a una barra, la cual se encuentra dentro de una camisa; el cono se hunde una cierta profundidad por medio de un gato-hidráulico o por medio de un martillo, después se inyecta agua entre la barra y la camisa, la cual, al salir por la parte inferior de la camisa, se dirige hacia arriba por entre el terreno y la camisa, la cual se puede hincar por medio de un esfuerzo pequeño hasta la punta; se interrumpe entonces la inyección de agua y la punta cónica es nuevamente forzada en el terreno, no influyendo en la fricción la profundidad a la que se trabaja.

Los perfiles obtenidos de la resistencia a la penetración dan una indicación de la consistencia cohesiva y de la compacidad del suelo en el lugar. En suelos no cohesivos o poco cohesivos con este método en combinación con algunas perforaciones, se pueden obtener datos valiosos de capacidad de carga del suelo, para diseño de estructuras de pavimentos.

El método más simple de llevar a cabo la prueba de penetración es el llamado de resistencia dinámica, o sea, a base de una sucesión de golpes dada con un martillo de peso constante y con una caída determinada. El número de golpes requerido para obtener una determinada penetración, se usará como índice de resistencia a la penetración.

Este método de penetración es sumamente usado en el diseño de pavimentos, con algunas pequeñas variantes. Por ejemplo, el Departamento de Carreteras de Escandinavia ha usado el sistema de penetración por rotación con una punta helicoidal, dicho sistema consiste en introducir la punta mediante la acción de una carga estática y una rotación. La penetración se registra para cargas que se aumentan gradualmente de 5 Kg. a 15, 25, 75, 100 Kg. Con la carga constante, se observa la penetración para cada 12.5 vueltas y se hace un diagrama que será comparado con diagramas similares de la misma región, para determinar la capacidad de carga del suelo.

Otra variación del método es el de la resistencia estática a la penetración, consistente en empujar lentamente el cono, introduciéndolo en el suelo; este sistema da mayor exactitud que el dinámico. El cono de penetración más usado en el método estático para determinar la capacidad de carga de la subrasante para diseño de estructuras de pavimento, es el diseñado por K. Boyd. (fig. 1).

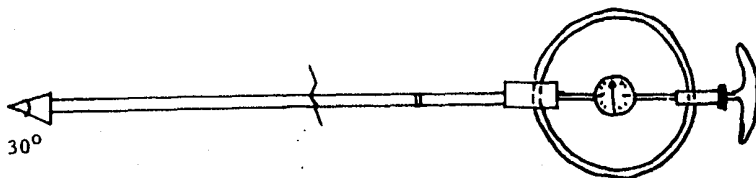


Figura 1

Un modo sencillo de determinar la resistencia a la penetración es empujando el cono encamisado a una velocidad constante de 1 cm/seg., y -- midiendo la presión por medio de un dinamómetro, y después hincando la ca mis a para determinar el valor de la fricción.

La elección del método de penetración dependerá de las condiciones del terreno y el tipo de información que se requiera en el proyecto.

Dentro de los métodos semidirectos, encontramos los sondeos, - consistentes en explorar el suelo por medio de perforaciones o excavaciones, entre los cuales podemos encontrar las perforaciones con barrenos, ampliamente usadas en trabajos de ingeniería de caminos para la obtención de mues tras.

No hay una regla a seguir para la exploración con estos métodos, excepto que el perfil del suelo debe ser examinado a intervalos lo suficientemente próximos para determinar las fronteras de cada tipo de material que aparezca en el terreno. Las perforaciones deberán ser lo suficientemente profundas para determinar si las características del subsuelo y las condiciones del agua en este son aptas para la construcción del camino.

Cuando las perforaciones deban ser llevadas más allá de unos -- cuantos metros, una exploración preliminar por alguno de los métodos geofísicos vistos anteriormente puede reducir considerablemente el número de sondeos.

La elección del método a usar en los sondeos varía grandemente según el material en el que se trabaja, según la profundidad y el diámetro del agujero y según las pruebas que después se harán al material; frecuentemente se usan varios métodos en una misma perforación.

En este tipo de perforaciones existe el problema de la estabilización de las paredes y del fondo de los agujeros, la cual es independiente del método usado. Los métodos de estabilización más usuales son a base de - agua, aplicado en roca y en suelos cohesivos duros, o con fluidos tales como lodo o bentonita, que al circular sirve también para sacar material del fondo de la perforación a la superficie. Cuando estos materiales no son su ficientemente pesados, se puede aumentar su densidad mediante la adición de minerales pesados. También se puede obtener una estabilización ventajosa mediante una camisa o ademe metálico, o bien por congelación o a base de inyectar concreto al suelo en los tramos inestables, para después re-perforar.

En exploraciones para caminos, en los cuales se requieren perforaciones de unos cuantos metros de profundidad, son sumamente útiles - los métodos a base de herramientas de mano, tales como:

- a) Perforaciones a base de "Muestreador de Pistón".
- b) Perforaciones con "Pala de Postear".
- c) Perforaciones con Barrenas Helicoidales.

Las perforaciones a base de muestreador de pistón consisten en presionar contra el suelo al muestreador hasta que se llene y entonces es girado o simplemente extraído con la muestra la cual es tomada y el muestreador nuevamente colocado en el agujero, éste sistema se puede usar en suelos blandos, pero en suelos cohesivos frecuentemente es necesario ir perforando por algun otro sistema. Al tiempo de obtener la muestra se podrán determinar otras características observando la resistencia a la penetración del muestreador.

La pala de postear es útil en casi todos los suelos, con excepción de suelos no cohesivos o suelos con gravas grandes o boleos. Las palas de postear más comunmente usadas tienen un diámetro entre 10 y 20 cm. y se pueden emplear hasta profundidades de 8 a 10 m., excepcionalmente, hasta 15m.

La pala se introduce con movimiento de rotación, y una vez llena, se saca y se deposita el material sobre una superficie limpia, esta operación se repite hasta llegar a la profundidad deseada.

La perforación con barrenas se ejecuta introduciendo en el terreno, por rotación, una broca o barrena helicoidal que después se extrae con el suelo que se le ha adherido; se quita el suelo y se repite la operación de introducir y girar nuevamente la barrena; si se trabaja en un terreno desmoronable se requerirá encamisar el agujero. Las muestras obtenidas con la barrena en suelos con cohesión, contienen todos los elementos sólidos que integran el material, pero su estructura ha sido completamente destruída y el contenido de humedad suele, en general, ser diferente del natural del suelo. Si se desea obtener muestras inalteradas, se deberá usar un muestreador de pared delgada cada vez que se llega a algún nuevo estrato.

El método de perforación a base de barrenas podría ser considerado como intermedio entre los métodos semidirectos y los métodos directos de exploración cuando es usado con objeto de hacer agujeros de gran diámetro para obtención de muestras inalteradas.

Los métodos de exploración directos, o de muestreo continuo, consisten en la excavación de un pozo para obtención de muestras inalteradas de grandes tamaños, este método es sumamente lento y más caro que otros. Tiene la ventaja de proporcionar una información real y detallada de las condiciones del suelo; pero, como los de exploración directa a base de zanjas, túneles o fosas, son económicamente impracticables en caminos,

debido a la gran superficie por explorar y al tipo especial de muestras requeridas para los ensayos.

Cualquiera que sea el método usado en la exploración del subsuelo, se requerirá que el espaciamiento entre sondeos varíe de acuerdo con la uniformidad del perfil, con los diferentes estratos, su espesor, color, textura, estructura, composición y con la topografía.

En caminos se recomienda separar dichos sondeos a iguales intervalos que las estaciones del camino, si no se tiene una información anterior acerca del tipo de suelo; dicha separación se deberá variar según las siguientes condiciones: Si el perfil del suelo es uniforme la separación entre sondeos se podrá incrementar. Si las características del perfil cambian, se deberán hacer sondeos intermedios, hasta conocer la variación. Cuando la topografía varíe considerablemente y se tenga una sucesión de cortes y terraplenes, se requerirá un número mayor de sondeos detallados en los cortes. Cuando se pongan terraplenes sobre el terreno natural o sobre algún camino ya existente, no será necesario hacer sondeos, excepto para determinar las características de soporte del suelo; si el material de relleno es obtenido de bancos de préstamo a lo largo del camino, dichos bancos deberán ser cuidados y totalmente examinados.

Los sondeos deberán tener una profundidad mínima de un metro - bajo la rasante del camino; esta profundidad se podrá variar por ejemplo, cuando el camino se extiende a lo largo de un mismo estrato del perfil, las perforaciones deberán prolongarse atravesando el primer estrato, bajo las zanjas laterales, o a través del estrato por el cual escurrirá el agua. Cuando se tome material de zanjas a lo largo del camino, las perforaciones se deberán llevar a la profundidad probable de dichas zanjas. Cuando la localización del camino sigue algún tramo de un camino ya existente, el perfil - podrá ser obtenido, complementando los cortes expuestos con sondeos hechos, en áreas que muestren fallas en la estructura del pavimento; en estas áreas los sondeos se llevarán a una profundidad mínima de un metro bajo la rasante del camino.

Se deberá llevar una información sistemática y completa de todos los sondeos y pruebas de exploración del camino, describiendo la naturaleza del suelo, la localización de cada pozo, la identificación de cada muestra -- tomada para análisis en el laboratorio, la localización de zonas de filtración, mantos de roca y tipo de ésta, y cuando sea posible, el nombre de clasificación del suelo, para correlaciones futuras.

La descripción del suelo deberá incluir una representación del - perfil en el que aparezca la secuencia, número y espesor de cada capa del suelo, describiendo el tipo de material, su textura, su estructura, contenido orgánico, humedad y grado de cementación. Con los datos de los sondeos,

se podrá hacer un plano del perfil del terreno que será sumamente útil para el diseño de la estructura del pavimento. Este plano podrá mostrar al perfil identificado durante la exploración, indicando las características de cada tipo de material y sus fronteras, la localización de los sondeos, la localización de la obtención de muestras, y notas suplementarias sobre el drenaje y la topografía, o bien mostrar un perfil detallado, representando cada capa de material observada en la exploración; este método es usado generalmente en terrenos complejos, como son los pantanosos o los de topografía difícil en el que se requerirán varios cortes profundos y grandes terraplenes para obtener una buena alineación del camino.

Muestreo.-

Durante la exploración se requerirá la obtención de muestras alteradas, para poder determinar las características de los materiales de los diferentes estratos, (la única condición que deben tener estas muestras es que la cantidad de material obtenida sea suficiente para poder llevar a cabo las pruebas necesarias), y muestras inalteradas, con objeto de determinar las propiedades mecánicas del material; dichas muestras deberán tener las dimensiones requeridas, las cuales dependerán del método y equipo que se use para determinar las propiedades mecánicas que intervienen en un diseño correcto.

A continuación se muestra una tabla con las cantidades y medidas sugeridas de las muestras para poder efectuar las pruebas descritas en este trabajo.

Tipo de Exploración		Tipo de Prueba	Condiciones de la muestra	Cantidad y dimensiones de la muestra
Exploración de reconocimiento.		Clasificación visual, contenido de humedad y límites aproximados.	Representativa.	Muestra de 2.5 a 5 cm de diámetro y 300 cm ³ para pruebas.
Exploración detallada pruebas físicas menores.		Límites líquido y plástico, análisis granulométrico, densidad de sólidos.	Representativa	Suelo de granos finos 300 cm ³ mínimo, suelos de granos gruesos a gravas 600 cm ³
		Contenido de humedad, peso volumétrico.	No debe haber cambios de volumen.	5.75 cm a 7.0 cm. de diámetro, en materiales granulares sin cohesión muestras de
		compresión no confinada, cortante directo.	Inalterada.	1,000 a 2,000 cm ³
Exploración especial pruebas físicas mayores.		Permeabilidad, Consolidación, compresión triaxial, esfuerzo torsionante.	Inalteradas.	7 cm. de diámetro mínimo pero de unos 15 cm. de diámetro preferiblemente.
Materiales de la estructura del pavimento.	Exploración.	Análisis granulométrico, compactación, compresión triaxial, Prueba de soporte de California.	Representativa o mezcla representativa.	De un estrato 50 a 100 Kg., mezclas para una serie de pruebas 250 Kg.
	Control de Construcción	Peso volumétrico, contenido de humedad, prueba de soporte de California.	Inalterada.	Densidad 5 a 10 cm. de diámetro, prueba de soporte de California 7 pulgadas diámetro.
Prueba Marshall para diseño de mezclas.		Densidad de sólidos, Estabilidad y flujo de los especímenes de la mezcla, volumen de vacíos.	Representativa.	Serie de pruebas para una granulometría dada. Agregados = 26 Kg. Asfalto = 4 lbs.

Durante los sondeos exploratorios se deberán tomar muestras --
contínuas de 2.5 a 5 cm., de diámetro, mientras que en exploraciones deta-
lladas se recomienda obtener muestras contínuas de 5.75 a 7 cm., de diá-
metro y cuando se requiera efectuar otras pruebas a los materiales, se de-
berán obtener muestras de 12.5 Kg. de cada capa o estrato o a cada 1.50 m.
en estratos de grandes espesores; dichas muestras se podrán obtener directa-
mente de algún corte expuesto o de alguno de los sondeos, basándose en los
estudios hechos a partir de la investigación exploratoria, la cual nos indicará
en donde debemos reducir los intervalos entre la obtención de muestras así -
como la localización de los diferentes estratos. Para llevar a cabo algunas
pruebas físicas, tales como permeabilidad o consolidación, se requerirán -
muestras inalteradas con un diámetro de 7.5 cm. o más.

Para la investigación de los depósitos de materiales, se reque-
rirán muestras representativas obtenidas directamente o mezclando mues-
tras de diferentes sondeos y de diferentes profundidades, y después cuar-
teándolas para obtener la cantidad de material requerida para las pruebas.
Cuando el material sea usado en la construcción del camino, o como agre-
gado asfáltico, se recomienda obtener una muestra de 250 Kg. para una --
serie de pruebas estándar. La A.S.T.M. recomienda, para la investiga-
ción preliminar de un depósito de materiales de construcción de carreteras
que las muestras de grava o arena no sean menores de 50 Kg. y tan gran-
de que cada muestra no contenga menos de 7.5 Kg de arena y/o 25 Kg de -
grava. Por ejemplo, si se tiene un depósito con 12.5 % de grava se deberá
obtener una muestra total de 200 Kg., para tener el mínimo requerido de
25 Kg. de grava.

En la obtención de muestras inalteradas se deberá tener cuidado
de no alterar la muestra durante la perforación, la obtención, el empaque
o la transportación de la misma. Ciertas precauciones deberán tomarse -
respecto al líquido estabilizador, el cual en caso de usarse arriba del nivel
freático puede cambiar el contenido de humedad del suelo. Antes de obtener
la muestra, se deberá limpiar bien el agujero para no obtener muestras --
con impregnaciones de material procedente de las paredes de la perfora-
ción, también se deberá tener cuidado en el momento de obtener la muestra
ya que la presión contra el suelo al introducir el muestreador puede defor-
marla, cambiando las propiedades mecánicas del suelo. En muestras con-
tínuas se deberá quitar la parte superior de cada espécimen y no usarse --
en las pruebas; en muestras que no requieren ser contínuas, se deberá dejar
un intervalo de 2 ó 3 diámetros del agujero entre cada muestra.

Para la obtención de muestras durante las investigaciones explo-
ratorias para caminos, generalmente se usa el barreno o la pala de postear.

En arenas poco cohesivas, situadas bajo el nivel freático, el sue-
lo no permanece dentro del muestreador, por lo que se usan cucharas sa-

camuestras con un diafragma de acero en la parte inferior o muestreadores con una punta cónica y una ranura longitudinal por la cual entre el material al ser girado el muestreador.

Obtención de muestras inalteradas.-

Para este objeto se utilizan los tubos shelby de pared delgada que tienen una longitud de 60 a 90 cm. y el espesor de la pared es de 1.3 a 1.6 mm. Para obtener la muestra, se conecta el muestreador en el extremo de las -- barras de sondeo y se baja dentro del agujero, se hincan unos 15 cm., y el - resto se podrá hacer penetrar mediante un movimiento continuo lento origina do por medio de un gato hidráulico o por medio de un movimiento continuo rá pido originado por un solo golpe en el sentido de la penetración del muestrea dor.

El método usado para obtener la muestra tiene gran influencia en el grado de alteración de ésta, la muestra obtenida por medio de un solo - golpe será la menos alterada. Una vez que se ha hincado el sacamuestras, se hacen rotar las barras de sondeo, para cortar el extremo inferior de la muestra y extraerla.

El grado de alteración depende de las dimensiones del sacamuestras y del procedimiento utilizado para introducirlo en el suelo. La alteración debida a las dimensiones del muestreador está íntimamente ligada a la relación de Kerf o sea a la relación entre el área interior y el área anular del muestreador.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} (D_f^2 - D^2)$$

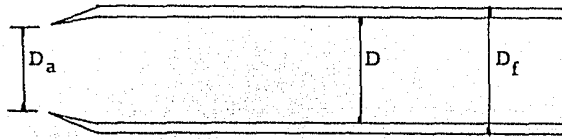
$$\text{Relación de Kerf} = \frac{A}{A_a} = \frac{D_f^2 - D^2}{D^2}$$

y es igual, aproximadamente, a la relación entre el volumen desplazado - del suelo y el volumen de la muestra. La resistencia a la penetración del muestreador y la posibilidad de una entrada excesiva del suelo en este, la cual daría origen a una alteración en la muestra crecen con el crecimiento de la relación de Kerf. Se ha observado que la deformación es pequeña, para una relación de Kerf de 10 ó menos. La fricción entre el suelo y la pared interior del tubo depende de la relación del claro interior C_i :

$$C_i = \frac{D - D_a}{D_a}$$

esta relación debe ser lo mayor posible para que la expansión lateral sea menor pero no tanto para permitir una deformación excesiva.

Para muestras cortas se recomienda un C_i de 0 a 0.5 %, para muestras medianas del 0.5 al 0.75 % y para muestras largas del 0.75 al 1.5 %, y en suelos cohesivos de 0 a 3 %.



También se ha observado que la relación de la longitud de la muestra al diámetro interior es una constante que aumenta con el crecimiento de C_i , con la velocidad y uniformidad de penetración, con la profundidad del muestreo, etc., y se han encontrado convenientes las siguientes relaciones:

Para suelo denso o suelo cohesivo $L_s = (5 \text{ a } 10) D$

Para suelo muy blando cohesivo $L_s = (10 \text{ a } 20) D$

Cuando la fricción interna es grande y las longitudes de las muestras obtenidas son pequeñas, se deberá usar un tubo muestreador con pistón o aumentar la velocidad de penetración del muestreador.

Para obtener muestras inalteradas de arena bajo el nivel freático, se podrá convertir la arena en un material cohesivo por medio de una inyección asfáltica la cual es eliminada para el ensayo por medio de un solvente; otro método es congelando el suelo antes de ser extraído.

Una vez extraída la muestra por alguno de los métodos descritos, deberá ser cuidadosamente protegida con 2 ó 3 capas de parafina y brea; de ser posible, dicha protección deberá hacerse en el lugar de la extracción, después deberá ser colocada en un cajón con aserrín o paja, para evitar choques y golpes durante el transporte, no deberá olvidarse colocar en el mismo cajón de la muestra una tarjeta con todos los datos de identificación.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Se requerirán diferentes pruebas de acuerdo con la tabla de la página 22 con objeto de identificar, clasificar y determinar ciertas propiedades mecánicas de los materiales constituyentes de la rasante y la subrasante del pavimento.

Es sumamente importante saber dar una interpretación correcta a los resultados obtenidos en el laboratorio a partir de los ensayos.

Para clasificar un suelo y poder determinar su comportamiento en la rasante o subrasante de un camino, se requerirá identificarlo mediante los resultados obtenidos en:

- 1.- Un análisis granulométrico.
- 2.- Pruebas para determinar los límites de consistencia.
- 3.- Pruebas de compactación.
- 4.- Determinación de la densidad de sólidos.

El análisis granulométrico de un suelo consiste en determinar el tamaño de las partículas o granos que lo constituyen y fijar, en porcentaje del peso total, la cantidad de gramos de los distintos tamaños.

A partir de la distribución de los granos en un suelo es posible formarse una idea aproximada de otras propiedades del mismo. Frecuentemente se encuentra que los suelos de granos de tamaños mayores proporcionan propiedades mecánicas más favorables en ingeniería de caminos, estos materiales de granos gruesos así como los materiales arenosos no sufren la dañina acción de la capilaridad, la cual es tan común en materiales de granos finos tales como limos o arcillas.

Basándose en algunas relaciones empíricas, la AASHO da un criterio de selección de materiales para bases y subbases de caminos de acuerdo con la granulometría.

El grado de permeabilidad también está íntimamente ligado con la granulometría, aunque también depende de la forma de los granos, la cual puede ser muy diferente en suelos con granulometría idénticas.

El análisis granulométrico de un suelo puede ser de dos tipos:

1.- Análisis mecánico, consistente en determinar el tamaño de las partículas haciendo pasar la muestra de suelo por una serie de mallas. Se aplica para tamaños de partículas mayores de 0.074 mm. (abertura entre hilos de la malla No. 200).

2.- El análisis granulométrico de materiales de granos muy finos, o sea, los que han pasado la malla número 200 (0.074 mm.), mediante el método del hidrómetro basado en la aplicación de la ley de Stokes.

Para el análisis mecánico se usan cribas o mallas con aberturas cuadradas formadas por una retícula de hilos, o aberturas redondas, originadas por perforaciones en una lámina.

La forma más conveniente para representar el análisis granulométrico es mediante una gráfica semilogarítmica, en la cual las abscisas representan el logaritmo del diámetro de las partículas y las ordenadas el porcentaje acumulado, en peso, de los granos menores que el tamaño indicado por la abscisa. Cuanto más uniforme es el tamaño, más inclinada será la curva, y suelos de igual uniformidad darán curvas idénticas, cualquiera que sea el tamaño de sus partículas. La distancia horizontal entre dos curvas iguales es igual al logaritmo de la relación entre los tamaños medios de los granos de los suelos representados.

Para llevar a cabo la prueba de granulometría se requerirá una balanza cuya escala deberá tener una aproximación del 0.1% del peso de la muestra que se analizará, un juego de mallas con aberturas cuadradas, --cuyas aberturas serán escogidas de acuerdo con la información requerida por las especificaciones usadas. El entramado de los alambres en mallas de aberturas cuadradas o las perforaciones en mallas con aberturas redondas deberán cumplir con las especificaciones M92 de la AASHO. También se requerirá un horno que pueda mantener una temperatura constante de 110°C.

La cantidad necesaria de material para la prueba de cribado, --deberá ser obtenida de la muestra por el método de cuarteo.

Se recomiendan los siguientes tamaños de muestras, pesadas --secas, para el análisis granulométrico.

Material con más del 95% que pasa la malla número 8 (2.38 mm)

muestras de 100 gr.

Material con más del 90% que pasa la malla número 4 (4.76 mm.) y más del 5% retenido en la malla número 8, muestra de 500 gr.

Pero en ningún caso la parte retenida en algunas de las mallas de berá pesar más de 4 gr. por cada 6.5 cm de la superficie de la malla; si pesa más dicho material deberá condicionarse a la especificación anterior, introduciendo una malla con abertura mayor que la que retiene dicha cantidad de material o mediante una selección apropiada del tamaño de la muestra.

En materiales de granos gruesos, la muestra deberá ser pesada después de ser secada y no deberá ser menor de las siguientes cantidades.

Tamaño máximo de las partículas en pulgadas.	Peso mínimo de la muestra en kilogramos.
3/8	1.0
1/2	2.5
3/4	5.0
1	10.0
1 1/2	15.0
2	20.0
2 1/2	25.0
3	30.0
3 1/2	35.0

Para muestras de 5 Kg. o más se recomienda usar cribas con un mínimo de 40 cm. de diámetro.

En el caso de suelos que contengan a la vez materiales de granos grandes y pequeños, deberán ser separados en dos tamaños, mediante la malla número 4 (4.76 mm.) y las muestras de cada uno de los dos tamaños se prepararán de acuerdo con el párrafo inmediato anterior. En el caso de

que parte del material pase la malla número 200 (0.074 mm.) éste deberá ser analizado por el método del hidrómetro.

Las muestras de material que no ha pasado la malla número 200, deberán ser secadas a una temperatura que no exceda a 110°C antes de proceder a separar los diferentes tamaños usando las cribas necesarias -- según las especificaciones adoptadas.

El cribado del material menor de la malla número 4 se efectuará mediante un movimiento lateral y vertical, acompañado de una vibración, - para mantener en movimiento continuo a la muestra sobre la superficie de la malla sin voltear o hacer pasar los fragmentos a través de la malla con la mano. La operación de cribado deberá ser continua hasta que ya no pase por ninguna malla una cantidad de material mayor al 1% del peso total en un tiempo de un minuto. Si el material retenido en la malla número 4 también debe ser analizado, el cribado podrá hacerse a mano. Después de terminar el cribado, se deberán pesar las porciones retenidas en cada malla. Los resultados se podrán dar por el porcentaje que pasó cada malla o por el que quedó retenido en cada malla, dependiendo de las especificaciones usadas. Los porcentajes se deberán aproximar a un número entero, excepto el porcentaje que pasa la malla número 200, el cual se aproximará al -- décimo. Dichos porcentajes serán respecto al peso total de la muestra, -- incluyendo el material que pasa la malla número 200.

DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE SÓLIDOS.

En el estudio de materiales para caminos la determinación de la densidad de sólidos del suelo es indispensable.

Densidad de sólidos de un suelo es la relación del peso de un volumen de suelo a una temperatura dada al peso de un volumen igual de agua destilada, a la misma temperatura.

La densidad de sólidos tiene relativamente poca importancia en lo referente al comportamiento de los suelos, pero debe ser determinada ya que es necesaria para la determinación de algunas propiedades como son la relación de vacíos y el grado de saturación.

En materiales mayores que la malla número 4, generalmente se efectúan las pruebas de densidad de sólidos y absorción simultáneamente.

Cuando se tiene un material con granos gruesos y finos deberán ser separados en la malla número 4 y se determinarán separadamente sus

densidades siendo el resultado final el promedio de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad de Sólidos combinada} = \frac{1}{P_c/g_c + P_f/g_f}$$

donde P_c es el porcentaje de material de granos gruesos, en decimal. g_c es la densidad de sólido del material de granos gruesos. P_f es el porcentaje de material de granos finos en decimal. g_f es la densidad de sólido del material fino.

La determinación de la densidad de sólidos, en suelos finos, se hace mediante el uso del picnómetro, para lo cual se requiere un picnómetro con capacidad para 100 cm³ y una balanza con sensibilidad hasta de --- 0.01 gr.

El picnómetro deberá ser limpiado, secado y pesado; después se llenará de agua destilada y se pesará. llamando W_a a esta cantidad, y, simultáneamente, se tomará la temperatura T_i correspondiente, aproximando al grado, dicha temperatura se irá variando y se hará una gráfica de W_a con su correspondiente T_i .

El valor de W_a para una temperatura T_x se obtendrá de la siguiente manera:

$$W_a \text{ (a una temp. } T_x) = \frac{\text{Densidad del agua a } T_x}{\text{Densidad del agua a } T_i} [W_a \text{ (a } T_i) - W_f] + W_f$$

W_a peso del picnómetro lleno de agua en gr.

W_f peso del picnómetro en gr.

T_i es la temperatura del agua en °C.

T_x temperatura en °C a la cual se obtendrá W_a

El suelo podrá estar perfectamente seco o bien tener su humedad natural. En suelos secos, la muestra deberá ser por lo menos de 25 gr. - Cuando la muestra contiene su humedad natural, el suelo deberá ser pesado bien seco al final de la prueba, evaporando el agua a una temperatura -- constante de 110°C.

Muestra de suelo arcilloso, con su humedad natural, deberán ser dispersadas en agua destilada antes de ponerse en el picnómetro, usando -- algún dispersor.

Las muestras secadas a una temperatura constante deberán per-

manecer, lo menos, 12 horas en el horno.

La prueba se llevará a cabo poniendo la muestra en el picnómetro, añadiendo agua destilada hasta completar unas tres cuartas partes del volumen y extrayendo el aire mediante la acción de un vacío no mayor de 100 mm. de mercurio o una ebullición por diez minutos o más, después de lo cual se llenará el picnómetro con agua destilada y se pesará, obteniendo el peso W_b , también se leerá la temperatura T_x .

La densidad de sólidos del suelo a la temperatura T_x será:

$$G = \frac{W_o}{W_o + (W_a - W_b)}$$

W_o peso de la muestra secada en el horno en gr.

W_a peso del picnómetro lleno con agua a la temperatura T_x , este valor puede tenerse tabulado.

W_b peso del picnómetro lleno con agua y suelo en gr y a una temperatura T_x

T_x es la temperatura del contenido del picnómetro en el momento de obtener W_b en $^{\circ}C$.

Si se requieren los valores para una temperatura de $20^{\circ}C$ se requerirá multiplicar el valor de la densidad de sólidos por una constante la cual se puede encontrar tabulada y es igual a:

$$K = \text{Densidad relativa del agua a } T_x / \text{densidad rel. del agua a } 20^{\circ}C.$$

Cuando se requiere la densidad de sólidos basada en agua a $4^{\circ}C$., se calculará multiplicando la densidad de sólidos a una temperatura T_x por la densidad relativa del agua a una temperatura T_x .

DENSIDAD DE SÓLIDOS Y ABSORCIÓN EN MATERIALES QUE SON RETENIDOS EN LA MALLA NUMERO CUATRO

Este método es usado para determinar la densidad de sólidos y la absorción a las 24 horas de tener al material sumergido.

Se requerirá una balanza con 0.5 gr de sensibilidad, una canasta de alambre de 20 cm. de diámetro y 20 cm. de altura, un recipiente en el cual se pueda sumergir la canasta y un dispositivo para suspender la canasta sumergida de la balanza.

La muestra deberá ser aproximadamente de 5 Kg., desechando el material que pase la malla de 3/8"; en caso de material homogéneo, todo él deberá ser retenido en la malla de 1". Después de lavar los granos, la muestra será secada en el horno a una temperatura de 100°C a 110°C y será colocada en el agua durante 24 horas después de las cuales será secada superficialmente, rodándola en un paño absorbente hasta que desaparezcan las partículas visibles de agua; durante este proceso se debe evitar cualquier evaporación. Se deberá pesar la muestra al aire (W_b), e inmediatamente después se colocará en la canasta de alambre y se obtendrá el peso en el agua a una temperatura de 20°C a 25°C (W_c), después se secará en el horno hasta obtener un peso constante W_a .

Basándonos en el principio de Arquímedes se tendrá que la densidad de sólidos será $= W_b / W_b - W_c$ y la absorción del material saturado, superficialmente seco, será:

$$\text{Absorción} = W_b - W_a / W_b$$

Para determinar la densidad de sólidos del suelo en estado natural o después de ser compactado en el lugar, se medirá el volumen ocupado por la muestra extraída, llenando el agujero con aceite o arena.

$$V = \frac{W_1}{D_2} \quad D_1 = \frac{W_s}{V} \quad D = \frac{D_1}{1 + W/100}$$

V es el volumen del agujero.

W_1 peso de la arena o aceite requerido para reemplazar el suelo.

D_2 peso volumétrico de la arena o el aceite.

W_s peso del material húmedo tomado del agujero.

D_1 peso volumétrico del suelo húmedo.

D peso volumétrico del suelo seco.

W porcentaje de humedad basándose en el peso seco.

Determinación de la densidad de sólidos del suelo en estado natural o después de ser compactado, por medio de muestras inalteradas de unos

10 a 13 cm. de diámetro y con una longitud igual a la del estrato del cual se calcula la densidad.

De una de las paredes del agujero se obrendrá además, una muestra alterada para determinar el contenido de humedad W .

Se deberá obtener el peso de la muestra inalterada y, después, deberá ser sumergida en parafina para ser pesada ya cubierta de parafina; la parafina tiene un peso volumétrico de 0.880 gr/cm^3 . Introduciendo la muestra en un recipiente con agua se conocerá su volumen por medio del agua desalojada, y se podrá calcular la densidad de sólidos de la siguiente manera:

$$V_p = \frac{W_{ps} - W_s}{0.880} \quad V_s = V_{ps} - V_p \quad D_1 = \frac{W_s}{V_s} \quad D = \frac{D_1}{1 + W/100}$$

Donde:

- V_p es el volumen de la parafina en cm^3
- V_{ps} volumen de la parafina y el suelo en cm^3
- V_s volumen de la muestra de suelo en cm^3
- W_s peso de la muestra de suelo en gr.
- W_{ps} peso de la muestra y parafina en gr.
- D_1 peso volumétrico del suelo húmedo en gr/cm^3
- D peso volumétrico del suelo seco en gr/cm^3 .
- W contenido de humedad en porcentaje del peso del suelo seco.

La densidad de sólidos de los suelos varía, entre 2.0, para suelos porosos y 3.0 para suelos que contienen minerales pesados, pero la mayoría se encuentran entre 2.65 y 2.85.

PRUEBAS DE CONSISTENCIA Y LIMITES

Las propiedades de un suelo formado por partículas finas, dependen de en gran parte del contenido de humedad. El agua forma una película alrededor de los granos y su espesor puede ser determinante en el comporta

miento del material. Cuando el contenido de humedad es muy elevado, prácticamente se tiene una suspensión muy concentrada, sin resistencia estática al esfuerzo cortante; al ir perdiendo agua, dicha resistencia va aumentando hasta llegar a un estado plástico en el que el material es fácilmente moldeable; - si el secado continúa, el suelo llega a ser un sólido, pudiendo resistir también esfuerzos de compresión y tensión considerables.

La aplicación más usual de los resultados de las pruebas de límites consistencia a problemas de caminos es en la clasificación y suelos con un -- alto límite líquido y un alto índice plástico, son arcillas con propiedades ingenieriles pobres. Un índice de plasticidad y un límite líquido bajos, representan a materiales granulares finos sin cohesión o plasticidad. El límite líquido y el índice de plasticidad son parámetros que valúan la calidad de los materiales finos para ser usados en el pavimento.

A. Atteberg, arbitrariamente, marcó las fronteras de los cuatro estados que se presentan en materiales finos, mediante los siguientes límites: Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Contracción. El primero es la frontera entre el estado líquido y el plástico, el segundo entre el estado plástico y el semisólido y el tercero separa el estado semisólido del sólido. Estos límites son también llamados de consistencia, y se expresan por un porcentaje de agua. A la variación del contenido de agua entre el límite líquido y el plástico se le llama índice de plasticidad y da una buena idea del comportamiento plástico del material. Se llama índice de fluidez a la relación entre el cambio en el contenido de agua y el cambio correspondiente al esfuerzo cortante, gráficamente se representa por la pendiente de la recta usada para obtener el límite líquido.

El índice de plasticidad máximo permitido está estipulado para cada material de la subrasante y la rasante; este índice, junto con los límites y el peso volumétrico seco de compactación del suelo, obtenidos en el laboratorio, son generalmente aceptados para juzgar la calidad de un suelo para ser usado en terraplenes o en la subrasante.

Basándose en estos datos, diferentes departamentos de carreteras han formulado tablas con las características que deberán tener los suelos - usados en terraplenes. Por ejemplo el departamento de caminos de Ohio, - U. S. A. dice: Suelos utilizados en terraplenes deberán tener un límite líquido menor de 65 %, y cuando esté comprendido entre 65% y 35% el índice de plasticidad deberá ser mayor de $(0.6 (LL) - 0.9)$.

El límite líquido está fijado por el contenido de humedad, expresado en porcentaje del peso seco, que debe tener un suelo moldeado para que una muestra en la que se haya practicado una ranura de ciertas dimensiones, al someterla al impacto de 25 golpes en la copa de A. Casagrande se cierre en una longitud de $1/2''$ sin resbalar en su apoyo. Para la obtención del valor exacto, se acostumbre hacer la prueba con tres valores cerca del límite lí-

quido, los que se marcan en una gráfica semilogarítmica, el contenido de humedad en la escala natural y el número de golpes en la escala logarítmica; para 25 golpes se obtendrá el contenido de agua correspondiente al límite líquido.

El límite plástico consiste en determinar el contenido de humedad con el cual comienza a agrietarse un cilindro de 3.2 mm. de diámetro formado con suelo, al ser rodado con la mano sobre una superficie lisa no absorbente.

El límite de contracción es el contenido de humedad bajo el cual una pérdida de agua posterior, por evaporación, ya no trae consigo una reducción del volumen. Cuando el contenido de humedad pasa por debajo del límite de contracción el suelo cambia a un color más claro.

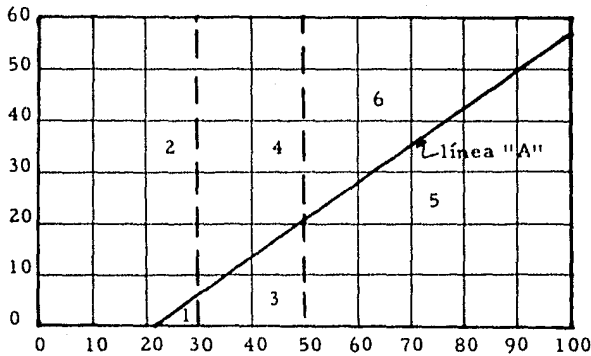
El índice de plasticidad se obtiene restando el límite plástico del límite líquido, cuando el límite plástico es igual o mayor que el líquido el suelo deberá ser clasificado como no plástico, tal como ocurre en suelos arenosos.

En suelos arcillosos, el límite líquido es mayor de 40, generalmente en suelos limosos está entre 25 y 50; los suelos arenosos no son -- plásticos.

Correlacionando el límite líquido con el correspondiente índice de plasticidad de un gran número de suelos finos, A. Casagrande elaboró la carta de plasticidad, mostrada en la siguiente figura, en la cual la línea "A" establece la frontera entre suelos arcillosos y limosos.

A. Casagrande observó que un aumento en el contenido de materia orgánica del suelo se traduce en un incremento del límite líquido mientras que el índice de plasticidad cambia poco; por lo que, las arcillas con un alto contenido de materia orgánica están representadas por puntos ubicados bajo la línea "A", o sea en la zona de los limos inorgánicos, este inconveniente es en general secundario, ya que los suelos orgánicos se distinguen por su olor característico y su color oscuro. En casos de duda se deberá determinar el límite líquido del material fresco y el límite líquido del material después de ser secado al horno, si el límite líquido disminuye en un 30% o más, el suelo es orgánico.

Índice de Plásticidad, I.P.



Límite Líquido, LL, %

Carta de Plasticidad de A. Casagrande

- 1.- Limos inorgánicos de baja compresibilidad.
- 2.- Arcillas inorgánicas de baja plasticidad.
- 3.- Limos orgánicos y limos inorgánicos de compresibilidad media.
- 4.- Arcillas inorgánicas de plasticidad media.
- 5.- Limos inorgánicos de gran compresibilidad y arcillas orgánicas.
- 6.- Arcillas inorgánicas de alta plasticidad

En bases y subbases se recomienda usar materiales con límite líquido de 25% ó menos y un índice de plasticidad máximo de 6, o sea, materiales granulares, predominantemente.

COMPACTACION

Los asentamientos de terraplenes no compactados, constituyeron serios problemas cuando apareció el automóvil y otros vehículos pesados; - se observó entonces que los caminos de concreto hidráulico sobre terraplenes

no compactados se rompían con facilidad y los pavimentos flexibles se des-nivelaban excesivamente. La necesidad de evitar estos inconvenientes colaboró al desarrollo de los métodos de compactación. Se observó que ningún método de compactación es igualmente adecuado para todos los suelos y que el grado de compactación que puede alcanzar un suelo dado, mediante un determinado procedimiento de compactación, depende en gran parte del contenido de humedad; la compactación máxima se obtiene para un determinado contenido de humedad llamado óptimo. La determinación del contenido de humedad óptimo se puede lograr en el laboratorio mediante el sistema ideado por R. R. Proctor, que encontró que aplicando una cierta energía a un suelo para compactarlo, el peso volumétrico varía con el contenido de humedad.

Proctor buscando una prueba de laboratorio que igualara los resultados obtenidos en el campo con los equipos de compactación disponibles entonces, propuso la prueba de compactación Proctor, consistente en colocar 3 capas iguales de suelo humedecido, dentro de un molde cilíndrico de 4 pulgadas de diámetro interior con volumen de 1/30 de pie cúbico, provisto de una extensión, cada capa era compactada con 20 golpes con un pisón con una zapata inferior de 2 pulgadas de diámetro y peso de 5 lbs. el cual se guiaba con una mano y con el auxilio de un tubo para dar golpes firmes desde una altura de 12 pulgadas. Más tarde Proctor aumentó el volumen del molde cilíndrico a 1/20 de pie cúbico, logrando que la curva peso volumétrico, contenido de humedad se asemejará más a la curva obtenida en el campo.

En los últimos años, el uso de equipo más pesado ha hecho posible obtener pesos volumétricos compactados mayores, por lo que para obtener datos de laboratorio más reales se ha modificado el método de Proctor, introduciendo nuevas normas para la prueba de compactación dinámica, variando el volumen del molde, el número de capas de suelo colocadas en su interior, el número de golpes aplicados a cada capa y substituyendo los golpes firmes por golpes de un pisón de diferente peso y que golpea desde una determinada altura en caída libre. Para cada variación en las normas se obtienen diferentes pesos volumétricos para una determinada humedad, los cuales se ha observado dependen de la energía dinámica entregada, o sea:

$$E = \frac{Ph Nn}{V}$$

E = Energía específica de compactación en Kg. $\frac{cm}{cm^3}$

P = Peso del pisón en Kg.

N = Número de golpes de pisón por capa.

n = Número de capas

$V =$ Volumen total de suelo compactado. cm^3

$h =$ Altura de caída

Por tal razón siempre que se habla de pesos volumétricos en relación con su contenido de humedad óptimo será necesario mencionar la norma de compactación empleada.

A continuación se muestran las características de las normas de compactación más comunes en México:

Norma	Peso del pisón	Altura de caída	Número de golpes por capa	Número de capas	Energía de compactación	
	Kg.	cm.	----	----	Kg cm/cm^3	
Proctor estandar	2.5	30.5	25	3	5.48	
Proctor modificada	4.54	45.7	25	5	27.7	
Proctor SOP	2.5	30	30	3	6.36	
Proctor SRH	2.5	33.5	28	3	7.10	
A A S H O	A	4.54	45.7	25	5	27.5
	B	4.54	45.7	56	5	18.4
	C	4.54	45.7	25	5	27.5
	D	4.54	45.7	56	5	18.4

Para caminos es recomendable usar los métodos especificados por la AASHO, denominados pruebas de humedad-densidad.

Mediante la compactación se aumenta la resistencia al corte, y se disminuyen la permeabilidad y los asentamientos del terraplen.

El agua empleada para obtener una compactación determinada -

actúa como lubricante, cuando está en una proporción razonable, pero un exceso tenderá a separar las partículas y no se podrán obtener altos grados de compactación.

...

El contenido óptimo de humedad para un equipo de compactación dado, se podrá determinar a partir de los métodos especificados por la AASHO para obtener la relación entre el contenido de humedad y el peso volumétrico del suelo compactado en un molde de tamaño especificado, con un pisón de 10 libras el cual es dejado caer de una altura de 18 pulgadas.

Según las especificaciones, para el material tratado se deberá usar alguna de las cuatro alternativas siguientes; si no se especifica un método en especial, se usará el A.

Método A.- cilindro de compactación de 4" de diámetro interior, y material que pasa la malla No. 4 (4.76 mm.)

Método B.- cilindro de compactación de 6" de diámetro y material que pasa la malla No. 4.

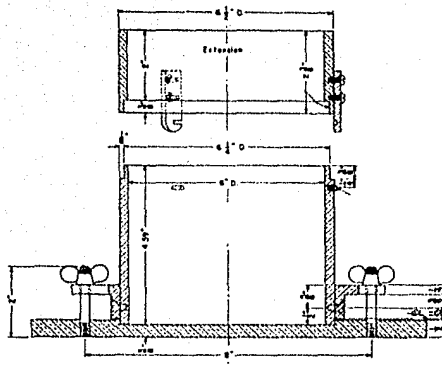
Método C.- cilindro de compactación de 4" de diámetro material que pasa la malla de 3/4".

Método D.- cilindro de compactación de 6" y material que pasa la malla de 3/4".

Para efectuar la prueba se requerirán: los cilindros metálicos de compactación con una extensión superior del cilindro de unos 2 1/2" removible. El cilindro deberá estar formado por dos mitades semicirculares unidas por algún aditamento.

El cilindro con un diámetro interior de $6" \pm 0.005"$ deberá tener una altura de $4.584" \pm 0.005"$ y una capacidad de 0.075 pies cúbicos; el pisón será de metal de 2" de diámetro en la cara de compactación, con un peso de 10 libras.

También se requerirán un aditamento para controlar la caída del pisón de 18", una balanza con sensibilidad de 0.01 libras y capacidad para 25 libras, y otra con sensibilidad de 0.1 gr. con capacidad para 1 Kg., un horno de secado capaz de mantener una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y unas mallas de 2", 3/4" y del No. 4.



Molde de 6" de diámetro interior

Método A. - Si la muestra está muy húmeda se deberá secar en una charola o en el horno, después se demorarán los terrones, teniendo cuidado de no reducir el tamaño natural de las partículas individuales. Se criba el material en la malla No. 4 hasta tener una muestra de unos 3.5 Kg. o más y se mezcla con agua para obtener un contenido de humedad de un - 4% menor al contenido de humedad óptimo y se va colocando en el cilindro de compactación al que se le ha puesto el anillo superior, en 5 capas iguales para alcanzar una altura de 5". En cada capa se darán 25 golpes bien distribuidos de una altura de 18" sobre el nivel de la superficie de la muestra. El cilindro deberá estar anclado a un cubo de concreto con un peso no menor de 100 Kg.

Ya compactado el suelo, se quita el anillo superior y se enrasa - la superficie con una espátula o cuchillo apoyándose en el perímetro del molde.

Se obtiene el peso del cilindro y de la muestra, se resta el peso conocido del cilindro, y el valor obtenido se multiplica por 30, para tener el peso, en libras por pie cúbico, de suelo húmedo compactado, se extrae el material del molde y se parte a la mitad verticalmente para tomar una muestra de 100 gr. para determinar el contenido de humedad; se desarma el cilindro y se extrae el material, el cual se desmorona hasta que se juzgue que pasa la malla No. 4 y se añade agua para aumentar el contenido de humedad en un 1% ó 2% y se repite el proceso para cada incremento en el contenido de humedad, hasta que se obtenga un decremento o un peso volu métrico constante de la muestra húmeda de suelo compactado.

En algunos materiales frágiles será necesaria una nueva muestra para cada incremento de agua.

Método B. - Se deberá obtener la muestra igual que en el método A pero con 16 libras aproximadamente, en cada capa se darán 56 golpes con el pisón y el peso del suelo compactado se multiplicará por 13.33, obteniéndose así el peso por pie cúbico de suelo húmedo compactado.

Método C. - La muestra se obtendrá igual que en el método A pero ahora se cribará en la malla de 3/4", hasta obtener una muestra de unas 12 libras y se compactará en cinco capas dando 25 golpes de pisón en cada una, al separar el anillo superior se debe tener cuidado de llenar los agujeros dejados por los granos gruesos con material fino. Para determinar el contenido de humedad se requerirá una muestra no menor de 500 gr. El material se extraerá del molde para repetir la prueba con un incremento de humedad, para lo cual se deberá desmoronar hasta que pase la malla de 3/4" y un 90% la malla No. 4; esta apreciación se hace a ojo. El procedimiento se continuará hasta obtener un peso unitario constante o decreciente.

Método D. - Este método es similar al C., pero con una muestra de 25 libras, con 56 golpes por capa y multiplicando el peso de la muestra por 13.33 para obtener el peso por pie cúbico.

En cualquiera de los métodos anteriores se calculará el contenido de humedad y el peso del suelo seco compactado, para cada ensayo, como sigue:

$$w = \frac{A - B}{B - C} 100$$

$$w = \frac{W1}{w + 100} 100$$

w es el porcentaje de humedad del espécimen

A es el peso del vidrio de reloj y del suelo húmedo.

B es el peso del vidrio de reloj y del suelo seco.

C es el peso del vidrio de reloj.

W peso de suelo compactado seco en libras por pie cúbico.

W₁ peso de suelo compactado húmedo en libras por pie cúbico.

Para relacionar la densidad y el contenido de humedad se deberá hacer una gráfica, poniendo como ordenadas los pesos volumétricos de las muestras secas, y los contenidos de humedad como abscisas; uniendo los puntos se obtendrá una curva de la cual el contenido de humedad correspondiente a la máxima ordenada será el contenido óptimo de humedad del suelo, el cual corresponderá al peso volumétrico máximo.

Valores Típicos para Diferentes Materiales

Material	Peso Volumétrico máximo Kg/m ³	Contenido de humedad óptimo %
arcilla	1440 a 1650	20 a 30
arcilla limosa	1760 a 1850	15 a 25
arcilla arenosa	1760 a 2200	8 a 15

Para arenas y gravas sin finos no hay cambios notables del peso volumétrico para diferentes contenidos de humedad.

Algunas especificaciones exigen lograr en el campo un determinado porcentaje del peso volumétrico máximo; este porcentaje en caminos -- varía del 90% al 95% en suelos granulares y del 95% al 100% en limos y arcillas, ésto da un rango de variación en el contenido de humedad.

Para observar en el campo la compactación obtenida con el equipo de construcción, será necesario medir el peso volumétrico en el lugar, para lo cual, el volumen de la muestra extraída se podrá obtener llenando el agujero que ésta deja, con arena, algún líquido viscoso o agua en una -- membrana de hule que tome la forma del agujero; otro método puede ser, -- obtener la muestra por medio de un muestreador de pared delgada; este método será ventajoso en limos y arcillas pero no en materiales que contienen grava o fragmentos de roca.

CLASIFICACION Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Un sistema simple de clasificación de suelos, que use métodos sencillos de identificación y proporcione una agrupación racional de los tipos de suelos, es sumamente útil en cualquier proyecto de ingeniería, especialmente en estudios preliminares de suelos para construcción de carreteras.

En problemas importantes de caminos es recomendable hacer investigaciones más intensas de las características del suelo y no solo basarse en las propiedades indicadas por la clasificación para ese suelo.

Los sistemas de clasificación más sencillos y rudimentarios son los que clasifican a los suelos basándose en la topografía y la geología del terreno.

Otros tipos de clasificaciones son las basadas en la granulometría y los límites de consistencia del material, en cuyo grupo se encuentran algunos de los más comunes, como el Sistema Unificado de Clasificación, y el Sistema de Clasificación de la AASHO. El doctor A. Casagrande ideó el Sistema Unificado de Clasificación basado en la utilización de los suelos como subrasantes para pavimentos y aeropuertos; este sistema toma en cuenta las características de textura en suelos con pequeña cantidad de finos que no afectan su comportamiento, y las características de plasticidad y compresibilidad en suelos con un alto contenido de finos, estas dos características se valúan de acuerdo con la gráfica Índice plástico-Límite líquido llamada Carta de Plasticidad de A. Casagrande.

El sistema Unificado de Clasificación de Suelos divide a los suelos en 15 grupos los cuales se distinguen entre sí por sus características generales, su utilidad para ser usados como base, subbase o en la subrasante, su procedimiento de compactación recomendable y sus valores de soporte para diseño. Este Sistema es generalmente usado en aeropuertos.

Sistema de Clasificación de la ASSHO .-

Este sistema se basa en observaciones hechas en materiales que se encuentran bajo pavimentos cuyo comportamiento ha estado bajo control. Actualmente este Sistema es ampliamente aceptado.

En este Sistema, los suelos que tienen aproximadamente una misma capacidad de carga e iguales características de servicio son agrupados juntos, y así se forman 7 grupos básicos, los cuales son designados A-1, - A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, y, A-7. En general los mejores para subrasantes de caminos son los del grupo A-1, después los del A-2 y así sucesivamente hasta los del A-7 que son los que tienen características más pobres para ser usados en subrasantes. Se puede concluir que el espesor requerido en la estructura del pavimento será progresivamente creciente del grupo A-1 al A-7.

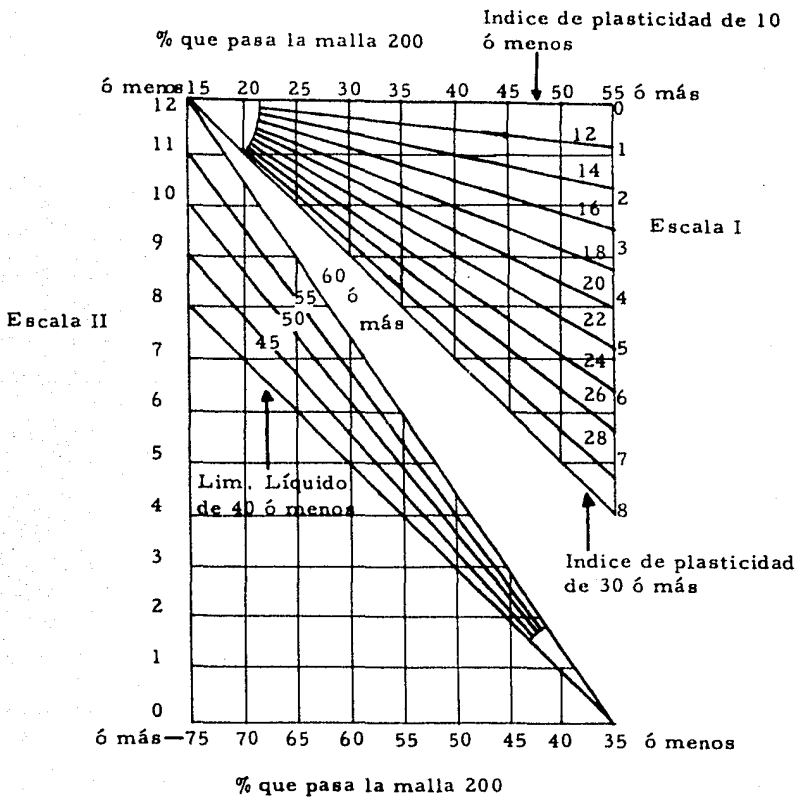
Estos siete grupos básicos han sido subdivididos en 12 subgrupos tal como se muestra en la siguiente tabla. El índice de cada grupo sirve para valorar las características del suelo para ser usado como subrasante y es función del límite líquido, del índice de plasticidad y de la cantidad de material que pasa la malla No. 200.

Clasificación General	Material granular, el 33 % ó menos pasa la malla No. 200							Material fino, más del 33% pasa la malla No. 200			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación por subgrupos.	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Porcentaje que pasa la Malla No. 10 No. 40 No. 200	50 máx 30 máx 15 máx	50 máx 25 máx	51 mín 10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características del material que pasa la malla 40 Límite Líquido Índice de Plasticidad....	6 máx		N.P.	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín
Índice de grupo	0		0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipos significativos de material	Piedra fragmentada, grava y arena		arena fina	grava y arena limosa o arcillosa				suelos limosos		suelos arcillosos	
Comportamiento como subrasante	De excelente a bueno							De mediano a pobre			
El índice de plasticidad del grupo A-7-5 es menor o igual que el límite líquido menos 30; el índice de plasticidad del grupo A-7-6 es mayor que el límite líquido menos 30.											

Para clasificar un suelo, con los datos obtenidos en las pruebas se procede de izquierda a derecho en la tabla, encontrando el grupo correspondiente mediante un proceso de eliminación.

El primer grupo de la izquierda que concuerde con los datos de las pruebas será el de la clasificación correcta.

A continuación se muestran dos tablas prácticas para encontrar el índice de grupo: El índice de grupo será igual a la suma de las dos lecturas en las escalas verticales I y II.



La clasificación de un suelo específico estará basada en los resultados de las pruebas: análisis mecánico, límite líquido, límite plástico y cálculo del índice de plasticidad, las cuales deberán efectuarse de acuerdo con las normas especificadas. Después de efectuar dichas pruebas de laboratorio será posible hacer una clasificación adecuada para un cierto material, sin gran dificultad. Sin embargo, el individuo encargado de hacer la clasificación deberá tener conocimientos relacionados con el Sistema, además de conocer algunas peculiaridades y características esenciales de los suelos para ser usados convenientemente como materiales para caminos.

Para la clasificación, inicialmente se divide a los suelos en dos grupos mayores tal como se ve en la tabla, éstos son los materiales granulares con un 35% ó menos que pasa la malla No. 200 y los materiales arcillosos o limosos con más del 35% que pasa la malla No. 200; pero se recomienda, además, clasificarlos de acuerdo con los siguientes grupos, según el tamaño de sus partículas:

a. - Guijarros. - Material retenido en la malla de 3"; estos materiales deberán ser excluidos de la porción de muestra que será usada en la clasificación, pero el porcentaje de los mismos deberá ser descrito.

b. - Grava. - Material que pasa la malla de 3" y es retenido en la No. 10 (2.0 mm.).

c. - Arena gruesa. - Material que pasa la malla No. 10 y es retenido en la No. 40 (0.42 mm.).

d. - Arena fina. - Material que pasa la malla No. 40 y es retenido en la No. 200 (0.074 mm.).

e. - Limo. - Material que pasa la malla No. 200 pero con índice de plasticidad de 10 ó menos.

f. - Arcilla. - Material que pasa la malla No. 200 con un índice de plasticidad mayor de 10.

Descripción de los diferentes grupos y sus características. -

I. - Materiales granulares:

Grupo A-1. - Fragmentos de piedra bien graduada o grava de granos gruesos a pequeños con una pequeña cantidad o sin material plástico.

Subgrupo A-1-a. - Materiales con predominio de fragmentos de piedra o grava con o sin un material bien graduado de relleno.

Subgrupo A-1-b.- Material consistente predominantemente en arena, con o sin material bien graduado de liga.

Grupo A-3.- Arenas sin granos gruesos ni material de liga (típicas de este grupo son: la arena fina de playa y la arena del desierto), sin arcilla o limo o con muy pequeña cantidad de limo no plástico.

Este grupo incluye también mezclas de arena fina mal graduada - con una cantidad limitada de grava o material de granos gruesos generalmente en depósitos de origen aluvial.

Estos suelos son usados en subrasantes para cualquier tipo de -- pavimento, pero están sujetos a erosión y deben ser compactados con rodillo metálico o mejor con neumático con vibración.

Grupo A-2. Este grupo incluye una gran variedad de materiales granulares - los cuales se encuentran en la frontera que separa a los materiales de los grupos A-1 y A-2 de los materiales limosos y arcillosos de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Este grupo incluye a todos los suelos que contienen un - 35% ó menos que pasa la malla No. 200 pero que no pueden ser clasificados dentro de los grupos A-1 ó A-3.

Subgrupos A-2-4 y A-2-5.- Incluyen varios materiales granulares que contengan un 35% o menos que pase la malla No. 200, y que la porción que pase la malla No. 40 tenga las características de los grupos A-4 y A-5. Estos grupos incluyen aquellos materiales de grava o arena - con un contenido de limo o un índice plástico mayor que el permitido en el grup A-1, y materiales de arena fina con un contenido de limo no plástico - mayor que el del grupo A-3.

Subgrupos A-2-6 y A-2-7.- Incluyen materiales como los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5 con la diferencia que el contenido de finos es de arcilla plástica, con las características de los grupos A-7 ó A-6. Los efectos combinados de un índice de plasticidad mayor de 10 con una cantidad mayor del 15% de material que pasa la malla No. 200 nos proporcionan valores de índice de grupo de 0 a 4.

Los suelos A-2 tienen características más pobres por la débil - ligazón entre sus partículas, por su graduación pobre, o por una combinación de las dos.

Dependiendo de las características y de la cantidad del material de liga, los suelos A-2 pueden convertirse en blandos en un clima húmedo o sueltos y polvosos en un clima seco, cuando son usados como subrasante de un camino; pero si se protegen de cambios extremos en el contenido de humedad pueden ser completamente estables. Los suelos A-2-4 y A-2-5 son usados satisfactoriamente como base con una compactación y drenaje -

adecuados. Los suelos A-2-6 y A-2-7 pueden perder su estabilidad a -- causa de una saturación capilar o carencia de drenaje. Con un bajo contenido de material que pase la malla No. 200 son clasificados como buenos para bases, pero con un alto contenido de material que pase la malla No. 200 y un índice plástico de 10 ó más no son muy recomendables para ser usados en bases.

Frecuentemente se usan los A-2 para cubrir subrasantes muy plásticas.

II.- Materiales limosos y arcillosos:

Grupo A-4.- El material típico de este grupo está formado por limos no plásticos o moderadamente plásticos generalmente con un 75% ó más que pasa la malla No. 200. Este grupo incluye también mezclas de suelos limosos y finos y hasta un 64% de arena o grava retenido en la malla No. 200. El índice de grupo decrece de 8 a 1 con el aumento de material de granos gruesos. Con un contenido adecuado de humedad permanente son - usados ventajosamente como componentes del pavimento, pero si no tienen una compactación y un drenaje adecuado con un aumento en el contenido de humedad se hinchan perdiendo su estabilidad, por lo que si no se puede -- garantizar un drenaje adecuado el diseño estructural del pavimento deberá basarse en la resistencia del suelo cuando está completamente saturado.

Estos suelos limosos presentan dificultades para lograr una buena compactación, por lo que se deberá llevar un riguroso control del contenido de humedad y usar rodillos neumáticos.

Grupo A-5.- El material típico de este grupo es similar al descrito en el A-4 excepto que es altamente elástico lo cual da origen a un alto límite líquido. Los índices de grupo varían de 1 a 12, y al crecer indican un efecto combinado de aumento del límite líquido y decremento - del porcentaje de material granular. Estos suelos son normalmente elásticos tanto en condiciones húmedas como semisecas y están sujetos a erosión e inestabilidad si no están correctamente drenados. Para el diseño - de la estructura del pavimento, si no se encuentran drenados adecuadamente y hay posibilidad de absorción de agua por capilaridad con una disminución de la resistencia, se deberá tomar el valor de la resistencia cuando el suelo está saturado. Para una compactación adecuada se deberá tener un control riguroso del contenido de humedad.

Grupo A-6.- Típico de este grupo es el material formado - por arcilla plástica, generalmente con un 75% ó más que pasa la malla No. 200. Este grupo incluye también mezclas de suelos arcillosos hasta con - un 64% de arena y grava. Los materiales de este grupo generalmente están sujetos a grandes cambios de volumen al pasar de un estado seco a uno húmedo.

El índice de grupo varía de 1 a 16 aumentando, debido a un efecto combinado de incremento en el índice plástico y decremento en el porcentaje de materiales granulares.

Estos suelos son muy comunes y son ampliamente usados en terraplenes. Cuando se controla debidamente su contenido de humedad, se puede obtener una compactación adecuada a base de rodillos pata de cabra o neumáticos.

Estos suelos tienen una alta resistencia en estado seco pero la pierden en gran parte al absorber agua, y tienen el inconveniente de que cuando son colocados en una franja lateral, adyacente al pavimento, tienden a contraerse originando una grieta junto al pavimento la cual permite la entrada del agua a la parte inferior de la estructura. Estos suelos absorben fácilmente agua por capilaridad, con una pérdida en su resistencia por lo que la estructura del pavimento deberá basarse en la resistencia del material saturado.

Grupo A-7.- El material y sus problemas son similares a los del grupo A-6 con las características de un alto límite líquido como los del grupo A-5, pudiendo ser elásticos y susceptibles a grandes cambios de volumen.

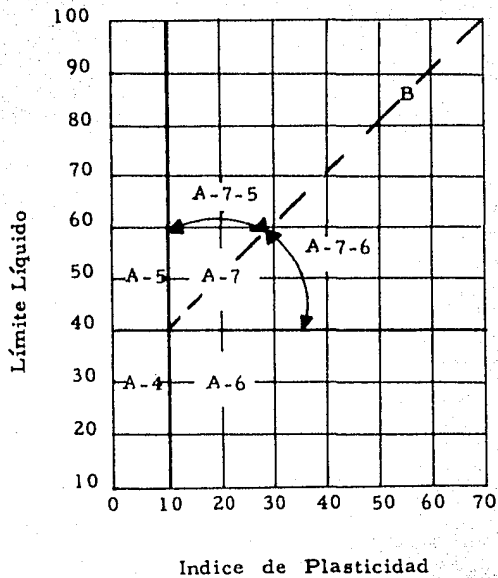
Su índice de grupo varía de 1 a 20 creciendo a causa de un aumento en el límite líquido y en el índice de plasticidad y de un decremento en el porcentaje de materiales granulares.

Subgrupo A-7-5.- Materiales cuyo índice de plasticidad y límite líquido nos dan un punto dentro de la zona correspondiente a este grupo en la siguiente gráfica, pudiendo ser altamente elástico y susceptibles a grandes cambios de volumen.

Subgrupo A-7-6.- Materiales con un alto índice de plasticidad en relación a su límite líquido y sujetos a grandes cambios de volumen.

Los suelos altamente orgánicos, tales como la turba, no son incluidos en esta clasificación debido a que su uso deberá ser evitado en lo posible en la construcción de caminos.

Para clasificar un suelo se entra en la siguiente figura con los resultados obtenidos en los ensayos del suelo; esta figura facilita la clasificación de los suelos en la tabla.



Línea B = I.,P. = L. L. - 30

DISEÑO DEL ESPESOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Para el diseño apropiado de la estructura de un pavimento asfáltico, el ingeniero deberá conocer como primer paso, el uso que se va a dar a dicho pavimento, ya que el diseño está íntimamente ligado a la intensidad de vehículos esperada en sus diferentes tipos (automóviles, autobuses y camiones) y a la carga máxima por eje de vehículo.

El segundo paso en el diseño, es la determinación de las características de soporte de los materiales de la subrasante, sobre la cual se colocará la estructura del pavimento asfáltico, y de los materiales disponibles para la subbase, la base y si es necesario, para mejorar la subrasante. Las características de soporte de los diferentes materiales se podrán determinar a base de ensayos de laboratorio y de ensayos en el sitio.

El tercer paso consistirá en preparar diseños alternativos entre los cuales se podrá escoger el diseño final, ya que generalmente existe una gran variedad de materiales, o combinaciones de éstos, que pueden ser usados satisfactoriamente en la construcción de los pavimentos asfálticos.

El cuarto y último paso, consiste en un estudio económico para seleccionar el diseño más apropiado, o sea, una elección entre los diseños alternativos en los que, además de obtener un método de construcción práctico, y una estructura adecuada según el clima y el tipo de tráfico, se pueda obtener también un proyecto económico.

El primer paso, o sea la determinación del número de vehículos y de sus cargas correspondientes, la intensidad y las cargas máximas por eje se lleva a cabo mediante una recopilación, análisis e interpretación de datos por medio de varios estudios de tránsito. Algunos de los más impor-

tantes son los conteos volumétricos, los estudios de origen y destino y los de velocidad y retraso.

La recopilación de datos se obtiene por medio de aforos de tráfico en lugares estratégicos, dichos aforos pueden consistir en aparatos electrónicos que registrarán el número de vehículos que pasan y su peso por eje o simplemente mediante un control visual y anotando la intensidad del tráfico y el tipo de vehículos.

Con estos datos y con el valor de soporte del suelo podremos obtener el espesor del pavimento mediante el uso de tablas empíricas.

El tráfico en las carreteras y en las calles de las ciudades varía con el tiempo tanto en el número de vehículos como en la magnitud de las cargas por eje. Es sabido que los efectos acumulados de diferentes cargas son un factor importante en el diseño. Cuando un pavimento flexible es sometido a cargas repetidas, sufre pequeñas deformaciones plásticas cuya acumulación origina una deformación que crece sensiblemente igual al logaritmo del número de cargas aplicadas, por lo que se deberá hacer un estudio detallado del tráfico actual y del incremento que tendrá en el período para el cual se diseña.

Llamaremos línea de diseño a aquella que tenga el tráfico más intenso.

El período de diseño es el número de años que transcurre antes de que se necesite un recubrimiento del camino; este término no deberá ser confundido con la vida útil del pavimento.

A continuación se muestra una tabla de clasificación del tráfico:

Clase de tráfico	Densidad de tráfico máximo diario en la línea de diseño	
	Circulación diaria de automóviles y camiones ligeros	Circulación diaria de autobuses y camiones
Ligero	25	5
Medio	500	25
Pesado	ilimitado	250
Muy pesado	ilimitado	ilimitado

**INTERVENCION DE LOS DATOS DE LAS PRUEBAS
BASICAS Y PRUEBAS AUXILIARES EN EL
DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFALTI-
COS**

El segundo paso en el diseño de la estructura del pavimento asfáltico es la determinación de las características de los materiales de la subrasante, subbase y base, consistentes en identificar, con un Sistema de Clasificación a los suelos y su valor de soporte mediante ensayos de laboratorio o de campo.

Hay diferentes métodos de obtener dichas características, a partir de diferentes grupos de pruebas, entre los cuales los más comunes son:

- a.- El método basado en las clasificaciones de los suelos.
- b.- Método del valor R de resistencia de Hveem.
- c.- Método del valor soporte, más comunmente llamado método del ensayo del valor soporte.
- d.- Método del valor de soporte de California C.B.R.

El método basado en la clasificación de los suelos, es generalmente usado en el diseño de pavimentos que soportan bajas intensidades de tráfico y de cargas.

En el capítulo segundo fué descrito el método de clasificación de la AASHO el cual está basado en el comportamiento de los suelos bajo los pavimentos de carreteras.

Por lo general, el espesor estructural del pavimento aumenta -

progresivamente a medida que el grupo de suelo cambia desde A-1 hasta A-7. Después de obtener la clasificación de cada uno de los materiales que se van a usar, el espesor de la estructura se calcula directamente en la tabla de la página 57 con intervención de la intensidad del tráfico y de la carga máxima por eje.

Para diseñar el pavimento de un camino que tiene una gran intensidad de tráfico y cargas pesadas, generalmente se usa alguno de los métodos mecánicos directos para determinar la capacidad de soporte del suelo.

a. - El método de ensayo del valor de soporte consiste en determinar la capacidad de soporte del suelo por medio de placas que se presionan contra él; hay algunas variaciones entre los procedimientos usados por las distintas instituciones. El método más conocido es el especificado por la A.S.T.M., que norma la manera de medir la resistencia de cualquiera de las capas que forman la estructura del pavimento (subrasante, base, sub-base o carpeta del pavimento) por medio de una placa cargada.

La prueba de carga sobre placa no proporciona datos reales de la resistencia, a menos que el suelo se encuentre en iguales condiciones de humedad, densidad, temperatura y drenaje a las que se esperan en el camino. Estas condiciones solo pueden ser obtenidas después de algún tiempo de colocado el pavimento sobre la subrasante.

Cuando se requiere la resistencia del suelo de la subrasante en una carretera o aeropuerto nuevo, se podrá obtener realizando la prueba de carga sobre placa en la subrasante debajo de un pavimento asfáltico donde se tiene la misma clase de subrasante, - dicha subrasante deberá tener un tiempo suficiente bajo el pavimento para tener las características adecuadas del ambiente -, o realizando la prueba de carga sobre placa en una sección de prueba especialmente construída, en la cual se han obtenido las condiciones a las que estará sometido el suelo al encontrarse bajo el pavimento.

Las especificaciones para esta prueba recomiendan el uso de una placa de 30 cm. de diámetro, una deformación de 5.08 cm. y diez repeticiones de carga.

Además de esta prueba, se deberán hacer estudios de granulometría, límite líquido, límite plástico y cálculo del índice de plasticidad.

Conociendo el valor de soporte para cada uno de los materiales que se van a usar en la estructura del pavimento, la intensidad del tráfico y la carga por eje máxima, es posible determinar el espesor total del pavimento asfáltico mediante el uso de una gráfica similar a la de la página 57, después se podrá obtener el espesor de cada capa con diferentes combinaciones para escoger la solución más económica.

b.- Método del valor R de resistencia de Hveem. Este método es el más racional y se basa en dos apreciaciones diferentes; Primera; el valor R, de resistencia que determina el espesor de la estructura para impedir deformaciones plásticas del suelo sometido a las cargas de las -ruedas; y segunda, mediante un ensayo para determinar la presión de expansión del material, se obtendrá el peso de la cubierta requerido para -que sea estable, es decir, el espesor del pavimento para mantener la compactación del suelo. Este valor de diseño será función de la densidad y -del contenido de humedad de los materiales.

Conociendo el valor R de cada material que formará parte de la estructura del pavimento, además de la intensidad de tráfico y la carga por eje máxima, se podrá obtener el espesor total del pavimento, y a partir de éste, las combinaciones de espesores de las diferentes capas.

c.- Método del valor de soporte de California (C.B.R.). Este método es probablemente el más usado en el diseño de estructuras de pavimentos asfálticos.

El valor de soporte de California es una medida comparativa de la resistencia al corte de los diferentes suelos, y puede definirse como la carga requerida para introducir un pistón a una cierta profundidad dentro del suelo, expresada como un porcentaje de la carga requerida para introducir el mismo pistón a igual profundidad dentro de una muestra estándar de piedra triturada. Generalmente se usan profundidades de penetración de 0.1 ó 0.2 pulgadas, aunque si se desea se pueden usar de 0.3, 0.4 ó 0.5 pulgadas.

El valor soporte de California se usa con las curvas empíricas de intensidad de tráfico y de carga máxima por eje de la gráfica de la página No. 57 para diseñar la estructura de los pavimentos asfálticos.

A continuación se describen detalladamente las pruebas de laboratorio para especímenes compactados de materiales hinchables, no hinchables o granulares y los procedimientos para efectuar ensayos in situ y en muestra inalteradas.

Conociendo los valores de soporte de los diferentes materiales, además de las características del tráfico, es posible determinar el espesor de las diferentes capas que integran la estructura del pavimento.

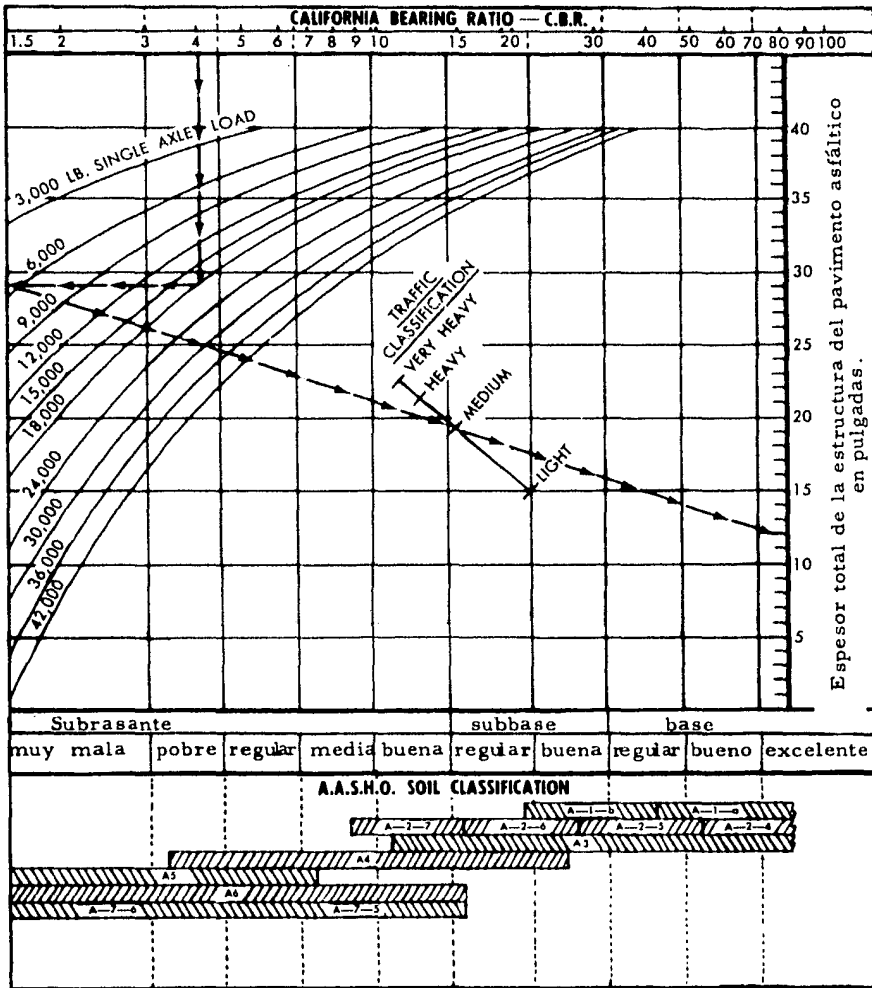


Tabla para obtener los espesores requeridos en estructuras de pavimentos asfálticos.

Generalmente se usan muestras compactadas en el laboratorio con objeto de obtener los datos necesarios para el diseño, sin embargo, - las pruebas in situ se pueden usar bajo ciertas condiciones, que prevean que las características actuales del material sean semejantes a las que tendrá después de algún tiempo de estar bajo el pavimento.

Antes de efectuar la prueba se deben hacer ensayos de granulometría, límite líquido, límite plástico, cálculo de índice de plasticidad, densidad de sólidos y peso volumétrico de campo.

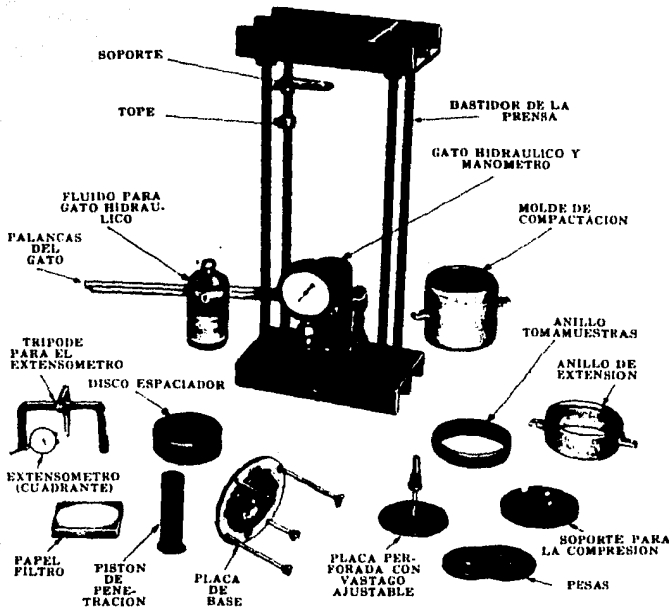
Para la obtención del límite líquido y el límite plástico se deberán observar las siguientes modificaciones especificadas: la muestra no deberá ser secada en horno ni por medio artificial antes de ser probada; la muestra deberá ser puesta en agua por 24 horas antes de ser cribada en la malla No. 40, y el material retenido deberá ser secado y después nuevamente cribado en la malla No. 40, la porción que haya pasado tanto seca como húmeda será combinada para formar la muestra que deberá ser usada en la determinación del límite líquido y el límite plástico; la muestra deberá ser secada teniendo cuidado de que no se formen terrones; el límite líquido deberá ser obtenido de un contenido de humedad -- mayor a uno menor y no se deberá añadir suelo a la muestra durante la obtención de los límites; el límite plástico deberá ser obtenido sobre una superficie de vidrio.

Determinación del valor de soporte de California en especímenes remoldeados. -

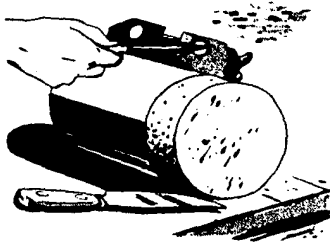
El valor de soporte de California de un suelo, varía con su compactación y su contenido de humedad al ser probado. Por lo que para tener las condiciones reales del suelo éstos factores deben ser cuidadosamente controlados al preparar la muestra.

A menos que se tenga seguridad de que el suelo no cambiará su contenido de humedad después de la construcción se deberán usar muestras saturadas.

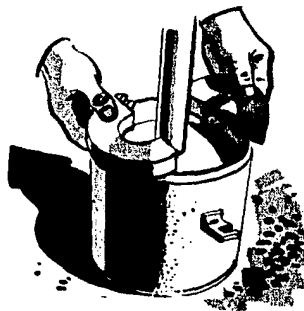
Equipo necesario: (ver dibujo en la siguiente hoja) Se requerirá un cilindro muestreador para obtención de muestras inalteradas; un molde de compactación de 6" de diámetro interior y 7" de altura, con una extensión de 2"; una base para el cilindro con perforaciones no mayores de 1/16" y una sin perforaciones; un elemento de compactación de 17.5 libras consistente en un pisón de 10 libras el cual se desliza sobre una guía de 5/8" y 18" de longitud; un disco espaciador de metal de 5 15/16" de diámetro y 2 1/2" de altura; una malla de 3/4" y una del número 4; un aparato de expansión consistente en un micrómetro con sensibilidad a 0.001" -- montado en un trípode; una pesas de 5 libras con forma anular, con un diámetro exterior de 5 7/8" y un diámetro interior de 2 1/8" divididas median



Equipo California Bearing Ratio (CBR)



Camisa de lamina para muestras inalteradas.



Pesas de sobrecarga

te un plano que pase por su eje con objeto de poder sobrecargar el suelo - durante la prueba de penetración y saturación; un pistón de penetración de 1.95 pulgadas de diámetro, o sea con una superficie de 3 pulgadas cuadradas y lo suficientemente largo para pasar por la perforación de las pesas y penetrar en el suelo; un gato hidráulico para aplicar la carga de penetración a una velocidad de 0.05 pulgadas por minuto, dicho gato deberá estar montado en un marco rígido; también se requerirán un micrómetro, un tanque de saturación y un horno de secado.

Para efectuar la prueba, el material se deja secar al aire hasta que se pueda pulverizar con un rodillo, teniendo cuidado de no romper el tamaño natural de las partículas; se toman unos 34 Kg. y se ciernen a través de la malla de 3/4", desechando el material retenido el cual deberá ser remplazado por igual peso de material similar que pase la malla de 3/4" y quede retenido en la No. 4. Tómanse unos 500 gr. de la muestra, y se secan al horno para determinar su contenido de humedad.

Pruebas de compactación.-

Esta se deberá efectuar siguiendo las normas descritas para la prueba de compactación en el capítulo segundo, con las siguientes excepciones: Se deberá usar el molde y el pistón descritos, la muestra deberá ser preparada según el párrafo anterior, debiéndose usar material nuevo para cada ensayo de compactación en lugar de pulverizar el mismo material; al agregar agua a la muestra deberá ser bien mezclada y colocada en un recipiente cerrado herméticamente por 24 horas, después de las cuales se deberá redeterminar el contenido de humedad si se observa alguna condensación en las paredes del recipiente.

Antes de colocar la muestra se sujeta el cilindro y su extensión a una base rígida, se coloca el disco separador dentro del cilindro y después un papel filtro sobre el cual irá la muestra colocada en cinco capas de una pulgada cada una.

En materiales cohesivos el contenido de humedad deberá variar de mayor a menor del óptimo. A los procedimientos descritos se podrán hacer algunas modificaciones siempre y cuando estos no afecten los resultados.

Para obtener el contenido de humedad óptimo y el peso volumétrico máximo en materiales cuyas características de compactación son bien conocidas, serán necesarios unos 4 ó 5 especímenes; se varía en un 2% en más o menos el contenido de humedad, para obtener los puntos de la gráfica peso volumétrico seco-contenido de humedad.

Compactación del espécimen para determinar el valor soporte

de California: se deberá colocar el molde de compactación sobre la base perforada, sobre la cual va el disco de separación y en la parte superior de éste el papel filtro. La compactación del material se deberá llevar a cabo observando los requerimientos de contenido de humedad y de esfuerzo de compactación (o sea el trabajo desarrollado por unidad de volumen durante la compactación, y que es igual al número de capas por el número de golpes por capa por el peso del pisón por la altura de caída entre el volumen del material compactado). Se ha encontrado que la gráfica peso volumétrico - máximo-esfuerzo de compactación, de una línea recta si unimos puntos para diferente número de golpes por capa.

Los especímenes deben ser compactados con diferentes contenidos de humedad, entre los cuales deberá quedar incluido el que será obtenido en el campo.

Todas las rasantes, bases y subbases han sido divididas en tres grupos, de acuerdo con el comportamiento de sus materiales durante un proceso de saturación: 1o.- Arenas y gravas sin cohesión; 2o.- Suelos cohesivos; y 3o.- Suelos que experimentan un gran cambio de volumen.

Han sido ideados diferentes procedimientos para preparar las muestras en el laboratorio de acuerdo con esta división, con el fin de reproducir las condiciones reales que se tendrán después de la construcción. Estos procedimientos se aplican cuando el contenido de humedad durante la construcción va a ser el óptimo o un 95% del óptimo, de especímenes compactados en el laboratorio.

1o.- Suelos de grava y arena sin cohesión.- Estos suelos, a base de una compactación adecuada, obtienen grandes pesos volumétricos, no es necesario un control muy rígido del contenido óptimo de humedad, no será necesario efectuar la prueba en muestras saturadas.

Generalmente el valor de soporte de California menor que se obtenga durante las pruebas, será usado para el diseño. Tres ensayos son suficientes en general.

2o.- Suelos cohesivos.- Estos deberán ser compactados y ensayados de modo que proporcionen datos que muestren su comportamiento igual que si se tratara de muestras inalteradas del terreno. En estos suelos, el procedimiento de compactación descrito se deberá efectuar para 55, 22 y 12 golpes por capa y cada espécimen deberá ser saturado antes de efectuar la prueba de penetración, obteniendo así una familia de curvas que relacionan el contenido de humedad, el peso volumétrico, el esfuerzo de compactación y el valor de soporte de California.

Para determinar la validez de la prueba de compactación, es conveniente trazar en una gráfica semilogarítmica la curva peso volumétrico

co máximo-esfuerzo de compactación, la cual generalmente da una línea -
recta.

El valor de soporte de California de diseño, deberá ser el correspondiente al peso volumétrico que se obtendrá en el campo; dicho valor podrá ser obtenido a partir de las gráficas.

3o.- En suelos que sufren grandes cambios de volumen al variar su contenido de humedad, las muestras se deben preparar en igual forma que para suelos cohesivos, pero se tratará de obtener el contenido de humedad y el peso volumétrico que proporcionen una expansión mínima, no necesariamente dicho contenido de humedad será el óptimo, generalmente el hinchamiento mínimo y el valor de soporte de California mayor ocurren para un contenido de humedad ligeramente mayor al óptimo.

Para probar suelos que sufren grandes cambios de volumen, es necesario hacer ensayos en un amplio rango de contenidos de humedad, para poder establecer una relación conveniente entre el contenido de humedad, el peso volumétrico, el valor de soporte de California y el cambio de volumen para un suelo dado.

El contenido de humedad, el peso volumétrico y el valor soporte, se podrán poner en una gráfica igual a como se hace en suelos cohesivos, - también se podrá poner el porcentaje de cambio de volumen con el contenido de humedad para diferentes esfuerzos de compactación. Mediante una comparación entre las gráficas se podrán obtener los límites de pesos volumétricos y contenidos de humedad más convenientes, obteniendo también los valores límites del cambio de volumen y los valores más altos de soporte de California.

Cuando se desea limitar el hinchamiento del suelo mediante alguna sobrecarga, se deberán efectuar pruebas para determinar la sobrecarga necesaria. Estas pruebas se efectuarán en especímenes preparados en igual forma que los usados para efectuar la prueba de soporte de California saturada, y las pruebas consistirán en determinar la sobrecarga necesaria para reducir el cambio de volumen a un valor admisible. El mismo resultado podrá obtenerse no permitiendo cambios de volumen a la muestra y midiendo la presión desarrollada al ser saturada.

Después de compactar cada muestra de acuerdo con las indicaciones establecidas, se quita el anillo de extensión y se quita el exceso de suelo que sobresalga del molde, con una espátula, se separa la base, se extrae el disco espaciador, y se pesa el molde con el suelo compactado para determinar el peso volumétrico del suelo. Después se invierte el molde de modo que la parte superior quede ahora colocada sobre la base, sobre la cual se ha puesto un papel filtro, se sujeta rígidamente, se coloca otro pa-

pel en la parte superior del molde y sobre él se coloca la placa de aluminio perforada y se proporciona una sobrecarga mediante las pesas de forma anular igual al peso producido por el material de la rasante del pavimento una vez terminada la estructura. Una pesa de 5 libras representa tres pulgadas de material. Para determinar el número de pesas de sobrecarga que se requieren, se estima el espesor total y se divide entre tres (operación en pulgadas). Sin embargo la sobrecarga total no debe ser menor de 10 libras o sea dos pesas. Si el peso de sobrecarga estimado variase en más de 10 libras con relación al que se debería usar en el cálculo final, el ensayo deberá repetirse usando una sobrecarga corregida.

Preparado el espécimen en esta forma, se sumerge en agua, la cual debe llegar 1/2" arriba del nivel del molde, la parte inferior deberá estar sobre bloques para permitir acceso al agua. Después de sumergir el molde, medimos la altura del perno de la placa de aluminio, el cual sobresale del nivel del agua, dicha medición se lleva a cabo mediante el uso de un micrómetro para conocer el cambio de volumen inicial. El espécimen deberá permanecer sumergido por cuatro días, manteniendo el nivel constante y tomando nuevas lecturas en el micrómetro para obtener el hinchamiento final, el cual se debe expresar como un porcentaje de la altura inicial del espécimen. Por ejemplo: Lectura a los cuatro días 2.55 cm. y la lectura inicial fué 2.31 cm.

El hinchamiento, en tanto por ciento, será:

$$2.55 - 2.31 = 0.24 \text{ cm.}$$

$$\text{hinchamiento en \%} = \frac{0.24}{\text{altura del espécimen}} \cdot 100 = \frac{0.24}{12.7} \cdot 100 = 1.89\%$$

Después de determinar el hinchamiento, se saca el molde del recipiente de saturación y se vierte el agua de la superficie teniendo cuidado de no perturbar la muestra, se quita la sobrecarga, la placa perforada y el papel filtro, dejando drenar el espécimen por 15 minutos después de los cuales se pesa para determinar su peso volumétrico y se procede a efectuar la prueba de penetración la cual es similar para todos los tipos de especímenes remoldeados, muestras inalteradas y pruebas en el lugar.

Prueba de penetración.-

Se coloca una pesa de forma anular de 5 libras, sobre la superficie de la muestra, antes de asentar el pistón. Las pesas adicionales se pueden añadir después ya que son las cortadas por la mitad con el fin de insertarlas desde lados opuestos en el pistón. Se coloca el molde sobre el marco o prensa de carga y se ajusta de modo que el pistón quede centrado con la muestra. Elévase el gato hasta que el pistón queda cargado con un

peso de 10 libras (4.5 Kg.), se coloca el indicador de presión del gato en ce ro y se ajusta el cuadrante de medición de las deformaciones de modo que su vástago se apoye en el borde del molde y se pone en cero su lectura. Aplica se una sobrecarga por medio de las pesas partidas hasta tener una carga -- igual al peso de la rasante del pavimento \pm 5 libras, pero no menor a 10 - libras, y se empieza a aplicar la carga al pistón de penetración a una veloci dad aproximada de 0.05 pulgadas por minuto, se registran las lecturas de la presión para 0.025, 0.050, 0.075, 0.10, 0.125, 0.150, 0.175, 0.20, 0.25 y 0.30 pulgadas de penetración, después se descarga el gato, se quitan las pe- sas de sobrecarga y la placa de base.

Para determinar el contenido de humedad, en ensayos de labora- torio se toma una porción de la muestra que abarque toda su altura, en ensa- yos de campo se toma de la pulgada superior del suelo.

Prueba de penetración en muestras inalteradas.-

Usada cuando se requiere tener las condiciones naturales del - terreno o para tener una relación entre la prueba realizada en el terreno y la realizada con el contenido de humedad de diseño. Para este objeto, se - tomarán dos muestras, una para ser probada con el contenido de humedad natural y otra con el contenido de humedad de diseño, para encontrar la co- rrección que se deberá hacer a los valores de soporte de California obteni- dos en el campo.

Para esta prueba se requerirá el equipo descrito anteriormente, además de una camisa de metal de 7 pulgadas de diámetro por 7 pulgadas de altura, la cual puede ser abierta a lo largo de una de sus generatrices. La obtención de muestras en suelos blandos y de granos finos, podrá hacerse - presionando el molde de compactación contra el terreno; a dicho molde se - añadirá la extensión cilíndrica y una extensión extra la cual tiene filo para poder cortar el suelo. Al ir hincado el molde se deberá ir excavando en la parte exterior de este; si alguna piedra interfiere la penetración hay que qui tarla con cuidado y reemplazarla por material fino. Cuando el molde ha si do llenado, con ayuda de un cuchillo o de una espátula se corta la parte -- inferior y se extrae el molde, quítase la extensión usada para el hincado y la extensión superior y enrásase el suelo; los dos extremos deberán ser pro tegidos con parafina o discos de madera unidos al molde con tela adhesiva. La muestra deberá ser envuelta en un paño húmedo para evitar la pérdida de humedad en su transportación al laboratorio.

En un agujero adyacente se determinará el peso volumétrico de campo y se obtendrá una muestra remoldeada para determinar el contenido de humedad.

En suelos que no pueden ser muestreados con el molde de com-

pactación, se usa la camisa metálica, para lo cual se limpia la superficie - del terreno y se marca con un círculo el permímetro de la sección de la - muestra, después se excava alrededor, dejando en el centro un cilindro de suelo con un diámetro un poco menor que el de la camisa. Se coloca ésta y se rellena el espacio entre ella y la muestra así como la parte superior con parafina y un 10% de brea, se corta la parte inferior, la cual también debe ser recubierta de parafina.

El peso volumétrico se obtiene en un agujero adyacente y, con una muestra remoldeada podrá obtenerse el contenido de humedad.

En suelos con grava, se recomienda obtener la muestra inalterada mediante el uso de una caja de madera abierta, usada en forma similar a la camisa metálica, protegiéndola con parafina y tapándola.

Preparación de las muestras inalteradas para la prueba de penetración.-

Si ésta fué obtenida con el molde de compactación, se quita la protección de parafina, se coloca el papel filtro y se sujeta la base perforada, se invierte el molde se quita la protección de parafina, se deja la superficie tersa, se pone la extensión al molde, el cual queda listo para ser saturado en igual forma que los especímenes compactados

En muestras obtenidas con la camisa metálica, se deberán aflojar los pasadores para abrirla por una de sus generatrices, separar la muestra de los lados y empujarla de modo que sobresalga una pulgada de la camisa, la cual se vuelve a cerrar; con el cuchillo quítase la parafina visible y enrásase con cuidado, hasta el borde de la camisa, aflójanse nuevamente los pernos, para bajar la muestra otra vez a su posición original, se vuelve a ajustar la camisa y la muestra está lista para ser saturada y ensayada.

Para muestras en caja de madera se deberá quitar la tapa y la parafina y enrasar la superficie con arena.

La prueba de penetración se lleva a cabo igual que en las muestras compactadas.

Prueba de penetración in situ.-

Esta prueba es satisfactoriamente usada para determinar la capacidad de carga de un suelo dado, básicamente la prueba de penetración es la misma a la descrita anteriormente.

La prueba de penetración in situ deberá usarse cuando se tiene

un contenido de agua en el terreno de 80% o más, cuando se tiene un material de granos gruesos sin cohesión, por lo que no es afectado por cambios en su contenido de humedad, o cuando se tienen materiales en los que los cambios esperados en el contenido de humedad son casi nulos.

Se deberán efectuar tres pruebas de penetración en cada nivel ensayado de la base o la subrasante, si los resultados de las tres pruebas dan valores diferentes se deberán hacer otras tres pruebas. Una diferencia razonable entre las tres pruebas podrá ser de 3 cuando se tiene un valor soporte menor de diez, cuando el valor soporte está entre diez y treinta, se admite una diferencia de cinco, y una de diez si el valor soporte está entre treinta y sesenta, arriba de sesenta las variaciones no tienen importancia.

El valor soporte de California final, será un promedio de las tres mediciones.

Para llevar a cabo la prueba in situ se requerirá un implemento para aplicar la carga, un camión que proporcione la carga requerida, un pistón de penetración de 1.95 pulgadas de diámetro y seis pulgadas de longitud, un micrómetro con soporte en forma de anillo, pesas en forma anular, una placa de acero de diez pulgadas de diámetro, diez libras de peso y una perforación central de $2\frac{1}{32}$ pulgadas de diámetro, y una viga de acero de 2 metros o más de longitud.

Ya elegido el lugar de la prueba, en el cual no debe haber piedras mayores de tres cuartos de pulgada, se nivela una zona circular de unos 30 cm. de diámetro, se coloca el camión sobre el lugar de la prueba, el gato de carga, las pesas de la sobrecarga que sean necesarias y se efectúa la prueba de penetración igual que en especímenes compactados, en un agujero a unos 15 cm. del lugar donde se efectúa la penetración, se determina el peso volumétrico y se toma una muestra alterada para determinar el contenido de humedad.

Para cualquiera de los métodos descritos, después de efectuar la prueba de penetración se transforma la carga total a libras por pulgada cuadrada y se traza una curva esfuerzo-deformación, para así obtener las cargas de penetración de la prueba. Si se obtiene una curva uniforme, el valor de soporte se calcula para 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración con las cargas correspondientes. Si la curva tiene alguna concavidad hacia arriba, se traza una tangente en el punto de mayor pendiente y se prolonga hasta cortar el nivel del origen, para obtener un origen corregido a partir del cual se obtendrán las cargas corregidas para 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración, (ver ejemplo en el último capítulo).

El valor soporte de California se define como la relación entre

la carga corregida necesaria para obtener una penetración de 0.1 ó 0.2 pulgadas y la carga de penetración estándar para esas mismas penetraciones - que es de 1000 y 1500 libras por pulgada cuadrada respectivamente, para grava triturada, cada relación deberá ser multiplicada por 100 para obtener el valor soporte en tanto por ciento.

La carga de penetración estándar fué obtenida en un suelo de material bien graduado procedente de piedra triturada.

Penetración en pulgadas	Carga estándar en libras por pulgada cuadrada.
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

$$\text{Valor soporte} = 100 \frac{R}{K}$$

R es la carga en libras por pulgada cuadrada aplicada al pistón para obtener 0.1 pulgadas de penetración.

K es la carga unitaria estándar en libras por pulgada cuadrada

Conociendo el valor de soporte para la subrasante, así como la clasificación del tránsito y la carga máxima por eje que el pavimento va a soportar, es posible determinar el espesor total requerido para llenar estas condiciones, mediante el uso de la tabla de la página 57.

Otra manera de utilizar el valor de soporte de California, sin necesidad de usar la tabla, es mediante el uso de la siguiente fórmula de origen empírico:

$$T = \left[-4.25 + 2.75 \log W_{18} \right] \left(\frac{2.5}{\text{valor soporte de California}} \right)^{0.4}$$

T es el espesor total del pavimento

W_{18} es la suma de las cargas equivalentes a una de 18,000 libras por eje.

También se tiene la siguiente ecuación empírica para determinar los espesores de las diferentes capas:

$$T = D_1 + D_2^1 + 0.5 D_2 + 0.375 D_3$$

Donde:

D_1 = superficie asfáltica en pulgadas.

D_2^1 = base asfáltica en pulgadas.

D_2 = base granular en pulgadas.

D_3 = subbase granular en pulgadas.

La base podrá tener un agregado con tamaño máximo igual a la mitad de su espesor, además de cumplir con los siguientes requisitos:

Prueba	Tráfico ligero	Tráfico medio y pesado
Valor de soporte de California mínimo	80	100
Límite líquido máximo	25	25
Índice de plasticidad máximo	6	3

Los materiales para la subbase deberán tener un tamaño máximo de un medio el espesor de la capa y cumplir con los siguientes requisitos:

Pruebas	Requerimiento
Valor soporte de California mínimo	20
Límite líquido máximo	25
Índice de plasticidad máximo	6

Se llama relación de sustitución al equivalente de espesor de las diferentes capas al espesor de una pulgada de carpeta asfáltica. Por ejemplo: dos pulgadas de base granular de buena calidad equivalen a una pulgada de carpeta asfáltica, se dice entonces que es una relación de sustitución de 2:1.

2.7 pulgadas de subbase equivalen a una pulgada de carpeta asfáltica o sea una relación de 2.7:1.

1.35 pulgadas de subbase sustituyen 1 pulgada de base granular o sea una sustitución de 1.35:1.

Usando estas relaciones y teniendo cuidado de respetar los espesores mínimos requeridos, se podrán hacer diferentes combinaciones con objeto de escoger la más económica.

Crítica al método C.B.R.

En este método es sumamente difícil apreciar las condiciones que se tendrán en el suelo bajo el camino después de la construcción por lo que se tienen dificultades al elegir el contenido de humedad de compactación y un valor C. B. R. correcto.

Un segundo hecho interesante es que en las observaciones llevadas a cabo por la WASHO en pistas de ensayo se ha visto que para un mismo suelo y bajo un mismo tráfico, dos o más estructuras de pavimentos de diferentes espesores pueden dar el mismo resultado.

Un tercer hecho que obra en contra de este método es que si se compacta una muestra en condiciones óptimas para un determinado contenido de humedad y una energía de compactación se puede obtener un C.B.R. del orden de 25 y al hacer el ensayo sobre el campo donde el contenido de humedad no es exactamente igual y si se tiene una energía de compactación un poco insuficiente se podrán obtener valores del C.B.R. de 4, 5 ó 6, por lo que es muy peligroso fiarse en un solo ensayo C.B.R. y para un solo contenido de humedad.

Debido a la dificultad de elegir un valor de soporte C.B.R. correcto se corre el riesgo de que ingenieros sin práctica usen valores completamente erróneos, con funestas consecuencias.

Problemas similares presentan los demás métodos basados en la determinación de algún valor de soporte.

DETERMINACION DE LOS METODOS DE MEZCLA

PRUEBAS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS

La carpeta asfáltica está formada por un material granular el cual es cubierto y adherido por medio de un material bituminoso.

Las funciones principales de esta carpeta son:

- a) Proporcionar una impermeabilidad superficial para impedir que el agua de lluvia penetre en la estructura.
- b) Asegurar la amortización de los efectos dinámicos (golpes y vibraciones.)
- c) Asegurar la amortización, y transmisión de esfuerzos tangenciales a la base.
- d) Asegurar la transmisión de los efectos de cargas estáticas a las capas inferiores.

Las mezclas que se emplean en los pavimentos - asfálticos están constituidas por materiales granulares sólidos y materiales bituminosos que sirven de liga; estos dos constituyentes se revuelven en proporciones adecuadas para producir un pavimento con agregados de graduación adecuada y un contenido de asfalto necesario para proporcionar las siguientes características:

a. - La cantidad de asfalto deberá ser suficiente para cubrir completamente las partículas del agregado, impermeabilizarlas y adherir unas a otras con objeto de obtener un pavimento durable.

b. - La mezcla deberá proporcionar un material suficientemente estable para cumplir con los requisitos del camino, sin que éste se distorsione o desplace.

c. - La mezcla, después de ser compactada, deberá tener un determinado volumen de vacíos el cual permitirá la expansión del asfalto y la compactación posterior originada por las cargas del tráfico.

d. - La mezcla deberá ser manejable para permitir una colocación eficiente y económica.

Los agregados minerales generalmente constituyen el 90% ó más de la mezcla asfáltica por lo que sus características tienen una gran influencia en el comportamiento del pavimento. Los agregados más usados son: gravas, arenas, mineral de escoria y material mineral proveniente de roca triturada.

Antes de efectuar el diseño de la mezcla, es necesario conocer las características de los materiales mediante una serie de pruebas para determinar su granulometría, su densidad, su propensión al descascarado y su resistencia a la abrasión y al intemperismo, también se deberá poner atención a la forma, absorción y porosidad de las partículas y a su afinidad con el material bituminoso. Una mezcla con partículas de forma esférica y lisa necesitará un menor contenido de asfalto que una mezcla con partículas de forma irregular; una mezcla con material poroso requerirá un porcentaje mayor de asfalto, pero dará como resultado una mejor unión entre las partículas; la experiencia ha demostrado que un material poroso con una absorción de agua del 0.75% al 1.00% de su peso es conveniente.

Propensión al descascarado. -

Algunos agregados son susceptibles a descascararse trayendo como consecuencia una falta de liga con el material bituminoso, este fenómeno es conocido con el nombre de descascarado; los materiales que presentan una alta tendencia al descascarado no deberán ser usados en mezclas asfálticas.

Para conocer la propensión al descascarado de un determinado agregado, deberá ser sometido a las pruebas correspondientes de descascarado, hinchamiento e inmersión-compresión.

La prueba al descascarado consiste en mezclar el agregado con

el material bituminoso, y colocar la mezcla en agua durante 24 horas, después de las cuales se extrae se observa y se agita vigorosamente, se inspecciona visualmente para ver si se ha descascarado.

La prueba de hinchamiento, se efectúa midiendo el aumento de volumen que sufre el material compactado dentro de una probeta después de un período de inmersión de 24 horas, un hinchamiento mayor de 1.5% indica que el material es susceptible al descascarado.

La prueba de inmersión compresión consiste en determinar el esfuerzo de rotura a la compresión en una muestra compactada y saturada y compararlo con el esfuerzo de rotura a la compresión de una muestra igual seca; si el esfuerzo de rotura a la compresión en la muestra saturada es menor, el material está propenso al descascarado.

Para determinar la durabilidad del material granular, deberá ser sometido a una prueba de abrasión, una de las cuales es la de Los Angeles, consistente en colocar una muestra del agregado de peso y graduación especificada que sea retenido por la malla No. 12 en un cilindro de fierro fundido, en el cual existe una carga abrasiva formada por esferas de hierro colado o de acero; dicho cilindro se hace girar en posición horizontal a una velocidad de treinta revoluciones por minuto hasta completar 500 revoluciones, después de las cuales se saca la muestra y se criba en la malla No. 12, el peso del material que pasa expresado como porcentaje del peso original de la muestra se conoce como porcentaje de desgaste y deberá ser menor del 50%.

Los materiales granulares de la carpeta están bajo la acción de cargas estáticas que lo pueden apachurrar y la acción de choques y vibraciones transmitidas por las cargas rodantes que originan un frotamiento debido a los microdesplazamientos por eso, materiales con un desgaste mayor del 50% deberán ser rechazados.

Una mezcla con un porcentaje de betún mayor al requerido es una mezcla poco estable que da lugar a una carpeta aceitosa la cual produce una superficie resbalosa, sobre todo cuando está húmeda.

Un porcentaje de betún menor al requerido da como resultado una mezcla sin liga, por lo cual aparecen rápidamente agujeros en la superficie del pavimento.

La determinación del porcentaje de betún que proporcione una mezcla estable y con durabilidad adecuada, para una granulometría correcta del agregado se logra por medio de los métodos de diseño de la mezcla.

Los métodos de diseño, para mezclas en caliente, más amplia-

mente usados son: el de Hveem, el de Hubbard-Field, el de Duriez y el de Marshall. En cada uno de estos métodos se han desarrollado criterios que correlacionan los resultados de los ensayos de laboratorio con el comportamiento del pavimento bajo la acción del tránsito.

a.- El método de Hveem es aplicable a mezclas densas y que contienen agregados con tamaño máximo de 2.5 cm. Este método es aplicable tanto para el diseño de laboratorio como para el control de la pavimentación que se está obteniendo en el campo. Para las pruebas se utilizan especímenes de mezclas de 2.5 pulgadas de alto y 4 pulgadas de diámetro.

En este método se determina el contenido óptimo de asfalto a partir del ensayo del equivalente de Kerosén, los ensayos del estabilómetro y el cohesiómetro, la prueba de entumecimiento y el análisis de la relación peso volumétrico-volumen de vacíos.

En el ensayo del estabilómetro de Hveem se utiliza un molde especial para pruebas triaxiales, en el cual se mide la resistencia al desplazamiento lateral del espécimen cargado verticalmente y mediante la prueba de entumecimiento se mide la resistencia de la mezcla a la acción del agua.

Se deben efectuar una serie de pruebas con diferentes contenidos de asfalto con el objeto de obtener una mezcla que llene los requisitos del proyecto a partir de la representación de una serie de curvas que muestren la relación entre el contenido de asfalto y el peso volumétrico, el volumen de vacíos, la estabilidad y la cohesión.

b - El método de Hubbard-Field para diseño de mezclas asfálticas, fué desarrollado inicialmente para mezclas con agregados finos. Más tarde se modificó para proyectar mezclas con una cantidad apreciable de agregados de granos gruesos. Sin embargo, para mezclas con granos gruesos se da preferencia al método de Hveem o al Marshall, dejando su prioridad al método de Hubbard-Field para el diseño de mezclas asfálticas con agregados de granos finos.

Este método se basa principalmente en el análisis del volumen de vacíos y estabilidad de la mezcla, sin embargo se deberán trazar también las curvas que relacionan el contenido de asfalto con el peso volumétrico y con el volumen de vacíos de los agregados, para poder escoger la mezcla más conveniente para el proyecto.

c.- Método de M. Duriez (Ing. del laboratorio central de Puentes y Caminos de Francia).- Este método consiste en calcular la dosificación del material de liga en función de la superficie específica del agrega-

do, para esto se ve la cantidad de agregado correspondiente a cada uno de los siguientes grupos: granos gruesos, medianos y finos, arenas gruesas y finas y material de relleno.

De acuerdo con la proporción de agregado correspondiente a cada uno de estos grupos se puede calcular la superficie específica.

M. Duriez estableció la siguiente fórmula para la proporción - requerida de material de liga:

$$P = \frac{5}{K V - \text{Superficie específica}}$$

K es el módulo de riqueza que es función de la importancia del camino y la magnitud del tráfico y varía de 3.5 a 4.

En este método se lleva a cabo un ensayo de inmersión compresión que es el oficial en Francia para mezclas densas, dicho ensayo es parecido al método de inmersión compresión propuesto por la A. S. T. M. diferente solamente en la forma de los especímenes; en el sistema de compactación, en las condiciones de conservación de los especímenes y en la velocidad de aplicación de la carga.

En este método se usan especímenes de 1 Kg., con forma cilíndrica de 8 cm. de diámetro y por lo tanto una altura aproximada de 9 cm., dichos especímenes son compactados en un molde por medio de una presión estática de 120 Kg/cm².

La mitad de los especímenes son conservados por 7 días en la atmósfera ambiente y un día antes del ensayo se colocan en un recipiente de 18°C. La aplicación de la carga debe ser a una velocidad constante de 1 mm/seg. y se mide la resistencia al aplastamiento, se saca el promedio de los valores obtenidos en los especímenes probados y se registra como un valor R.

La otra mitad de los especímenes se coloca en una campana de vacío con agua y se les aplica un vacío equivalente a 40 mm. de mercurio lo cual hace que el agua penetre en los poros de los especímenes, después de lo cual son extraídos de la campana y colocados durante 8 días en un recipiente con agua a 18°C y finalmente se les aplica una carga en iguales condiciones a la aplicada a la primera mitad de los especímenes y se registra el valor de la resistencia promedio como R₁.

La relación R₁/R deberá ser siempre mayor de 0.70

Los resultados obtenidos dependen de:

a) La compactación del espécimen, que siempre es menor a la que se obtiene en el campo.

b) El volumen de vacíos del espécimen en el momento de ser introducido en el agua.

c) La humedad de la atmósfera que influirá en el valor de R.

— d. - El método de Marshall es usado generalmente en mezclas con agregados de tamaño máximo hasta de una pulgada y puede ser usado tanto en investigaciones de laboratorio como en el control de campo.

Este método es ampliamente conocido actualmente y ha sido estandarizado por la sociedad americana de pruebas de materiales A.S.T.M.

Antes de empezar a elaborar los especímenes necesarios para las pruebas del método Marshall será necesario verificar lo siguiente:

1. - Si los materiales propuestos cumplen con los requisitos especificados.

2. - Si las combinaciones de los diferentes agregados disponibles cumplen con las condiciones requeridas de granulometría.

3. - El peso volumétrico y el volumen de vacíos de los agregados y la densidad del betún.

Para llevar a cabo las pruebas por el método Marshall, se requerirán especímenes cilíndricos de 2 1/2" de altura por 4" de diámetro, los cuales deberán ser preparados bajo ciertas condiciones de mezclado y compactación, dichos especímenes serán usados básicamente para determinar la relación entre el peso volumétrico y el volumen de vacíos, la estabilidad y el flujo con el contenido de asfalto.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto de una mezcla, con un agregado de granulometría determinada, por el método de Marshall, se deberán preparar una serie de especímenes con diferentes contenidos de asfalto para poder trazar las curvas que relacionan el contenido de asfalto con las características de resistencia, el volumen de vacíos y el peso volumétrico y así poder obtener un contenido de asfalto óptimo, correcto.

El contenido de asfalto debe irse incrementando en los diferentes especímenes en 1/2% y por lo menos dos especímenes deberán tener un contenido de asfalto mayor al óptimo y dos uno menor.

Para obtener datos representativos, se requerirá efectuar las pruebas por triplicado, o sea, en tres especímenes para cada contenido de

asfalto. Por lo que, para el estudio de diseño de una mezcla en caliente en la que se harán ensayos para siete diferentes contenidos de asfalto, se requerirán 21 especímenes; para cada espécimen se requieren aproximadamente 1200 gr. de agregados, o sea que para una serie de pruebas para una granulometría dada, se requerirá una cantidad mínima de 26 Kg. de agregados y 4 litros de asfalto.

Para preparar los especímenes se requerirá: un recipiente de fondo plano para calentar los agregados, unos recipientes metálicos de base circular para mezclar los agregados y el asfalto, un horno para calentar los agregados y el asfalto, un termómetro con graduación hasta 232°C ó más, - una báscula con capacidad para 5 Kg. y sensibilidad a 1 gr. para pesar los agregados y el asfalto, una báscula con capacidad de 2 Kg. y sensibilidad a 0.1 gr. para pesar los especímenes compactados, para mezclar los agregados con el asfalto se podrá usar un mezclador automático o una cuchara, - un molde de compactación de 4 pulgadas de diámetro interior y 3 pulgadas de altura, un anillo de extensión del molde de compactación, un pisón de compactación con una superficie de compactación de 3 7/8" de diámetro sobre la cual se encuentra la guía por la cual cae el peso de 10 libras desde una altura de 18 pulgadas, un pedestal de madera seca para la compactación que deberá tener un peso unitario entre 670 Kg/m³ y 770 Kg. /m³ y de 8 pulgadas por 8 pulgadas por 8 pulgadas, también se requerirá un recipiente para poder dar un baño de marías al molde de compactación y un gato especial para poder extraer la muestra del molde.

Antes de efectuar la prueba se deberán secar los agregados a una temperatura entre 105°C y 110°C hasta obtener un peso constante, entonces deberán ser separados en los tamaños requeridos por medio de un cribado en seco. Se recomienda separar los agregados en las mallas de 1" a 3/4", de 3/4" a 3/8", de 3/8" a la No. 4, de la No. 4 a la No. 8 y finalmente los que pasen la No. 8.

Después del cribado deberá ser determinada la temperatura de mezcla y compactación, se recomienda que éstas temperaturas sean las necesarias para producir viscosidades de 1.7 ± 0.2 Poises y de 2.9 ± 0.3 Poises, respectivamente.

Antes de colocar el espécimen dentro del molde de compactación, dicho molde deberá ser calentado a una temperatura entre 90°C y 150°C mediante un baño de agua hirviendo o sobre una placa caliente.

Para preparar las mezclas se deberán pesar separadamente las cantidades de agregados de diferentes tamaños para cada espécimen; para producir un espécimen compactado de 2.5 pulgadas \pm 0.05 pulgadas de altura, aproximadamente se requieren 1200 gr.; en caso de que la altura del espécimen sea diferente a la especificada, la cantidad de agregados podrá -

ser ajustada de la siguiente forma:

$$\text{Peso ajustado del agregado} = \frac{2.5 \times \text{Peso del agregado}}{\text{altura obtenida en el espécimen}}$$

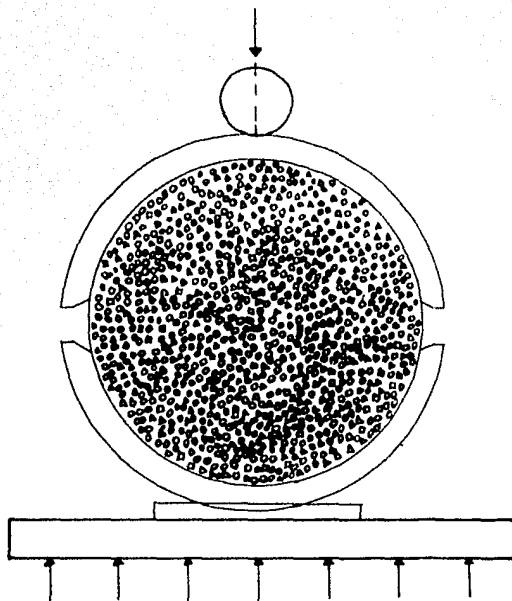
Después de determinar el peso correcto se colocarán las muestras en el horno o en la placa caliente para elevar su temperatura unos 10°C arriba de la temperatura de mezcla, y se depositan en el recipiente de mezcla dejando un crater en el centro para poner el asfalto caliente, en este momento, el asfalto y los agregados deberán tener la temperatura requerida para ser mezclados hasta obtener un material uniforme.

Se coloca toda la mezcla dentro del molde de compactación y se hace penetrar una espátula 15 veces sobre el perímetro y 10 sobre el centro, se quita la extensión del molde de compactación y se alisa la superficie, se eleva la temperatura de mezcla a la de compactación, nuevamente se coloca la extensión y se pone todo el molde sobre el pedestal de madera, se dan 35, 50 ó 75 golpes de pisón dependiendo de la densidad de tráfico de diseño, se quita la extensión y la placa inferior del molde se invierte éste, y se repite la operación de compactación con el mismo número de golpes en la nueva cara; se quita la base del molde y se deja enfriar al aire hasta que sea posible extraer el espécimen por medio del gato sin que se deforme, se coloca en una superficie tersa hasta que sea probado, lo cual generalmente se hace hasta el día siguiente.

Cada espécimen deberá ser sujeto a las siguientes pruebas y en el orden indicado:

- 1.- Determinación de la densidad de sólidos.
- 2.- Prueba de estabilidad y flujo.
- 3.- Determinación del peso volumétrico y del volumen de vacíos.

Para llevar a cabo la prueba de estabilidad y flujo, se requerirá una máquina para aplicar la carga al espécimen, mediante dos apoyos semicirculares (como los de la figura) dicha carga será aplicada a una velocidad constante de 2 pulgadas por minuto. Dicha máquina deberá estar equipada con un medidor de carga, un medidor de flujo y un implemento que registrará la carga máxima aplicada.



También se requerirá un recipiente con una profundidad mínima de 15 cm., en el cual se pueda colocar el espécimen a 5 cm. del fondo mediante una red, y un termostato para poder mantener una temperatura constante de $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

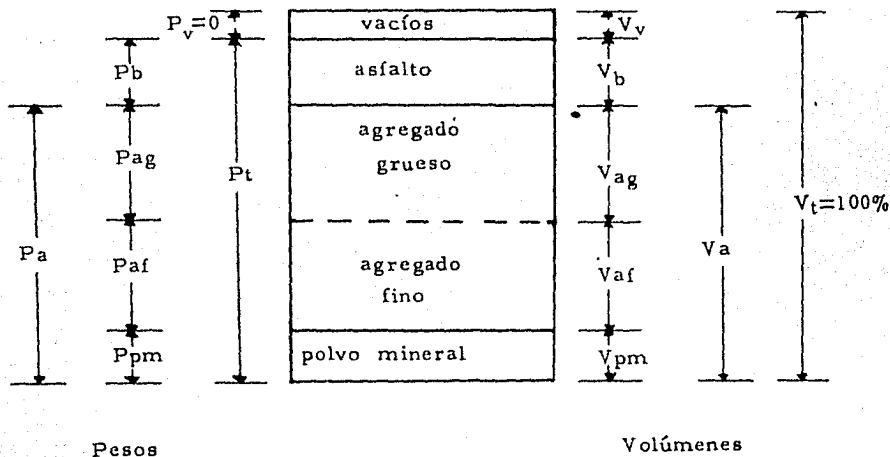
1.- La determinación de la densidad de sólidos se podrá llevar a cabo en cuanto el espécimen obtenga la temperatura ambiente.

La densidad de sólidos se determina a partir de la relación del peso al volumen. El volumen del espécimen puede ser calculado por alguno de los tres siguientes métodos.

Aunque el método A es el único reconocido como estándar, los métodos B y C son más rápidos, y en especímenes densos y con una super-

ficie lisa dan resultados bastante confiables. En caso de duda acerca del método a usar se deberá elegir el A.

La siguiente representación gráfica de una idea bastante clara de la relación entre los pesos y los volúmenes de la mezcla.



Método A.- Usado en especímenes recubiertos con parafina:

$$G = \frac{P_t}{V_t} = \frac{P_t}{P' - P'_w - \left(\frac{P' - P_t}{G_p}\right)}$$

Donde:

G = Densidad de sólidos del espécimen.

V_t = Volumen del espécimen (cm^3)

P' = Peso del espécimen revestido, pesado en el aire (gr)

P'_w = Peso del espécimen revestido, pesado en el agua (gr)

P_t = Peso del espécimen en el aire (gr)

G_p = Densidad de sólidos de la parafina.

Método B. - Aplicable a especímenes sin recubrir.

P_w = Peso del espécimen en el agua (gr)

$$G = \frac{P_t - P_w}{V_t - \frac{P_t - P_w}{G_p}}$$

Método C. - Especímenes sin recubrir pero con una superficie lisa y con medidas regulares.

d = Diámetro del espécimen en cm.

h = Altura del espécimen en cm.

$$G = \frac{P_t - P_w}{V_t - \frac{\pi d^2 h}{4}}$$

2.- Medición de la estabilidad y el flujo.

Mediante el auxilio de un cilindro metálico de iguales dimensiones a las del espécimen, colocamos los indicadores de carga y los de deformaciones en cero.

El espécimen debe ser sumergido en agua a $60^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ durante 30 ó 40 minutos antes de la prueba.

La temperatura de los semicírculos de aplicación de carga deberá ser mantenida entre 20°C y 40°C durante la aplicación de la carga, esto se puede lograr fácilmente mediante baños de agua caliente.

Con todo listo, se extrae el espécimen del agua caliente, se seca su superficie cuidadosamente y se coloca entre los semicírculos de carga; se aplica ésta a una velocidad de deformación constante de 2 pulgadas por minuto hasta que ocurra la falla. La carga máxima, expresada en libras, deberá ser registrada como el valor de estabilidad Marshall.

En el momento en que la carga empieza a decrecer, se deberá medir la deformación y, expresada en 1/100 de pulgada, será el valor del flujo Marshall. Por ejemplo, si el espécimen se deforma 0.21 pulgadas el

valor del flujo Marshall será 21.

Las pruebas de flujo y estabilidad deberán ser efectuadas en un lapso no mayor de 30 segundos a partir del momento en que el espécimen es extraído del agua.

El valor de la estabilidad, obtenido en especímenes de 4 pulgadas de diámetro que no tienen un espesor exacto de 2.5 pulgadas, deberá ser transformado a un valor equivalente para la medida estándar de 2.5 pulgadas, mediante los factores de conversión de la siguiente tabla:

Espesor aproximado del espécimen en pulgadas.	Volumen del espécimen en cm^3	Factor de conversión.
2 1/16	421 - 431	1.39
2 1/4	457 - 470	1.19
2 3/8	483 - 495	1.09
2 7/16	496 - 508	1.04
2 1/2	509 - 522	1.00
2 9/16	523 - 535	0.96
2 5/8	536 - 546	0.93
2 3/4	560 - 573	0.86
2 15/16	599 - 610	0.78

3.- Determinación del peso volumétrico y del volumen de vacíos.

Después de efectuar las pruebas de estabilidad y flujo se deberán determinar el peso volumétrico y el volumen de vacíos para cada serie de especímenes a partir del promedio de las densidades de sólidos encontradas en cada grupo de muestras con igual contenido de asfalto.

El peso volumétrico para cada contenido de asfalto se puede obtener directamente a partir de la densidad de sólidos promedio, y se puede ya trazar la curva contenido de asfalto-pesos volumétricos uniendo los valores correspondientes.

Para poder calcular el volumen de vacíos de la mezcla y el volumen de vacíos de los agregados, es necesario conocer la cantidad de asfalto que es absorbida por los agregados, para lo cual se tiene que calcular la densidad de sólidos de los agregados del espécimen y la densidad de sólidos teórica máxima de la mezcla.

La densidad de sólidos de los agregados del espécimen será igual al promedio de la densidad de sólidos de los diferentes componentes del agre

gado.

$$G = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_1/G_1 + P_2/G_2 + P_3/G_3}$$

G es la densidad de sólidos del agregado del espécimen.

G_1, G_2, G_3 son las densidades de sólidos del agregado grueso, del agregado fino y del mineral de relleno, respectivamente.

P_1, P_2, P_3 son los porcentajes en peso del agregado grueso, del agregado fino y del mineral de relleno, respectivamente.

La densidad de sólidos máxima teórica de una mezcla asfáltica es la densidad de sólidos de la mezcla suponiendo que tiene un volumen de vacíos igual a cero:

$$G_m = P_t / V_m$$

G_m = densidad de sólidos teórica máxima.

V_m = volumen de la muestra sin vacíos.

P_t = Peso de la muestra.

El cálculo de la cantidad de asfalto absorbido por los agregados secos se basa en la densidad de sólidos máxima teórica de la mezcla y el porcentaje del peso de la muestra correspondiente a los agregados y al asfalto. Primero se debe calcular la densidad de sólidos de los agregados en la mezcla, suponiendo que el asfalto está solamente recubriendo las partículas minerales y no ha sido absorbido por éstas.

$$G_{as} = \frac{P_a}{V_m - \frac{P_b}{G_b}}$$

G_{as} = densidad de sólidos supuesta de los agregados.

P_a = Peso de los agregados en la muestra.

V_m = Volumen de la muestra sin vacíos.

P_b = Peso del contenido de asfalto de la muestra.

G_b = Densidad de sólidos del asfalto.

G_a = Densidad de sólidos de los agregados.

La cantidad de asfalto absorbida por los agregados será:

$$A_a = 100 \frac{G_{as} - G_a}{G_{as} \times G_a}$$

A_a esta dado en porcentaje del peso de los agregados secos.

El volumen de vacíos de la mezcla compactada será la suma de los vacíos entre los agregados cubiertos por el asfalto, expresado como porcentaje del volumen total del espécimen y es igual a la suma del volumen de asfalto efectivo y el volumen de los agregados, restado del volumen total del espécimen.

$$V_v = 100 - G_p \quad \text{ó}$$

$$V_v = 100 \frac{G_m - G}{G_m}$$

V_v = Volumen de vacíos.

G_p = Densidad de sólidos del espécimen en por ciento de la densidad de sólidos máxima teórica del espécimen.

G_m = Densidad de sólidos teórica máxima del espécimen.

G = Densidad de sólidos del espécimen.

El volumen de vacíos de los agregados es el volumen entre las partículas minerales de una mezcla compactada, expresado como porcentaje del volumen, total del espécimen.

$$V_{va} = V_b + V_v$$

V_{va} = Volumen de vacíos de los agregados de la muestra.

V_b = Volumen del contenido de asfalto efectivo expresado como porcentaje del volumen total del espécimen.

$V_v =$ Volumen de vacíos del espécimen expresado como porcentaje del volumen total del espécimen.

Se recomienda que la densidad de sólidos máxima teórica sea calculada por duplicado o sea para dos contenidos de asfalto que estén cerca del contenido óptimo y se saca un promedio para ser usado en el cálculo del volumen de vacíos del espécimen y del volumen de vacíos de los agregados del espécimen.

Con objeto de escoger el contenido de asfalto óptimo para la mezcla, para cada contenido de asfalto se deberá sacar un promedio del valor de la estabilidad y del flujo desechando los valores que muestren un error evidente y se deberán trazar las curvas que relacionen:

Estabilidad	-	Contenido de asfalto
Flujo	-	Contenido de asfalto
Peso volumétrico	-	Contenido de asfalto
Volumen de vacíos de la mezcla	-	Contenido de asfalto
Volumen de vacíos de los agregados	-	Contenido de asfalto

En pavimentos con una graduación densa se ha encontrado que el valor de la estabilidad crece con el contenido de asfalto hasta un máximo después del cual decrece; el valor del flujo siempre crece al aumentar el contenido de asfalto; la curva que relaciona el peso volumétrico con el contenido de asfalto tiene una forma similar a la que relaciona la estabilidad y el contenido de asfalto; y el volumen de vacíos de los agregados decrece a un mínimo y después aumenta al incrementarse el contenido de asfalto.

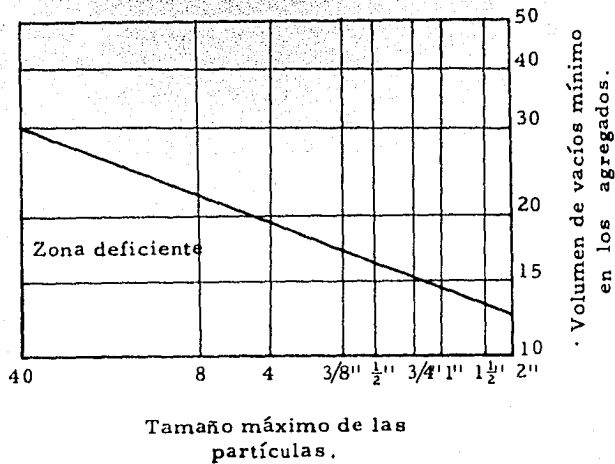
El contenido de asfalto óptimo de la mezcla se determina a partir de las gráficas anteriores, teniendo en cuenta la estabilidad máxima, el peso volumétrico máximo y el volumen de vacíos mínimo y teniendo presentes los requisitos del pavimento y la economía del proyecto.

Mezclas con un valor muy grande para la estabilidad y un valor pequeño para el flujo deberán ser evitadas ya que dan origen a pavimentos sumamente rígidos los cuales se parten fácilmente, especialmente si la rasante y la subrasante permiten deformaciones de la carpeta.

La siguiente tabla muestra los valores límites recomendables para el diseño de las mezclas asfálticas.

Tipo de Tráfico	Pesado	Medio	Ligero
No. de golpes de compactación del espécimen.	75	50	35
Prueba	Min.-Max.	Min.-Max.	Min.-Max.
Estabilidad Lbs.	750	500	500
Flujo Pulgadas X 100	8 - 16	8 - 18	8 - 20
Porcentaje de vacíos de la mezcla.	3 - 5	3 - 5	3 - 5
Mezcla a base de arena.	5 - 8	5 - 8	5 - 8
Base o carpeta intermedia entre la base y la carpeta asfáltica.	3 - 8	3 - 8	3 - 8

figura: Volumen de vacíos en los agregados: de acuerdo con la siguiente



CONSIDERACIONES ECONOMICAS EN LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS

Frecuentemente la selección final de la estructura de un pavimento está regida por las consideraciones económicas.

Sin embargo dicha selección se debe llevar a cabo entre los diseños alternativos comparando las apreciaciones económicas pero tomando en cuenta también la disponibilidad de los diferentes tipos de materiales, de personal especializado y las condiciones de clima y tipo de tráfico que se tendrán.

Generalmente el diseño que se puede realizar a menor precio es el elegido.

Para el análisis económico será necesario hacer una estimación del valor de los materiales y de los procedimientos de construcción. Esto frecuentemente puede ser obtenido a partir de contratos anteriores para diseños similares, y de magnitudes y en zonas comparables.

Un método frecuentemente usado para un primer análisis de costos consiste en obtener el "costo total por metro cuadrado" de cada una de las alternativas. Este sistema es usado cuando se estima solamente el costo de la estructura del pavimento y las demás obras de arte no son considerados.

Para llevar a cabo la elección de una de las alternativas basándonos entre otros datos en el "costo total por metro cuadrado" es recomendable hacer uso de la siguiente tabla:

Costo por m² de pavimento

Proyecto: _____

Ingeniero: _____ Fecha: _____

Alternativa No. _____ Estación No. _____ a Estación No. _____

Capa	Identificación del material	Costo por m ² y por cm de espesor	Espesor total en cm.	Costo total por m ²
Superficie asfáltica.				
base				
Subbase				
Total:				

Un segundo método también usado con frecuencia para un primer análisis de costos consiste en estimar el "costo total por metro lineal de pavimento" para cada una de las diferentes alternativas.

Este método es preferido al anterior cuando los márgenes del camino y algunas otras obras necesarias son un factor importante.

Una tabla de la siguiente forma es de utilidad para la elección de la alternativa adecuada.

Costo por metro lineal de pavimento

Proyecto: _____

Ingeniero: _____

Fecha: _____

Alternativa No. _____

Estación No. _____

a Estación No. _____

Componente	Identificación del material	Metros cuadrados por metro lineal	Costo por m ² por 1 cm de profundidad	Costo por m. lineal por espesor en cms.	Espesor	Costo total por metro lineal
A) Zona de tráfico						
1) Superficie asfáltica						
2) Base						
3) Subbase						
B) Margenes de la Carretera						
1) Superficie asfáltica.						
2) Base						
3) Tratamiento superficie						
C) Obras de Arte:						
Tipo y descripción: _____				Total		
Comentarios: _____						

Para un análisis económico más completo se recomienda analizar los costos respecto al tiempo, o sea la determinación del costo anual - promedio en el período de diseño.

En este análisis se consideran todos los factores relacionados con el costo de la carretera, incluyendo el derecho de vía, cortes y terraplenes, estructuras, pavimentos, mantenimientos, costos de operación e intereses de la inversión.

Existen dos métodos para llevar a cabo el análisis económico. - El primero incluye todos los costos pertenecientes a la carretera. El segundo analiza solamente los costos pertenecientes a las zonas de circulación, a las margenes del camino y a algunas obras de drenaje y es utilizado para comparar económicamente las diferentes alternativas para la elección de la estructura del pavimento para un camino específico.

Factores que intervienen en la determinación del costo anual por kilómetro de carretera.

A.- Costo de construcción (por Km.)

Este costo debe incluir el derecho de vía y el costo de la construcción en el cual deben ser separados el costo de la estructura del pavimento, el costo de margenes del camino y otros gastos de construcción.

B.- Costo de mantenimiento (por Km.)

En este costo se deberán separar; el correspondiente a la línea de circulación, a las margenes del camino y a otros mantenimientos.

C.- Costo de operación (por Km.)

Este costo incluye los gastos de señales de tránsito, pintura de rayas, etc.

D.- Administración y gastos generales fijos (por Km.)

En estos costos se incluyen generalmente las investigaciones de campo y los diseños en gabinete.

E.- Costo de recubrimiento (por Km.)

Este costo es obtenido a partir de experiencias anteriores, (se recomienda considerar recubrimientos a cada 20 años).

F. - Amortización (por Km.)

Este costo dependerá del período de amortización considerado.

G. - Intereses.

Intereses de la inversión, generalmente se consideran intereses variando del 6% al 12% anual.

H. - Costo anual del pavimento de la zona de circulación (por Km.)

Para la elección de la alternativa más apropiada solo se deberán - considerar el costo de la construcción inicial y el costo de mantenimiento, ya - que los demás costos son iguales para las diferentes alternativas.

Determinación del costo anual de un camino. -

Existen dos fórmulas propuestas por el Sr. Baldock: La primera incluye todos los costos de construcción, mantenimiento, operación y administración y se usa para determinar el costo total anual:

$$C = F_n \left[A + E_1 P_{n1} + E_2 P_{n1} - \left(1 - \frac{Y}{X}\right) (E_1 \text{ ó } E_2) P_n \right] + M + O + D$$

Donde:

C = Costo total anual por kilómetro de camino.

F = Factor de recuperación de capital = $\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$

P = $\frac{I}{(1+r)^{n1}}$

r = Interés (del 6% al 12%)

n = Período de diseño (un período correcto son 40 años, dependiendo del tipo de camino.)

n₁ = Número de años después de la construcción para ejecutar un trabajo de recubrimiento.
n₁ tendrá diferentes valores en el mismo análisis dependiendo de si es usada con E₁ ó E₂

A = Costo total de derecho de vía y construcción por Km.

E₁ = Costo del primer recubrimiento por Km.

E₂ = Costo del segundo recubrimiento por Km.

- Y = Número de años entre el último recubrimiento y el término del período de diseño.
- x = Estimación de la vida útil en años, del último recubrimiento.
- M = Costo del mantenimiento anual total por Km.
- O = Costo anual de operación por Km.
- D = Costo de Administración y gastos generales fijos por Km.

La segunda fórmula incluye solamente los costos necesarios para poder elegir entre las diferentes alternativas para la estructura del pavimento asfáltico, y nos proporciona el costo anual por kilómetro de la zona de circulación del camino.

$$C_1 = F_n \left[A_1 + E_1 P_{n1} + E_2 P_{n1} - \left(1 - \frac{Y}{x}\right) (E_1 \text{ ó } E_2) P_n \right] + M_1$$

- C_1 = Costo anual por Km. de la zona de circulación.
- A_1 = Costo de construcción de la zona de circulación por Km.
- M_1 = Costo anual de mantenimiento de la zona de circulación por Km.

EJEMPLO GENERAL

APLICACION

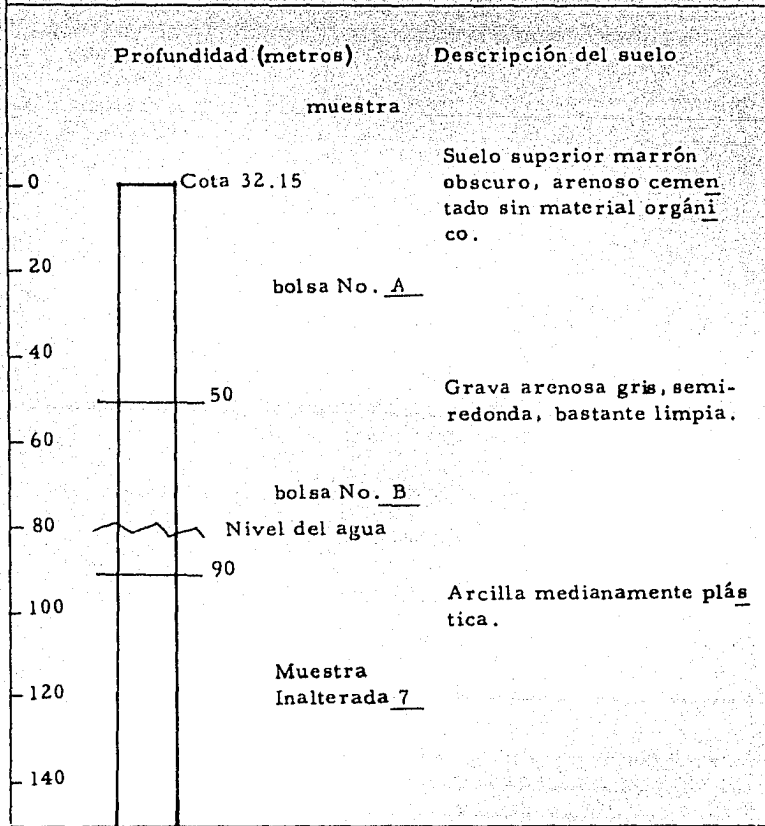
Se planteó la necesidad de construir un tramo de 25 Km. de camino, sobre un terreno plano en el cual por razones prácticas y económicas se decidió emplear solamente materiales disponibles en el lugar.

Después de localizar el camino y los depósitos de material -- accesibles en las fotografías aéreas se procedió a investigar el subsuelo -- mediante sondeos con barrenos a cada 150 metros y llevados a 1.5 m. de profundidad los cuales mostraron que se trataba de un subsuelo con un perfil bastante regular.

Se obtuvieron muestras representativas de los diferentes estratos, las cuales analizadas en el laboratorio comprobaron la uniformidad de las características de los materiales de los diferentes estratos a lo largo del camino.

A continuación se muestra el tipo de registro que se obtuvo en los diferentes sondeos:

Proyecto No. _____ Operador: _____
 Localización: _____ Fecha: _____
 Perforación No. _____



Pruebas de laboratorio efectuadas a las muestras representativas del material de la subrasante:-

1.- Análisis granulométrico.- Todo el material pasa la malla No. 8 por lo que se requerirá una muestra representativa mayor de 100 gr. para efectuar la prueba de cribado.

Después de tener la muestra en el horno a 110°C ésta pesó 163 gr., se lavó y nuevamente se pesó obteniendo ahora 158 gr., la diferencia de 5 gr. deberá ser aumentada al material que pase la malla No. 200; el cual será analizado por el método del hidrómetro, este análisis no es necesario para trabajos de caminos.

Análisis granulométrico		Cribado		
Peso de la muestra original	<u>163 gr.</u>	Muestra No.	_____	
Peso de la muestra lavada	<u>158 gr.</u>	Operador	_____	
Pérdida por lavado	<u>5 gr.</u>	Fecha	_____	
Malla	Abertura en mm	Peso retenido (gr)	Peso que pasa (gr)	Porcentaje -
No. 4	4.75	0	163	100
No. 10	2.00	75	88	54
No. 40	0.42	33	55	33.7
No. 60	0.25	0		
No. 100	0.149	20	35	21.4
No. 200	0.074	15	20	12.3
Material que pasa la malla No. 200		<u>15 gr.</u>		
Pérdida por lavado		<u>5 gr.</u>		
Total que pasa la malla No. 200		<u>20 gr.</u>		
TOTAL 163 gr.				

Peso volumétrico de las partículas finas. -

Para poder determinar la granulometría de las partículas que pasan la malla No. 200 se requirió determinar su peso volumétrico:

Peso de la muestra secada al horno 162 gr.

Peso del picnómetro lleno de agua a una temperatura T_x
308.3 gr.

Peso del picnómetro lleno con el suelo y agua a una temperatura T_x
403.2 gr.

T_x es la temperatura en grados centígrados del contenido del picnómetro al momento de hacer la lectura del peso con agua y suelo.

Peso volumétrico del suelo a una temperatura T_x = $\frac{162}{162 + (403.2 - 308.3)}$ = 2.40

Análisis granulométrico del material que pasa la malla No. 200. -

Dos minutos después de dejar la probeta graduada en reposo se coloca el hidrómetro y se hace la primera lectura (R), la cual fué igual a 23, correspondiente a una temperatura del material en suspensión de 21°C.

Obtención del porcentaje de material dispersado que aún permanece en suspensión:

$$P = \frac{R \times a}{W} \times 100$$

Para una densidad de sólidos del suelo de 2.65 la constante "a" vale 1, para el suelo con densidad de sólidos de 2.40 "a" valdrá:

$$a = \frac{2.65 - 1}{2.65} \times \frac{G}{G-1}$$

$$a = \frac{1.65}{2.65} \times \frac{2.40}{1.40} = 1.07$$

W es el peso en gramos del suelo originalmente dispersado menos la humedad higroscópica.

Peso del suelo secado al aire 23 gr.

Peso del suelo secado al horno 20 gr.

$$\text{Porcentaje de humedad higroscópica:} = \frac{23 - 20}{20} \cdot 100 = 15\%$$

Corrección del peso del material pesado al aire, por humedad higroscópica:

$$\frac{100}{100 + 15} = 0.87$$

$$W = 23 \times 0.87 = 20 \text{ gr.}$$

$$P = \frac{18.3 - 1.07}{20} \cdot 100 = 98\%$$

El diámetro máximo de las partículas que aún permanecen en suspensión, en milímetros será:

$$d = \sqrt{\frac{30 nL}{980 (G - G_1) t}}$$

n es el coeficiente de viscosidad del medio de suspensión en poises y varía con los cambios de temperatura del medio de suspensión que en este caso es agua. Para agua a 20°C n vale 0.01005, para 21°C valdrá $0.01005 \times 0.98 = 0.00985$

L es la distancia de sedimentación de las partículas, para la probeta usada es de 17.5 cm.

G es la densidad de sólidos de las partículas de suelo.

G_1 densidad del medio de suspensión, aproximadamente igual a (1) para agua.

t es el período de sedimentación en minutos.

Para la primera lectura o sea a los dos minutos de sedimentación se tiene:

$$d = \sqrt{\frac{30 \times 0.00985 \times 17.5}{980 (2.40 - 1.00) 2}} = 0.0425 \text{ mm.}$$

Cantidad de material que pasa la malla No. 200 secado al horno: 20 gr.
 Densidad de sólidos de las partículas 2.40

Operador: _____

Hidrómetro No. _____

Fecha: _____

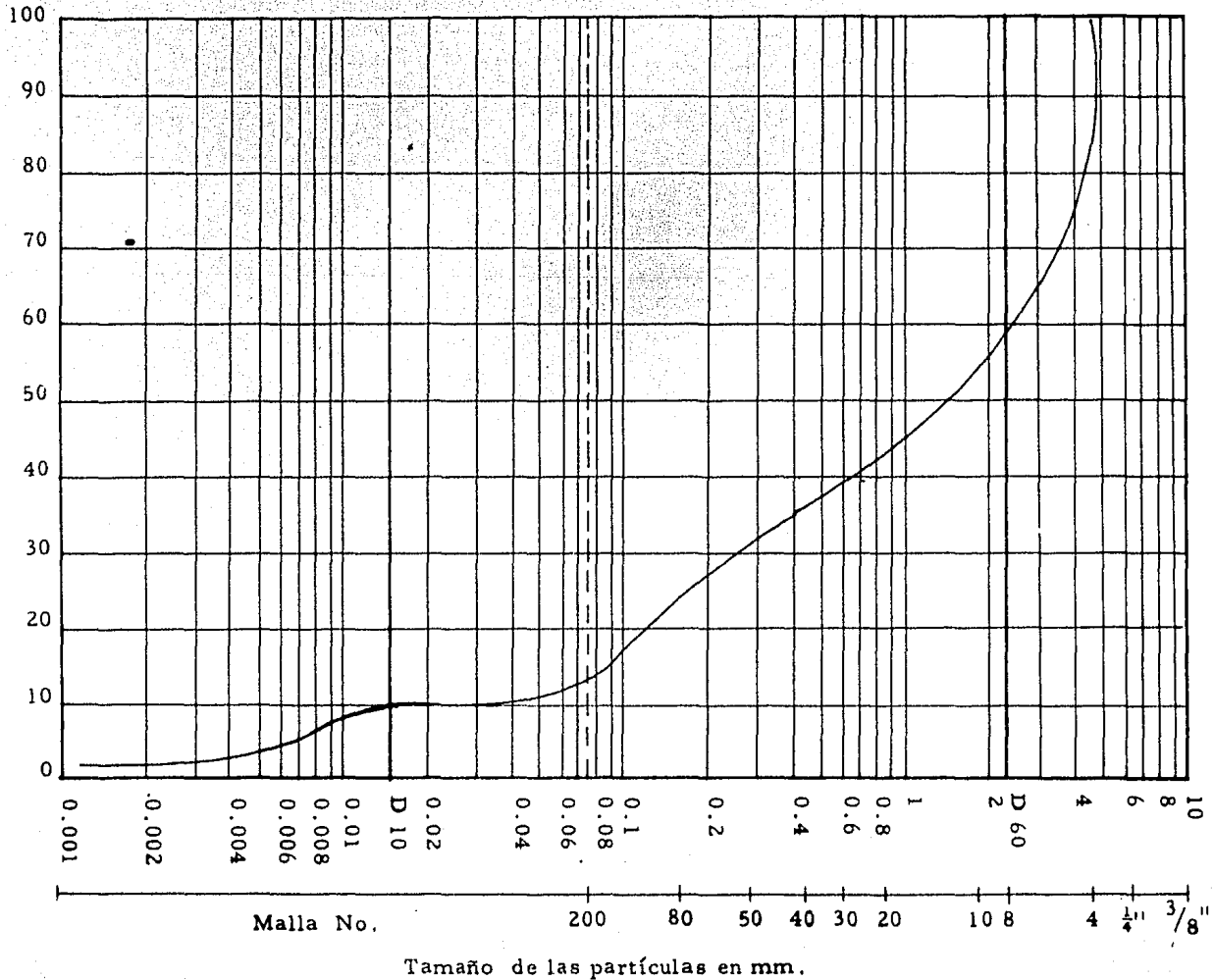
Muestra No. _____

Intervalos entre lecturas en minutos	Lectura hidrómetro.	Temperatura. °C	Corrección por defloculante y temperatura.	Lectura hidrómetro corregida	% de mat. en suspensión.	% de mat. del total.	Diam en mm.
2	23	21	-4.7	18.3	98	12	0.0425
5	20	21	-4.7	15.3	83	10.2	0.0192
15	17	21	-4.7	12.3	66	8.1	0.0112
30	14	21	-4.7	9.3	49.6	6.1	0.0079
60	11	21	-4.7	6.3	33.7	4.1	0.0056
250	9	21	-4.7	4.3	23	2.7	0.0027
1440	7	21	-4.7	2.3	12.3	1.5	0.0011

Coefficiente de uniformidad, de la gráfica semilogarítmica tenemos:

$$C_u = \frac{d_{60\%}}{d_{10\%}} = \frac{2.2}{0.014} = 157$$

Porcentaje de partículas que pasan.



Determinación del Límite Líquido, del Límite Plástico y Cálculo del Índice de Plasticidad

Muestra No. _____

Operador: _____

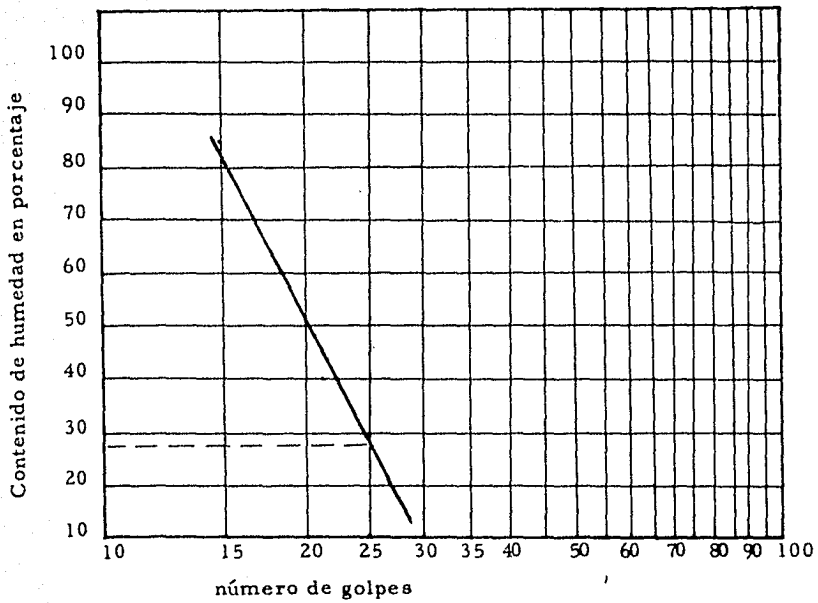
Fecha: _____

LÍMITE LÍQUIDO

LÍMITE PLÁSTICO

Cápsula de vidrio No.	Cápsula y muestra húmeda gr	Cápsula y muestra seca gr	Cápsula vidrio gr	Peso del agua gr	Peso del suelo seco gr	% de agua	No. de golpes	Cápsula de vidrio No.	Cápsula y muestra húmeda gr	Cápsula y muestra seca gr	Peso cápsula gr	Peso agua gr	Peso suelo seco gr	% de agua
F-17	26.501	24.81	12.737	1.69	12.074	14	29	F-11	23.199	21.389	13.069	1.81	8.32	21.7
F-16	21.302	19.002	13.241	2.30	5.761	40	21	F-4	21.378	20.108	13.178	1.27	6.93	18.3
F-8	22.040	18.500	13.058	3.54	5.442	65	17					Lim. Plástico	20.4	
F-29	27.961	21.221	13.288	6.74	7.933	85	15							

I. P. L.L. - L.P.



Límite Plástico = 20.4

Límite Líquido = 26.4

Indice de Plasticidad = $26.4 - 20.4 = 6.0$

Clasificación del suelo:

Con los datos obtenidos ya se puede clasificar el suelo bajo las normas AASHO.

Granulometría: Material que pasa la malla No. 10 ----- 54%

Material que pasa la malla No. 40 ----- 33.7%

Material que pasa la malla No. 200 ----- 12.3%

Límite Líquido ----- 26.4

Indice de Plasticidad -- 6

De las gráficas de la página 46 vemos que el índice de grupo correspondiente a un material con una cantidad menor del 15% que pase la malla No. 200 es cero.

Y entrando de izquierda a derecho en la tabla de clasificación de la AASHO (página 45) encontramos que el suelo corresponde al grupo A-1-b o sea un material consistente predominantemente de arena bien graduada con pocos finos.

Este suelo es recomendable para subrasantes y puede usarse ventajosamente en subbases.

Análisis de tráfico.-

El pavimento se diseñará para un período de diseño de 20 años - durante los cuales se considera que el tráfico actual se incrementará en un 200 %.

Mediante una estación de aforo se determinó el tráfico diario medio inicial el cual está constituido por la circulación de 2,985 automóviles cada 24 horas distribuidos igualmente en las dos direcciones con un 2% de camiones pesados.

No. de camiones pesados en la línea de diseño cada 24 horas:

$$\frac{2,985 \times 3 \times 0.02}{2} = 90$$

No. de automóviles en la línea de diseño cada 24 horas:

$$\frac{2,985 (3 - 3 \times 0.02)}{2} = 4,380$$

De acuerdo con la tabla de la página 53 vemos que se trata de un tráfico pesado.

El camión más pesado que circulara por el camino es el equivalente a una carga de diseño H-20 o sea una carga máxima por eje de 14,500 Kg. (32,000 Lbs.).

**Determinación de las características de soporte de la sub-
rastante a partir de la prueba de penetración en especímenes compacta-
dos en el laboratorio, siguiendo el método descrito para obtención del
valor soporte de California.**

Ya que se trata de un suelo no cohesivo que se compacta fa-
cilmente bajo el peso del tráfico hasta alcanzar su peso volumétrico -
máximo, el valor soporte de California se determinará mediante la prue-
ba de penetración en especímenes compactados con el contenido de hume-
dad óptimo, el cual se calcula mediante el método de compactación des-
crito en el capítulo I. Debido a la intensidad del tráfico y a la magni-
tud de las cargas se darán 60 golpes de pisón en cada una de las capas del
espécimen.

Ensayo de compactación para determinar el contenido óptimo de humedad.										
Operador: _____			No. de capas <u>5</u>							
Fecha: _____			No. de golpes por capa <u>60</u>							
Muestra No. _____			Altura de caída <u>18"</u>							
			Peso del pisón <u>10 Lbs.</u>							
Espécimen	1	2	3	4	5					
Muestra húmeda y molde gr	9,473	9,692	10,043	10,163	9,838					
Molde compactación gr	3,583	3,583	3,583	3,583	3,583					
Muestra húmeda gr	5,890	6,109	6,460	6,580	6,255					
Peso volumétrico húmedo gr/cm ³	2.541	2.644	2.792	2.843	2.702					
Determinación del Peso Volumétrico del suelo seco.										
recipiente No.	27F	32F	29F	30E	32E	31F	29E	25F	31F	24E
Muestra húmeda y recip. gr	41.83	42.14	41.88	40.38	38.25	40.82	41.73	41.75	43.13	42.63
Muestra seca y recipiente gr	41.36	41.61	41.23	39.80	37.67	40.06	40.89	40.90	42.03	41.56
Peso agua gr	0.47	0.53	0.65	0.58	0.58	0.76	0.84	0.85	1.10	1.07
Peso recipiente gr.	31.25	32.40	30.93	30.89	30.45	31.05	31.67	31.99	32.02	32.00
Muestra seca gr	10.11	9.21	10.30	8.91	7.22	9.01	9.22	8.91	10.01	9.56
Contenido de humedad %	4.7	5.7	6.3	6.5	8.0	8.4	9.1	9.5	11.0	11.2
Contenido de humedad promedio %	5.1	6.4	8.2	9.3	11.1					
Peso volumétrico seco gr/cm ³	2.417	2.485	2.582	2.601	2.432					

Para elaborar la tabla anterior se tomó en cuenta que: el volumen interior del molde de compactación es de $2,310 \text{ cm}^3$.

Si: γ_s es el peso volumétrico seco.

γ_w es el peso volumétrico húmedo.

W es el contenido de humedad en decimales se tiene:

$$\gamma_w = \frac{\text{Peso de la muestra húmeda en (gr)}}{2,310 \text{ cm}^3}$$

$$\gamma_{w1} = \frac{5890}{2310} = 2.541$$

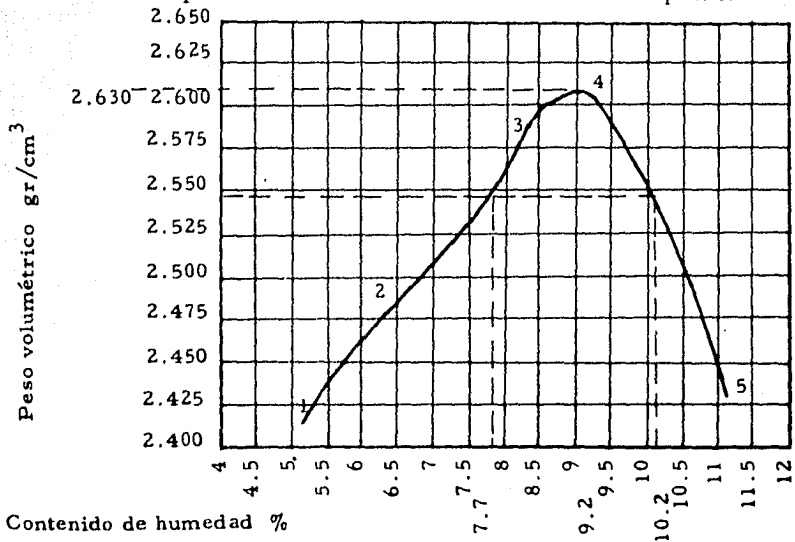
$$\gamma_w = \gamma_s \times W + \gamma_s$$

$$\therefore \gamma_s = \frac{\gamma_w}{W+1}$$

Para el espécimen No. 1 se tiene:

$$\gamma_s = \frac{2.541}{1.051+1} = 2.417$$

Gráfica para obtención del contenido de humedad óptimo:



Peso volumétrico máximo 2.630 gr/cm^3 que corresponde al contenido de humedad óptimo de 9.2%.

Se permitirá en el campo un peso volumétrico máximo del 95% del peso volumétrico correspondiente al contenido de humedad óptimo o sea:

$$2.630 \times 0.95 = 2.498 \text{ gr/cm}^3$$

Este rango de variación permitido para el peso volumétrico, - marcado en la gráfica nos muestra los límites para el contenido de humedad: 7.7 % a 10.2 %.

Para determinar el valor soporte de California se compactan - tres muestras con el contenido de humedad óptimo y sobre los especímenes compactados se coloca el número de pesas necesario para tener una sobrecarga similar al peso que ejercerá la estructura del pavimento a la subrasante, el peso aproximado de la rasante se puede obtener a partir de un diseño inicial a partir de la clasificación del material, la intensidad del tráfico y la carga máxima por eje, con estos datos entramos en la tabla de la página 57 y vemos que para el suelo A-1-b, una intensidad de tráfico pesada y una carga máxima por eje de 14,500 Kg. (32,000 Lbs) correspondiente al camión de diseño H-20 corresponde un espesor de 7 pulgadas, sabiendo que para cada 3 pulgadas (7.62 cm) corresponde una pesa de 5 libras -- (2.27 Kg) se deberán colocar 3 pesas.

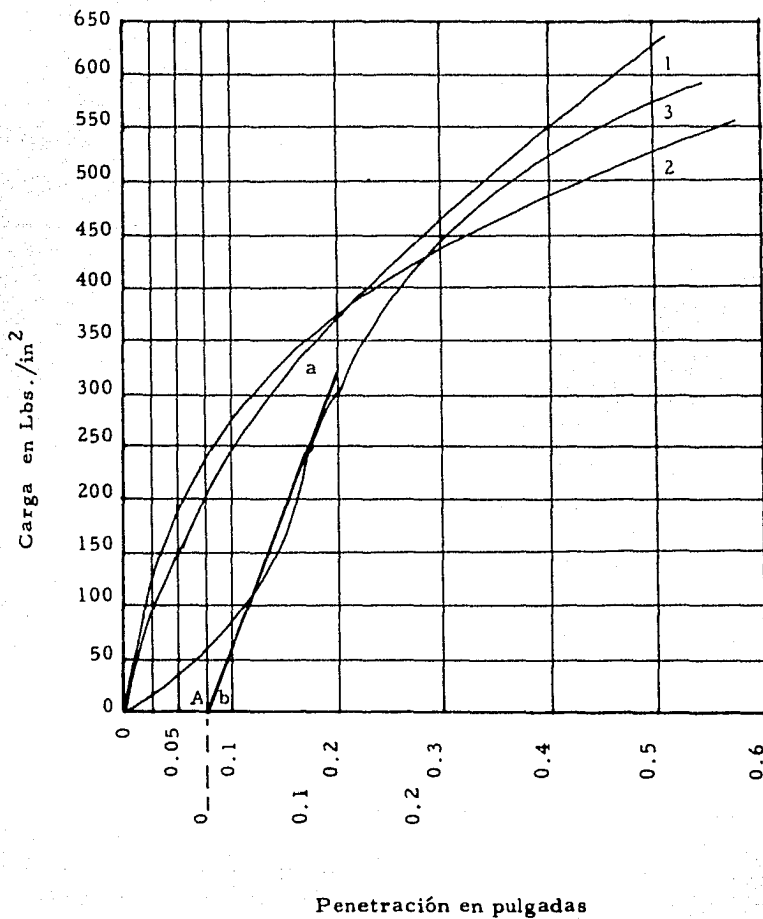
A continuación se muestra una tabla con los datos de compactación de los especímenes para la prueba de penetración:

Muestra No. _____	Operador: _____					
Tipo de suelo: <u>ARENOSO</u>	Fecha: _____					
Sobrecarga: <u>3 pesas de 2.27 Kg.</u>	Para un contenido de humedad óptimo de <u>9.20%</u>					
Determinación del contenido de humedad y del Peso Volumétrico de las muestras del ensayo.						
Molde No.	1		2		3	
No. de Capas	5		5		5	
No. de golpes por capa.	60		60		60	
Tipo de muestra	Compactada con el contenido de humedad óptimo					
Molde y muestra húmeda gr	10,143		10,213		10,271	
Peso molde gr	3,583		3,583		3,583	
Muestra húmeda gr	6,560		6,630		6,688	
Volumen muestra cm ³	2,310		2,310		2,310	
Peso volumétrico húmedo gr/cm ³	2.827		2.862		2.886	
Contenido de humedad de la muestra	parte superior	parte inferior	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
Vidrio reloj No.	F-29	F-8	F-16	F-17	F-11	F-4
Vidrio y muestra húmeda gr.	55.208	51.418	48.741	56.687	53.869	53.928
Vidrio y muestra seca gr	51.808	48.218	45.741	52.887	50.269	50.328
Peso agua gr	3.4	3.2	3.0	3.8	3.6	3.6
Peso vidrio gr	13.288	13.058	13.241	12.737	13.069	13.178
Muestra seca gr	38.52	35.16	32.50	40.15	37.20	37.15
Contenido de humedad %	8.7	9.1	9.3	9.5	9.7	9.8
Contenido de humedad % promedio	8.9		9.4		9.7	
Peso volumétrico seco gr/cm ³	2.596		2.616		2.629	

Prueba de penetración en los especímenes compactados y corrección de las cargas de penetración de acuerdo con la gráfica de la siguiente página.

PRUEBA DE PENETRACION													
Penetración en Pulgadas	Cargas estándar. lbs/in ²	Molde 1				Molde 2				Molde 3			
		carga		corrección lb/in ²	valor de so- porte %	carga		corrección lb/in ²	valor de so- porte %	carga		corrección lb/in ²	valor de so- porte %
		lbs.	lbs in ²			lbs	lbs in ²			lbs	lbs in ²		
0.025		276	92			378	126			45	15		
0.050		468	156			588	196			93	31		
0.075		636	212			720	240			168	56		
0.100	1,000	756	253		25.3	834	278		27.8	276	92	240	24
0.200	1,500	1140	380		25.3	1122	374		24.9	900	300	406	27.1
0.300	1,900	1401	467			1686	450			1326	442		
0.400	2,300	1680	560			1488	496			1593	531		
0.500	2,600	1866	622			1572	524			1740	580		

Trazando las curvas que relacionan la carga de penetración en lbs/in^2 y la penetración en pulgadas para cada espécimen, nos daremos cuenta si se requiere corregir los valores de las cargas correspondientes a las penetraciones de 0.1 pulgadas y 0.2 pulgadas.



Los valores de carga correspondientes a las penetraciones de 0.1 y 0.2 pulgadas en el espécimen número 3 requieren ser corregidos para lo - cual se traza la línea "ab" que es tangente en el punto de máxima pendiente, - y que nos señala el punto A como nuevo origen del cual se partirá para obtener las nuevas cargas correspondientes a las penetraciones de 0.1 a 0.2 pulgadas.

Los valores de soporte de California serán iguales al esfuerzo de penetración obtenido entre el esfuerzo de penetración estándar y por cien.

Los valores obtenidos en la prueba efectuada al espécimen No. 3 no deberán ser tomados en cuenta ya que el valor obtenido para la penetración de 0.2 pulgadas es mayor que el obtenido para 0.1 pulgadas.

El valor final de soporte de California será:

Penetraciones	0.1 pulgadas	0.2 pulgadas
Molde No. 1	$\frac{253}{1000} 100 = 25.3$	$\frac{380}{1500} 100 = 25.3$
Molde No. 2	$\frac{278}{1000} 100 = 27.8$	$\frac{374}{1500} 100 = 24.9$
Valor soporte de California.		25.1

Valores límites recomendables para subrasantes, comparados con los valores obtenidos:

Valor soporte de California	8% mínimo	25.1
Límite Líquido	35 Máximo	26.4
Indice Plástico	10 Máximo	6.0

El espesor mínimo permitido para la carpeta asfáltica de un camino con un tráfico pesado es de 2 pulgadas.

En la tabla de la página 57 vemos que el espesor correspondiente a un valor de soporte de 25.1, a una carga máxima por eje de 32,000 Lbs. y un tráfico pesado es de 6.3 pulgadas.

En la gráfica también podemos ver que el valor de soporte obtenido está comprendido dentro del rango de valores correspondientes al tipo de suelo A-1-b. En el rango de variación para el tipo de suelo se deberá escoger uno mediante un estudio de los datos obtenidos en el laboratorio, considerando también el clima en el lugar, con tendencia a tomar el valor inferior en climas húmedos y el superior en climas áridos.

Materiales para la base y la subbase:

Se tomaron muestras representativas de los bancos de agregados accesibles y fueron probadas en el laboratorio obteniendo los siguientes resultados:

Densidad de sólidos	1.57
Absorción en agua	1.44 %

Material no plástico:

Determinación del porcentaje de desgaste:

Peso del material antes de someterlo a la prueba de abrasión: 3220 gr.

Peso del material que pasó la malla No. 12 después de la prueba de abrasión: 950 gr.

$$100 \times 950/3220 = 30\%$$

Requisitos de granulometría para los agregados usados en bases:

Malla	Porcentajes que pasan								
	A	B	B-1	C	C-1	D	D-1	E	E-1
3 Pulgadas	100								
2 Pulgadas		100	100						
1 1/2 Pulgadas			70-100	100	100				
1 Pulgada			55-85		70-100	100	100		
3/4 Pulgada			50-80		60-90		70-100	100	100
3/8 Pulgada			40-70		45-75		50-80		
Malla No. 4	15-45	20-50	30-60	25-55	30-60	30-60	35-65	35-65	45-80
Malla No. 10			20-50		20-50		25-50		30-60
Malla No. 40			10-30		10-30		15-30		20-35
Malla No. 200	0-10	0-10	5-15	0-10	5-15	0-10	5-15	0-10	5-15

Mediante un análisis granulométrico de los materiales de los diferentes depósitos accesibles se vió que se tienen dos tipos de agregados con diferentes granulometrías, los cuales deberán ser mezclados en determinadas proporciones para obtener una granulometría que cumpla con los requisitos de la tabla anterior.

En la siguiente tabla se muestran las granulometrías de los agregados disponibles y la granulometría requerida:

Malla	1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
Agregado A	100	70	65	38	20	5	1
Agregado B	100	100	80	65	40	30	15
Granulometría requerida C-1	70-100	60-90	45-75	30-60	20-50	10-30	5-15

Obtención de los porcentajes de cada material para obtener la granulometría deseada:

$$X = 100 \frac{R - A_{gp}}{A_{fp} - A_{gp}}$$

X es el porcentaje de agregado fino (B) necesario para obtener la cantidad requerida de material que pase la malla dada.

R es el porcentaje total requerido de material que pase la malla dada.

A_{fp} porcentaje de agregado fino (B) que pasa la malla dada.

A_{gp} porcentaje de agregado grueso (A) que pasa la malla dada.

Para la malla No. 200 tenemos:

$$X = \frac{8 - 1}{15 - 1} 100 = 50$$

Malla	1"	3/4"	3/8"	1/4"	No. 10	No. 40	No. 200
Agregado A 50%	50	35	32	19	10	2.5	0.5
Agregado B 50%	50	50	40	32	20	15	7.5
Total	100	85	72	51	30	17.5	8
Requerido	100	85	70	50	30	20	10
Especificado.	70-100	60-90	45-75	30-60	20-50	10-30	5-15

Por lo que se utilizará el 50% de material de cada depósito.

En la subbase se usará el 100% de material A.

Determinación de los espesores de las diferentes capas de la estructura asfáltica:

Teniendo en cuenta las relaciones de sustitución recomendadas de:

2 pulgadas de base granular por 1 pulgada de carpeta asfáltica, 2.7 pulgadas de subbase granular por 1 pulgada de carpeta asfáltica y 1.35 pulgadas de subbase granular por 1 pulgada de base granular, y teniendo presente el costo de los diferentes materiales así como el costo de colocación y compactación se deberán hacer diferentes combinaciones con objeto de elegir la más conveniente.

En nuestro problema se había requerido un espesor mínimo de 6.3 pulgadas.

El espesor mínimo permisible para la carpeta asfáltica de un camino con un tráfico pesado es de 2 pulgadas, si se colocan 5 pulgadas de base se requerirá una subbase de:

$$2 + 5/2 + x/2.7 = 6.3 \quad \text{pulgadas}$$

$$x = 4.86 \doteq 5 \text{ pulgadas}$$

x es el espesor de la subbase.

Carpeta asfáltica. -

La carpeta asfáltica podrá ser mezclada en el camino o en una planta. La mezcla en el camino consiste en mezclar los agregados petreos y el material bituminoso sobre la calzada, el porcentaje de material bituminoso oscila generalmente entre el 3 1/2 % y el 7 % del peso de los agregados secos. El porcentaje exacto deberá ser fijado basándose en los ensayos previos de laboratorio al diseñar el método de mezcla.

La mezcla en planta consistió en convinar los agregados petreos y el material bituminoso en una planta, para después ser colocados y compactados sobre una calzada preparada. El porcentaje de material bituminoso - calculado en peso varía generalmente entre 3 1/2 % y 7 % del peso de los - agregados secos. Pero igual que en los mezclados en el camino el porcentaje exacto deberá determinarse por medio de los ensayos efectuados en el laboratorio.

Los agregados se compondrán de grava gruesa, piedra triturada y en algunos casos escorias y un relleno de piedra finamente triturada, arena u otros materiales finos.

Los agregados para carpetas asfálticas deberán llenar las siguientes exigencias de granulometría:

Malla	Porcentaje que pasa
3/4"	100
No. 4	45-65
No. 8	33-53
No. 40	10-25
No. 200	3-8

Se llama agregado grueso al material retenido en la malla No. 8, agregado fino al que pasa la malla No. 8 y polvo mineral al material que pasa la malla No. 200.

Quando se emplee grava triturada no menos de un 50% de las partículas retenidas en la malla No. 40 deberá tener fracturada por lo menos una de sus caras.

El porcentaje de desgaste de los agregados gruesos deberá ser menor de 50% a 500 revoluciones.

La porción de agregados que pase la malla No. 40 deberá tener un índice de plasticidad menor de 6.

El material no deberá tener adheridas películas de arcilla que podría impedir su impregnación total con el material bituminoso.

El hinchamiento de los agregados deberá ser menor de 1.5%.

Se considera que la cantidad de betún es correcta, cuando cada partícula queda cubierta con una capa de material bituminoso y parte de los vacíos de los agregados queda llena.

El area total de la superficie por cubrir y el volumen de vacíos son función de la granulometría de las partículas.

Mc. Kesson y Frickstad desarrollaron la siguiente fórmula para determinar la cantidad de betún requerida para un agregado con una granulometría dada:

$$P = F + 0.035a + 0.045b + \begin{cases} 0.15c & \text{(del 11 al 15\% pasa la malla} \\ & \text{No. 200)} \\ 0.18c & \text{(del 6 al 10\% pasa la malla} \\ & \text{No. 200)} \\ 0.20c & \text{(del 5 ó menos \% pasa la malla} \\ & \text{No. 200)} \end{cases}$$

P = Porcentaje de asfalto en peso de la mezcla total.

a = Porcentaje de agregado retenido en la malla No. 8

b = Porcentaje de material que pasa la malla No. 8 y es retenido en la malla No. 200

F Varía generalmente de 0 a 1.5 dependiendo de:

1.- Si por experiencia se determina variar el contenido de asfalto por condiciones del lugar, clima, etcétera.

2.- Si se requiere aumentar asfalto por absorción o por tener agregados muy pesados o muy ligeros.

F se podría determinar de la siguiente manera: $F = P_1 - P_2$

Calculando el porcentaje de asfalto óptimo (P_1) determinado en el laboratorio por medio de uno de los métodos de diseño y viendo su diferencia para un porcentaje de asfalto (P_2) calculado mediante la fórmula para un (F) igual a cero.

Cuando se tiene el valor de F exacto para un determinado material del agregado, la cantidad de asfalto requerida para diferentes granulometrías podrá ser rápidamente determinada.

En nuestro problema:

$$a = 56.3 \% \quad b = 37.6 \% \quad c = 5.1 \%$$

$$P = 0.035 \times 56.3 + 0.045 \times 37.6 + 0.20 \times 5.1 + F = 4.58 + F$$

Por las condiciones del problema sea $F = 0$

$$P = 4.58$$

Otro método de determinar el contenido de asfalto es mediante la fórmula de F.H. Hveem, esta fórmula está basada en el área de la superficie y las características superficiales de los minerales.

La cantidad de asfalto está basada en la rugosidad de la superficie y la porosidad de las partículas (k), y en el equivalente a Kerosén C.K.E. o sea la cantidad de Kerosén en porcentaje del peso seco del agregado, retenido por las partículas que pasan la malla No. 4 después de ser saturadas con Kerosén y centrifugarlas durante 2 minutos con una fuerza 400 veces la de la gravedad.

$K = 1$ para agregados provenientes de granito o cobalto triturado.

$$P = \left[\frac{0.85 \text{ C.K.E.} + 2.5}{100} \right] \left[\sqrt{\frac{\% \text{ pasa la malla No. 4}}{100}} \right]$$

Las mezclas determinadas por alguna de estas fórmulas dan una idea del contenido óptimo de asfalto para los ensayos de laboratorio, pero los resultados no deberán ser usados para el diseño final a menos que se carezca de los elementos necesarios para llevar a cabo el diseño de las mezclas en el laboratorio.

Diseño de la mezcla en el laboratorio por el método de Marshall:

Se tienen tres tipos de agregados diferentes, los cuales serán combinados para obtener la granulometría especificada, se tiene un material

de granos gruesos (1), un material de granos finos (2) y un material de relleno (3)

Malla	3/4"	No. 4	No. 8	No. 40	No. 200
Límites especificados.	100	45-65	33-53	10-25	3-8
Material No. 1	100	20	3	0.4	0.1
Material No. 2	100	100	95	30	5
Material No. 3	100	100	100	95	75

Primero determinaremos las proporciones de material de granos gruesos y granos finos para tener un 43% de material que pase la malla No. 8:

$$M_1' = 100 \frac{M_2 - R}{M_2 - M_1}$$

Donde:

M_1' es el porcentaje del material (1) requerido.

M_1 es el porcentaje de material (1) que pasa la malla No. 8

M_2 es el porcentaje de material (2) que pasa la malla No. 8

R es el porcentaje requerido de material que pase la malla No. 8.

$$M_1' = 100 \frac{(95 - 43)}{(95 - 2)} = 56\%$$

Si se usara el 56% de material (1) y el 43% de material (2) la cantidad de material que pasa la malla No. 200 es:

$$0.56 + 2.14 = 2.71 \text{ y se requiere un } 5.5\%$$

el faltante de $5.5 - 2.71 = 2.79$ deberá ser obtenido por medio del material No. 3 o sea un porcentaje de $2.79/0.75 = 3.7$ igual aproximadamente al 4%.

La proporción final quedará integrada por un 56% de material grueso, un 40% de material fino y un 4% de material de relleno.

La granulometría final del agregado será:

Malla No.	3/4"	No. 4	No. 8	No. 40	No. 200
Material (1) 56%	56.0	11.2	1.7	0.22	0.06
Material (2) 40%	40.0	40.0	38.0	12.0	2.0
Material (3) 4%	4.0	4.0	4.0	3.8	3.0
Total	100.0	55.2	43.7	16.0	5.1
Total requerido.	100	55	43	17.5	5.5

Teniendo en cuenta que el material (3) es obtenido por un proceso de trituración y es el más caro, la combinación anterior es económica.

Es recomendable usar una cantidad constante de agregados en los diferentes especímenes, de modo que la única variable sea el contenido de asfalto.

Por cada contenido de asfalto se hacen tres especímenes y el valor promedio de los ensayos será usado al trazar las gráficas.

Determinación de la cantidad de agregado total y de las cantidades de agregados de diferentes tamaños para los especímenes, las cantidades de asfalto en cada espécimen, se dan en porcentaje del peso total de los agregados secos.

Especímen de Prueba para determinar la cantidad de agregados requerida para cada espécimen:

Total de agregados usados: 1,300 gr.

Espesor obtenido en el espécimen compactado: 2.70 pulgadas.

Para un espécimen de igual granulometría y de 2.50 pulgadas de espesor se requerirán:

$$1,300 \frac{2.5}{2.7} = 1200 \text{ gr. de agregado.}$$

Malla No.	3/4"	No. 4	No. 8	No. 40	No. 200
Porcentaje que pasa.	100	55.2	43.7	16.0	5.1

Fracción entre las mallas	Porcentaje usado	Peso para cada espécimen en gr.	Pesos acumulativos en gr.
3/4" y No. 4	45	540	540
No. 4 y No. 8	11.5	140	680
No. 8 y No. 40	28	330	1010
No. 40 y No. 200	11	130	1140
Menor de la malla No. 200	5	60	1200
Total	100	1200 gr	

Cantidad de asfalto requerida para los diferentes especímenes.

Especimen No.	Porcentaje de asfalto.	Peso del asfalto en gr.	Peso del asfalto y de los agregados gr.
1	4	48	1248
2	4.5	54	1254
3	5	60	1260
4	5.5	66	1266
5	6	72	1272

Se tiene un asfalto con una densidad de sólidos de 1.01

El material (1) tiene una densidad de sólidos de 2.56

El material (2) tiene una densidad de sólidos de 2.70

El material (3) tiene una densidad de sólidos de 2.71

La densidad de sólidos promedio de los agregados será:

$$G = \frac{56 + 40 + 4}{\frac{56}{2.56} + \frac{40}{2.70} + \frac{4}{2.71}} = 2.62$$

El asfalto usado tiene un grado de penetración de 85 a 100 por lo que deberá ser mezclado a una temperatura de 154°C para obtener la viscosidad de 1.7 Poises especificada y ser compactado a una temperatura de 143°C para que tenga la viscosidad especificada de 2.9 Poises.

Determinación de la densidad de sólidos del espécimen A con un contenido de asfalto del 4%:

Peso del espécimen en el aire 1248.8 gr.

Peso del espécimen revestido con parafina en el aire 1985.5 gr.

Peso del espécimen revestido con parafina en el agua 663.5 gr.

Densidad de sólidos de la parafina 0.9

Densidad de sólidos del espécimen:

$$G_e = P_t / V_t$$

V_t = volumen del espécimen.

$$V_t = 1985.5 - 663.5 - \left(\frac{1985.5 - 1248.8}{0.9} \right) = 503.5$$

$$G_e = \frac{1248.8}{503.5} = 2.48$$

Obtención de la densidad de sólidos de la mezcla suponiendo que el

betún está solamente recubriendo las partículas minerales y no ha sido absorbido por éstas:

Gas = densidad de sólidos supuesta.

Pa = peso de los agregados en la muestra (1197 gr.)

Vm = volumen de la muestra sin vacíos (496 cm³).

Pb = peso del betún en la muestra (49.2 gr.)

Gb = densidad de sólidos del asfalto (1.01)

$$G_{as} = \left[\frac{P_a}{V_m - \frac{P_b}{G_b}} \right] = \frac{1197}{496 - \frac{49.2}{1.01}} = 2.670$$

La cantidad de asfalto absorbida por los agregados será:

A_a = asfalto absorbido en porcentaje del peso de los agregados secos.

G_a = densidad de sólidos de los agregados del espécimen (2.62).

$$A_a = \left[\frac{G_{as} - G_a}{G_{as} \times G_a} \right] 100 = \left[\frac{2.670 - 2.620}{2.670 \times 2.620} \right] 100 = 0.715$$

o sean 0.715 Kg. de asfalto por cada 100 Kg. de agregados.

Corrección de la densidad de sólidos ocasionada por el asfalto absorbido por los agregados:

G' = densidad de sólidos corregida.

G = densidad de sólidos calculada.

P = Porcentaje de los agregados en la mezcla total:

$$G' = 2.48 \left(1 - \frac{0.715}{100} \times \frac{96}{100} \right) = 2.40$$

Inmediatamente después de determinar la densidad de sólidos se procede a efectuar la prueba de estabilidad y flujo, tabulando los datos obtenidos en la tabla, conjuntamente con los de la densidad de sólidos y los de los -

volúmenes de vacíos.

Determinación de los volúmenes de vacíos del espécimen y de los volúmenes de vacíos de los agregados del espécimen:

Volumen de vacíos del espécimen, en porcentaje del volumen total del espécimen:

V_v = volumen de vacíos del espécimen.

G_m = densidad de sólidos teórica máxima = P_m / V_m

P_m = peso de la muestra suelta pesada en el aire 1020 gr

V_m = volumen de la muestra si tuviera un volumen de vacíos igual a cero.

G = densidad de sólidos del espécimen (2.486)

Peso del recipiente lleno con agua (1347 gr.)

Peso del recipiente lleno con la muestra y agua (1978 gr.)

$$G_m = \frac{1020}{1347 - (1978 - 1020)} = 2.608$$

$$V_v = \left(\frac{G_m - G}{G_m} \right) 100 = \left(\frac{2.608 - 2.486}{2.608} \right) 100 = 4.68$$

volumen de vacíos de los agregados del espécimen compactado:

$$V_{va} = V_v + V_a$$

V_{va} = volumen de vacíos de los agregados.

V_v = volumen de vacíos del espécimen.

V_a = volumen ocupado por el asfalto.

V_{at} = volumen total de asfalto.

V_{aa} = volumen de asfalto absorbido por el agregado.

$$V_a = V_{at} - V_{aa}$$

Peso del asfalto absorbido por los agregados:

$$1200 \times 0.00715 = 8.6 \text{ gr.}$$

Peso del asfalto no absorbido:

$$48 - 8.6 = 39.4 \text{ gr.}$$

Volumen ocupado por el asfalto no absorbido:

$$39.4 / 1.01 = 38.9 \text{ cm}^3$$

Volumen de vacíos ocupado por el asfalto no absorbido:

$$38.9 / 5.01 = 7.7$$

$$V_{va} = 7.7 + 4.68 = 12.38$$

Obtención del contenido efectivo de asfalto en la mezcla:

C = Contenido de asfalto efectivo en porcentaje del peso de la mezcla.

Cr = Contenido total de asfalto en porcentaje del peso de la mezcla (4%)

Aa = Absorción de asfalto en porcentaje del peso de los agregados secos (0.715)

$$C = \left[\frac{Cr - \frac{Aa}{100}(100 - Cr)}{100 - \frac{Aa}{100}(100 - Cr)} \right] 100 =$$

$$C = \left[\frac{4 - \frac{0.715}{100}(100 - 4)}{100 - \frac{0.715}{100}(100 - 4)} \right] 100 = 3.34 \%$$

Diseño de Mezcla Método Marshall

Aplicación de la carga 2" por minuto

Operador: _____

Agregados: 56% mat., 1.40% mat., 2 y 4% mat. 3

Fecha: _____

Número de golpes de compactación 75 (tráfico Pesado)

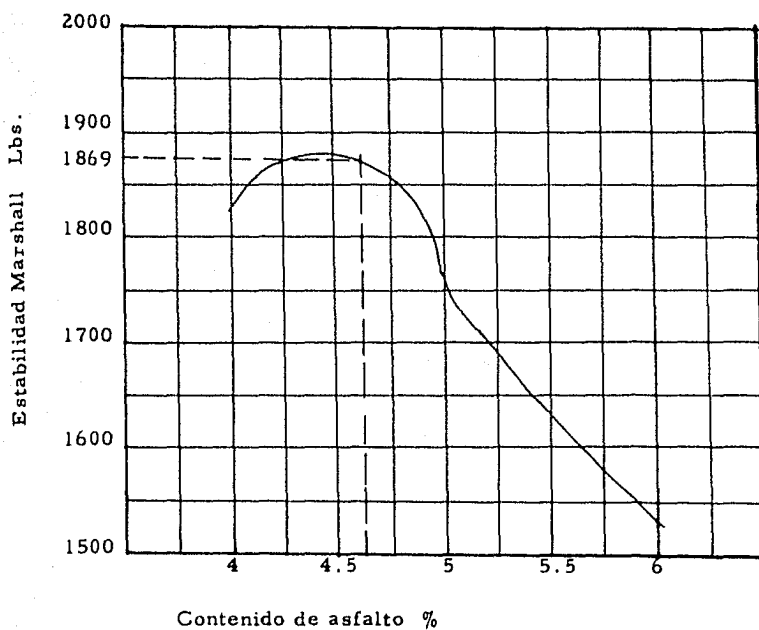
Densidad de sólidos promedio de los agregados: 2.62

Densidad de sólidos del asfalto: 1.01

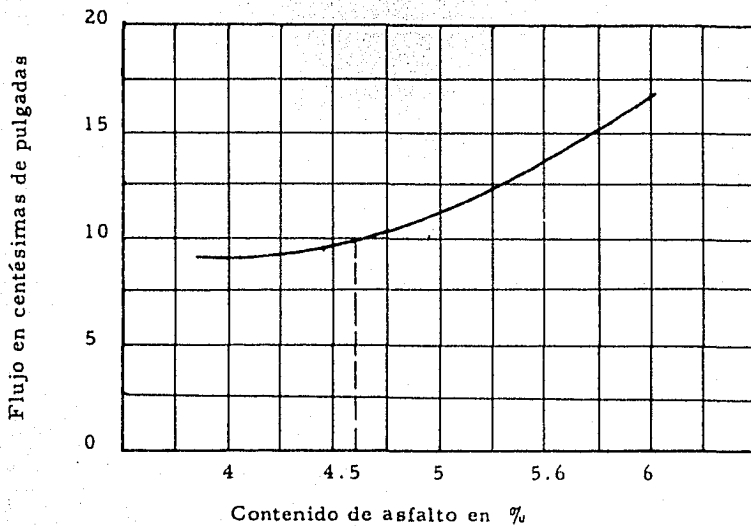
Aborción de aífalto en porcentaje del peso de los agregados: 0.715

contenido de asfalto en % del peso del agregado.	contenido de asfalto en % del peso de la mezcla.	peso del espécimen en el aire, sin parafina gr	muestra cubierta con parafina peso gr		volumen del espécimen cm ³	densidad de sólidos de espécimen, P/V	estabilidad Lbs.			flujo 1/100 pulgadas	peso volumétrico Kg/m ³	volumen de vacíos del espécimen V _v	volumen de vacíos de los agregados del espécimen V _{va}	contenido efectivo de asfalto en % del peso de la mezcla
			en el aire	en el agua			medida en el aparato.	espesor espécimen en pulgadas	ajustada para espesor de 2.5 pulgadas.					
4.17	4-A	1248.8	1985.2	663.5	503.5	2.480	1795	2 1/2	1795	9				
	B	1248.3	1988.1	665.1	501.0	2.491	1815	2 7/16	1900	9				
	C	1247.8	1988.0	664.4	501.2	2.489	1860	2 9/16	1785	10				
	promedio					2.486			1827	9	2486	4.68	12.38	3.34
4.7	4.5-A	1254.0	1993.1	670.5	501.4	2.495	1910	2 9/16	1840	9				
	B	1254.3	1994.7	671.1	500.9	2.494	1810	2 1/2	1810	10				
	C	1255.0	1995.0	668.1	504.7	2.492	1840	2 7/16	1918	10				
	promedio					2.494			1883	10	2494	4.08	11.69	4.24
5.26	5-A	1260.1	1998.2	672.6	505.5	2.498	1880	2 5/8	1750	11				
	B	1261.0	1997.9	672.3	506.8	2.495	1910	2 5/8	1780	11				
	C	1259.8	1998.5	672.9	504.8	2.495	1760	2 1/2	1760	11				
	promedio					2.496			1763	11	2496	3.20	11.44	4.90
5.82	5.5-A	1266.1	2003.2	674.5	509.7	2.491	1800	2 5/8	1680	13				
	B	1266.1	1998.8	675.1	509.6	2.495	1710	2 1/2	1710	15				
	C	1266.2	2002.7	676.4	508.0	2.498	1680	2 5/8	1560	14				
	promedio					2.495			1650	14	2495	2.65	12.04	5.38
6.38	6-A	1272.1	2007.2	680.9	510.1	2.489	1520	2 1/2	1520	16				
	B	1271.9	2007.1	681.1	509.1	2.499	1450	2 1/2	1450	18				
	C	1271.0	2006.9	679.4	509.8	2.495	1560	2 7/16	1620	17				
	promedio					2.494			1530	17	2494	2.35	12.94	5.79

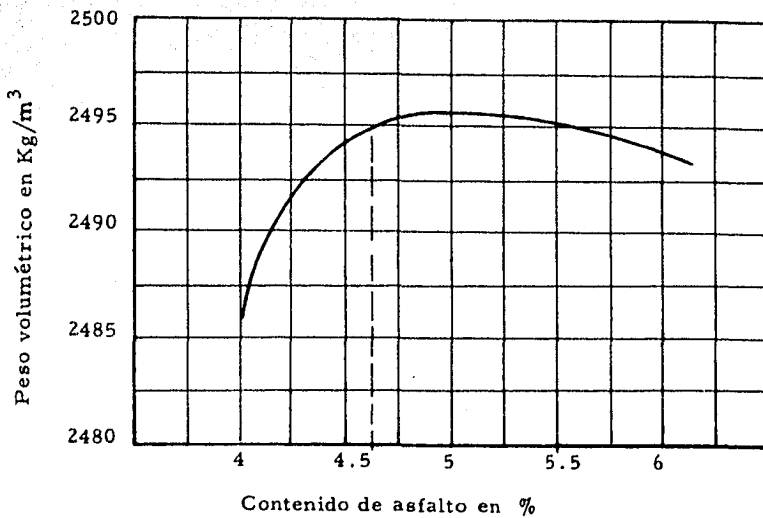
Con los datos obtenidos se trazan las gráficas que relacionan la estabilidad, el flujo, el peso volumétrico, el volumen de vacíos del espécimen y el volumen de vacíos de los agregados del espécimen con el contenido de asfalto.



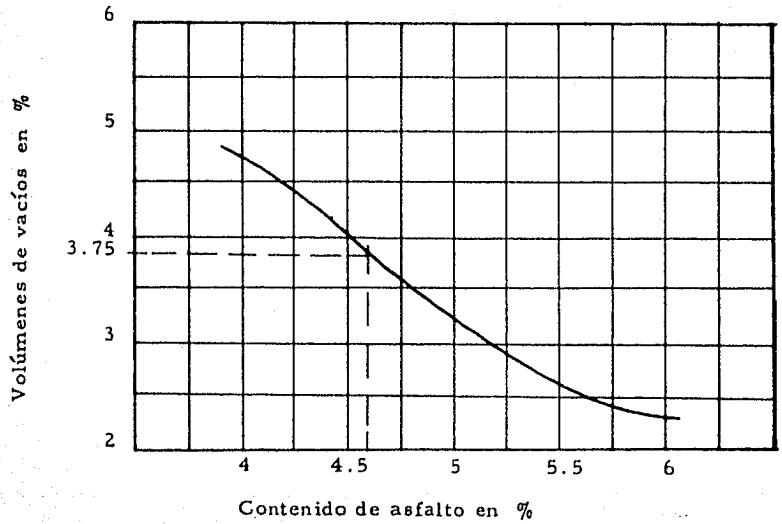
Flujo, contenido de asfalto:



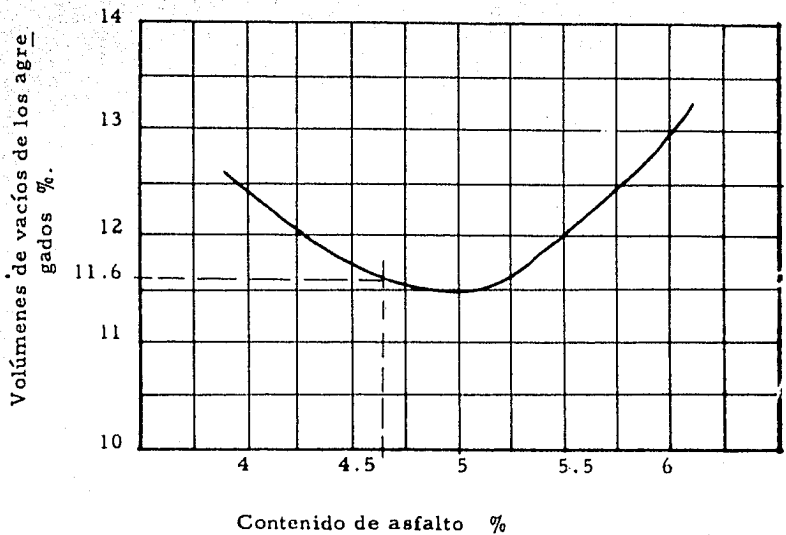
Peso volumétrico, contenido de asfalto:



Relación de volúmenes de vacíos del espécimen y el contenido de asfalto:



Relación volúmenes de vacíos de los agregados del espécimen, contenido de asfalto.



El contenido óptimo de asfalto se determina dando preferencia a los datos de máxima estabilidad, máximo peso volumétrico y un volumen de vacíos adecuado, pudiendo ser el contenido de asfalto óptimo el promedio de los requeridos para estas condiciones.

En este problema el contenido óptimo de asfalto será:

- a) Contenido de asfalto para máxima estabilidad ----- 4.5%
- b) Contenido de asfalto para máximo peso volumétrico --- 4.85%
- c) Contenido de asfalto para un volumen de vacíos de 4 que
es el medio de los límites especificados ----- 4.5%

Promedio ----- 4.6%

Para un contenido de 4.6% de asfalto, en las curvas encontramos los siguientes valores:

Estabilidad -----	1869 Lbs.
Flujo -----	10 1/100"
Peso volumétrico -----	2495 Kg/m ³
Volumen de vacíos del espécimen -----	3.75 %
Volumen de vacíos de los agregados mi- nerales del espécimen compactado -----	11.6%

Comparando estos valores con los valores permisibles de la tabla de la página 85 vemos que la estabilidad es mayor que la mínima requerida, el flujo y el volumen de vacíos del espécimen se encuentran entre los límites estipulados y el volumen de vacíos de los agregados del espécimen, es un poco menor al mínimo recomendado en la gráfica de la página 85 para un tamaño máximo de los agregados de 3/4 de pulgada, se podría aumentar dicho volumen de vacíos a un valor superior al mínimo recomendable, a cambio de una disminución en la estabilidad y un aumento en el flujo, la elección dependerá del trabajo específico al que vaya a estar sometido el pavimento y a la economía del proyecto.

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

Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes
en los Proyectos de Carreteras .

Publicado por la International Road Federation

Geophysical Methods of Subsurface Exploration, in Highway Construction .

R. W. Moore

Ingeniería de Carreteras y Aeropuertos .

Adrián R. Legault

Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica .

Karl Terzaghi

Ralph B. Peck

Mecánica de Suelos. Instructivo para Ensaye de Suelos .

Secretaría de Recursos Hidráulicos

Principios del Diseño y Construcción de Presas de Tierra .

Enrique Taméz González

Principles of Pavement Design .

E. Yoder

Soil Mechanics for Road Engineers .

Road Research Laboratory

Standard Methods of Surveying and Sampling Soils for Highway Purposes .

Designation AASHTO, Highway Materials. Part. 2.

Standard Specifications for Highway Materials and Methods of Sampling
and Testing .

American Association of State Highway Officials

Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes .

M. Juul Hvorslev

The Asphalt Handbook

The Asphalt Institute