



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA

**DISEÑO DE UNA BASE RECICLADA
ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JESÚS ANTONIO GARCÍA ALDAMA

CD. OBREGÓN, SONORA

MARZO DEL 2003

DEDICATORIAS

A MI MADRE:

Juana Aldama Espinoza, por que siempre que te necesito estas a mi lado, por darme ese cariño que solo una madre puede dar, guiarme siempre por el buen camino, darme ánimos y tener esa confianza en mí. Gracias Mamá.

A MI PADRE:

Humberto García Portillo por todo el apoyo que siempre me has dado, la paciencia que me has tenido, ayudarme siempre sin pedir nada a cambio, ser un gran ejemplo para mí, demostrándome que las metas se alcanzan cuando se quiere y se propone. Gracias Papá.

A MIS HERMANOS:

Alberto y Manuel por ser mis mejores amigos, por el apoyo que siempre me han brindado, aguantarme y estar siempre unidos en las buenas y en las malas. Gracias hermanos.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS:

Por darme la vida y dejarme disfrutarla al lado de la gente que más quiero, por guiarme por el camino que me ha llevado a obtener cada uno de mis logros.

A MI ASESOR:

Ing. Luis Gerardo Herrera Meléndez, por haberme brindado todo su apoyo en la elaboración de mi tesis, dedicarme parte de su valioso tiempo, tenerme tanta paciencia y mostrar siempre una actitud de amabilidad. Gracias por su apoyo.

A MIS MAESTROS:

Por darnos las herramientas necesarias para formarnos en el ámbito profesional y personal. Muchas gracias por su tiempo.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2-1. Sección de un pavimento flexible.	8
Figura 2-2. Sección de un pavimento rígido.	9
Figura 4-1. Croquis de localización del tramo en estudio.	39
Figura 4-2. Fallas en alcantarillas (hundimientos).	43
Figura 4-3. Fallas tipo surco.	43
Figura 4-4. Fallas tipo bache y desprendimientos.	44
Figura 4-5. Desprendimiento de agregado.	45
Figura 4-6. Muestreo de carpeta, base, sub-base y sub-rasante.	46
Figura 4-7. Espesores obtenidos de las capas del pavimento.	46
Figura 4-8. Lavado de carpeta por centrifugado.	47
Figura 4-9. Curva granulométrica de la carpeta asfáltica.	50
Figura 4-10. Prueba de equivalente en arena.	52
Figura 4-11. Curva granulométrica de la base.	53
Figura 4-12. Curva granulométrica de la sub-base.	54
Figura 4-13. Curva granulométrica del material mezclado.	59
Figura 4-14. Equipo de compactación y muestras elaboradas.	62
Figura 4-15. Obtención del peso específico en las muestras.	63
Figura 4-16. Ensaye de los especímenes en la prensa Universal.	63
Figura 4-17. Gráfica de Estabilidad vs. %C.A.	64
Figura 4-18. Gráfica de Flujo vs. %C.A.	65
Figura 4-19. Gráfica de Peso Volumétrico vs. %C.A.	65
Figura 4-20. Gráfica de % de Vacíos vs. %C.A.	66
Figura 4-21. Gráfica de % de V.A.M. vs. %C.A.	66
Figura 4-22. Espesores finales de las capas del pavimento.	69

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 4-1. Resultados del aforo de tránsito vehicular.	40
Tabla 4-2. Clasificación vehicular.	42
Tabla 4-3. Composición granulométrica de la carpeta asfáltica.	50
Tabla 4-4. Densidad y absorción de las gravas en la carpeta asfáltica.	51
Tabla 4-5. Equivalente en arena en la carpeta asfáltica.	51
Tabla 4-6. Composición granulométrica de base, sub-base y sub-rasante.	53
Tabla 4-7. Plasticidad y contracción lineal en base, sub-base y sub-rasante.	55
Tabla 4-8. Densidad y absorción de las gravas de la base.	56
Tabla 4-9. Equivalente en arena en el material de base.	56
Tabla 4-10. Contenido de residuo asfáltico en la emulsión.	57
Tabla 4-11. Granulometría del material mezclado.	59
Tabla 4-12. Resultados de estabilidad, flujo, densidad, % de vacíos y % de VAM.	64
Tabla 4-13. % Óptimo de asfalto con el máximo de especificaciones.	67
Tabla 4-14. % Óptimo de asfalto con el mínimo de especificaciones.	67

ÍNDICE

DEDICATORIAS	i
AGRADECIMIENTOS	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	iv
I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Antecedentes.	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación.	4
1.4. Objetivos generales.	5
1.5. Objetivos particulares	5
1.6. Delimitaciones.	5
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.	7
2.1. Generalidades.	7
2.2. Tipos de pavimento.	8
2.3. Materiales de bases y sub-bases	9
2.4. Productos asfálticos	10
2.4.1. Cementos asfálticos.	11
2.4.2. Asfaltos rebajados	11
2.4.3. Emulsiones asfálticas.	12
2.5. Estabilización de materiales	12
2.6. Pruebas de clasificación para materiales pétreos y suelos.	14
2.6.1. Granulometría	14
2.6.2. Plasticidad	15

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.

La gran mayoría de las calles en Cd. Obregón, están compuestas por pavimentos flexibles con carpeta asfáltica, los cuales requieren de altos costos de mantenimiento. La acción combinada del tráfico y los escurrimientos pluviales producen daños que pueden variar desde la destrucción parcial o total de la superficie de rodamiento, hasta el deterioro de las capas subyacentes con la consecuente pérdida de la capacidad estructural del pavimento. Entre los principales problemas que se presentan, se encuentran: desprendimientos, roderas, depresiones, agrietamientos por fatiga y baches, los cuales se ven agravados con la presencia de la temporada de lluvias.

El motivo de esta investigación es la implementación de una nueva tecnología para rehabilitar los deteriorados pavimentos en las calles de Cd. Obregón. Dado

que este es un problema que se da año tras año y las reparaciones que se le dan al pavimento son momentáneas.

En la búsqueda de métodos alternativos para rehabilitar pavimentos flexibles, se han desarrollado y probado técnicas más eficientes que los métodos tradicionales, uno de los cuales es la utilización de bases estabilizadas recicladas en frío utilizando emulsiones asfálticas. La cual consiste en mezclar la carpeta asfáltica antigua y la base incorporando una emulsión asfáltica, esta mezcla se tiende y se compacta y sobre ella se coloca la nueva carpeta asfáltica; aunque estrictamente, se denomina base negra o estabilizada a la mezcla de agregado con producto asfáltico para mejorar las características de granulometría, estabilidad, resistencia, permeabilidad de un suelo, para que éste sea apto para soportar las condiciones a las que será sometido.

El comportamiento de los materiales para caminos, sometidos a la acción del tránsito, depende de dos acciones básicas: cohesión y fricción interna. Por lo tanto si se mezcla a un suelo un producto asfáltico que le proporcione la suficiente cohesión y fricción interna, o que contribuya a mantener dichas propiedades, entonces se habrá logrado un material estabilizado.

Como en el caso de cualquier tipo de estabilización, es la economía la que ha conducido en muchos países al empleo de materiales con aditivos que los hacen adecuados para su empleo en carreteras y se ha encontrado que cuando dichos materiales están constituidos por limos, arenas y gravas, los productos asfálticos ocupan uno de los lugares primordiales para lograr una estabilización exitosa y económica.

En el presente trabajo se trabajará de manera exhaustiva con la estabilización con asfalto, dado que los productos asfálticos se presentan en una gran variedad, lo que aunado a la también alta diversidad de suelos empleados, hace que la estabilización con asfaltos ocupe una de las más vastas especialidades en este campo.

A nivel regional se están empleando las bases negras en la calle Sufragio Efectivo y la calle Jalisco, además se han hecho trabajos de estabilización de bases con cemento Portland, los cuales han mostrado excelentes resultados. A nivel nacional usar bases estabilizadas con asfalto ha dado buenos resultados, como lo es en el estado de Tabasco, y en Venezuela a nivel internacional.

Aquí en Cd. Obregón usar este tipo de bases estabilizadas se ha hecho necesario, ya que existen calles en las que sus pavimentos se ven sometidos a tráfico pesado, y que ameritan un pavimento de mayor capacidad de carga.

En el caso de nuestro tramo en estudio, el cual se encuentra ubicado en calle Sinaloa entre Blvd. Ignacio Ramírez y Calle 300, en la colonia Municipio Libre, se puede apreciar que el pavimento se encuentra gravemente deteriorado, ya que presenta desprendimientos de carpeta, agrietamientos por fatiga y baches, esto debido a que por esta vía tipo principal se desplazan vehículos ligeros (A2), vehículos de tipo pesado como camiones de carga de dos y tres ejes (C2, C3) y autobuses de dos y tres ejes (B2, B3).

1.2. Planteamiento del problema.

Es de todos conocido que el problema de los pavimentos en Cd. Obregón tiene largo tiempo, están tan dañados en algunos sectores que hacen que estas vías se vuelvan intransitables, con mucha más razón en temporada de lluvias que es más severo el problema.

La vida de los pavimentos parece estar sometida a un ciclo interminable de construcción, conservación insuficiente o inexistente, degradación, destrucción y reconstrucción. Específicamente, los pavimentos flexibles exhiben una limitada vida útil al ser sometidos a la acción combinada del tráfico y humedecimientos por escurrimientos pluviales. Los métodos tradicionales de mantenimiento y

rehabilitación han demostrado una clara limitación para extender la vida útil de los pavimentos flexibles y reducir significativamente los gastos en su mantenimiento. Debido a lo anterior, resulta obvia la necesidad de buscar y aplicar nuevos métodos de rehabilitación que ayuden a resolver el presente problema.

Es por ello que este proyecto surge de la necesidad de buscar e implementar nuevas y más eficientes tecnologías de rehabilitación de pavimentos para las calles de Cd. Obregón, para solucionar la gran deficiencia que se tiene en algunos sectores, que implique menor costo y mayores beneficios, así como menor tiempo de construcción, dando todo esto mayor rentabilidad en el proyecto de rehabilitación.

Por lo anterior, el problema que se plantea: ¿Es recomendable la estabilización de una base con emulsión asfáltica para la rehabilitación de un pavimento flexible?

1.3. Justificación.

Con el presente trabajo de investigación se pretende llevar a cabo el diseño de una mezcla estabilizada con asfalto reciclada en frío, para ser utilizada en la rehabilitación del tramo de la calle Sinaloa entre Blvd. Ramírez y calle 300. para comprobar las características de durabilidad (vida útil), resistencia a tráfico pesado y menor conservación que tiene este tipo de rehabilitación.

Al obtener los resultados de esta investigación se estará en posición de definir si la utilización de asfalto en la estabilización de una base es recomendable o no; además de mostrar algunos aspectos o características alcanzadas en las pruebas realizadas para dicho fin.

La elaboración de este proyecto determinará la viabilidad de efectuar una rehabilitación de pavimentos utilizando bases asfálticas recicladas, partiendo de los resultados que se obtengan.

Los resultados obtenidos de esta investigación serán de gran beneficio al municipio, ya que podrá contar con un diseño de rehabilitación muy eficiente. Además los usuarios también se verán beneficiados si se ponen en práctica tales proyectos, ya que tendrán una calle más fluida, rápida y los automóviles no estarán expuestos a posibles daños, además de la comodidad que presentaría la superficie.

1.4. Objetivo general.

Proponer una metodología para el diseño de una base estabilizada con emulsión asfáltica, para la rehabilitación de un pavimento flexible.

1.5. Objetivos particulares.

- Metodología para el diseño de una base reciclada estabilizada con emulsión asfáltica.
- Aplicación de la metodología de diseño en la rehabilitación de un tramo de una calle de Cd. Obregón.
- Presentar las ventajas de las bases estabilizadas en la rehabilitación de un pavimento.

1.6. Delimitaciones.

El diseño de la mezcla asfáltica se hará mediante el método Marshall modificado para ser usado con emulsiones. La emulsión asfáltica a utilizar será del tipo catiónico de rompimiento medio. Para la aplicabilidad de este proyecto se tomará

un tramo en estudio en calle Sinaloa entre Blvd. Ignacio Ramírez y calle 300. Las pruebas que se requieran para este estudio serán realizadas en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Civil del ITSON. Asimismo los procedimientos de pruebas se basarán en las normas de la SCT.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Generalidades.

“Se define como pavimento al conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten adecuadamente distribuidas a las capas inferiores; proporcionan la superficie de rodamiento en donde se debe tener una operación rápida y cómoda” (Olivera, 2000).

De acuerdo a la teoría de esfuerzos y a las medidas de campo que se han realizado, los materiales con que se construyen los pavimentos deben tener suficiente calidad para resistirlos y, por lo mismo, a medida que las capas que los integran están localizadas a mayor profundidad, pueden tener una calidad menor, que esté en relación con el nivel de esfuerzos que reciban; pero también, el pavimento debe transmitir los esfuerzos a las capas inferiores, convenientemente distribuidos con el fin de que estas los puedan resistir.

2.2. Tipos de pavimento.

Hay dos tipos principales de pavimento: los flexibles y los rígidos. En los flexibles la superficie de rodamiento es proporcionada por una carpeta asfáltica y la distribución de las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores, se hace por medio de las características de fricción y cohesión de las partículas de los materiales. Las capas que forman un pavimento flexible son: carpeta asfáltica, base y sub-base, las cuales se construyen sobre la capa sub-rasante, ver figura 2.1 (Olivera, 2000).

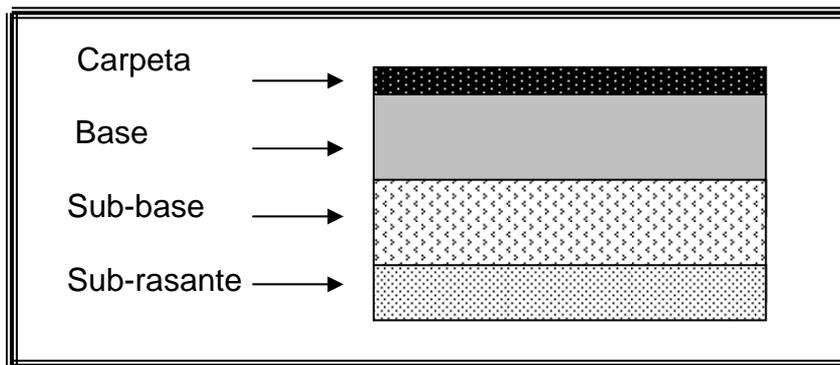


Figura 2.1. Sección de un pavimento flexible

En los pavimentos rígidos la superficie de rodamiento es proporcionada por losas de concreto hidráulico que distribuyen las cargas de los vehículos, hacia las capas inferiores, por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes que trabajan en forma conjunta con la que recibe directamente las cargas. La sección transversal de un pavimento rígido está formada por la losa de concreto hidráulico y la sub-base, que se construyen sobre la capa sub-rasante, ver figura 2.2 (Olivera, 2000).

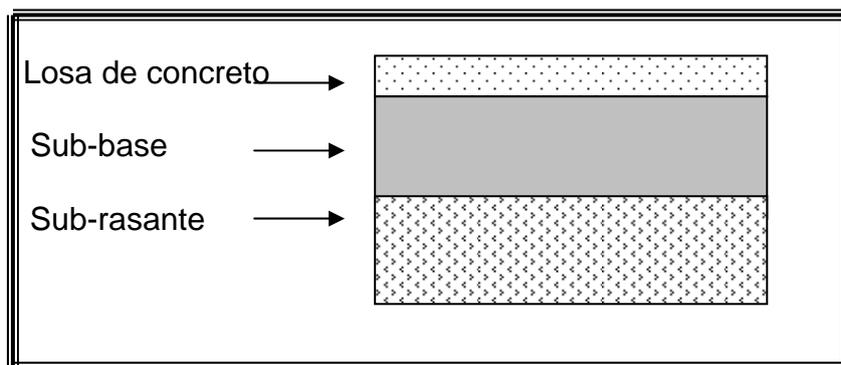


Figura 2.2. Sección de un pavimento rígido.

2.3. Materiales de bases y sub-bases.

Los materiales para la construcción de las capas del pavimento siempre provienen de banco, pudiéndose utilizar aglomerados de arroyos y depósitos, o conglomerados suaves o duros y rocas que pueden ser fisuradas o sanas, y en general, requieren de uno o más tratamientos.

Las características de los materiales que componen la base y sub-base son: resistencia “Valor de Soporte (VRS)”, plasticidad, contracción lineal, valor cementante, equivalente en arena y granulometría.

Las bases sobre las cuales se construye una carpeta de concreto asfáltico, deben tener un módulo de elasticidad semejantes al de esta última, por lo que conviene estabilizarlas mezclándoles cal hidratada, cemento Pórtland o asfalto, pues de lo contrario con pequeñas deformaciones de la base, la carpeta se puede agrietar en forma prematura (Olivera, 2000).

Para la construcción de la capa sub-rasante, en general, se utilizan materiales de banco que tengan las características adecuadas para las funciones que vayan a tener en la estructura vial. Si el material que se extraiga de los cortes cumple con estas características, pueden utilizarlos tanto en ellos (escarificando, conformando

y compactando), como en los terraplenes contiguos, para construir esta capa sub-rasante.

En las últimas décadas se ha utilizado en forma importante el concreto asfáltico que a pesar de tener una falla frágil, parecida a la del concreto hidráulico, su resistencia es bastante menor que la de éste, por lo que queda incluido en los pavimentos flexibles; sin embargo, para evitar que la carpeta se agriete por pequeñas deformaciones en la base, ésta debe construirse rígida utilizando cemento Pórtland, cal o asfalto, para que los módulos de elasticidad de ambas capas sean lo más parecido posible.

2.4. Productos asfálticos.

Los productos asfálticos que generalmente se emplean en la República Mexicana, provienen del petróleo crudo, extraído de pozos y le que se le ha separado en sus constituyentes en una refinería mediante destilación fraccionada. A dichos constituyentes o fracciones, se les ha refinado hasta obtener productos que reúnan ciertos requisitos especificados para sus diversas aplicaciones. Dependiendo del tipo de petróleo crudo que se emplee, podemos obtener en el proceso de destilación: asfalto, parafinas, aceites, lubricantes, gasolina y kerosina. El asfalto es el residuo de la destilación, pues ni se evapora ni hierve durante este proceso (Fernández, 1991).

El asfalto es generalmente un material pegajoso, lo que hace que se adhiera a las partículas de suelo o agregado pétreo, es impermeable y además resistente a la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Se dice que el asfalto es termoplástico porque se suaviza al calentarse y endurece al enfriarse.

El producto obtenido como residuo de la destilación del petróleo crudo es, a la temperatura ambiente, un material semisólido, negro, pegajoso, altamente viscoso y se le designa como cemento asfáltico. A este material se le puede reblandecer

mediante calentamiento para su manipulación y mezclado con agregados, proporcionando cementación, impermeabilidad y durabilidad a la mezcla obtenida.

Al asfalto se le puede fluidificar calentándolo, o bien con la adición de solventes o se le puede emulsificar en agua; dando lugar a los productos conocidos como cementos asfálticos, asfaltos rebajados y emulsiones, respectivamente (Fernández, 1991).

2.4.1. Cementos asfálticos.

Su aplicabilidad está restringida al caso de las mezclas asfálticas, de la más alta calidad, elaboradas en planta, donde se cuida en forma muy especial a la temperatura, dosificación y mezclado.

Los cementos asfálticos se fabrican con diferentes “grados de penetración” y se les designa en México como CA-3, CA-6, CA-7 y CA-8, siendo el producto más duro el CA-8, al cual a la temperatura ambiente, difícilmente se le puede encajar una uña (Fernández, 1991).

2.4.2. Asfaltos rebajados.

Estos productos se obtienen disolviendo el asfalto en diferentes tipos de solventes. Estando el asfalto disuelto, se le mezcla con los agregados y al evaporarse los solventes el residuo se adhiere a las partículas del suelo cementándolas. A las mezclas obtenidas se les designa también como “mezclas en frío”.

A los asfaltos rebajados se les designa como asfaltos rebajados de fraguado rápido (FR), de fraguado medio (FM) y de fraguado lento (FL). A los asfaltos rebajados se les fabrica con diferente grado de fluidez, dependiendo éste de tres

factores: tipo de cemento asfáltico empleado, tipo de solvente y proporción empleada de ambos productos; y se les clasifica como: FR-0 a FR-4, FM-0 a FM-4 y FL-0 a FL-4 (Fernández, 1991).

2.4.3. Emulsiones asfálticas.

Otro de los procedimientos empleados para fluidificar a un cemento asfáltico, consiste en separarlo mecánicamente y en caliente hasta obtener pequeños glóbulos a los cuales se dispersa en agua tratada con emulsificantes. Obteniendo de esta manera lo que se conoce como emulsión asfáltica (Fernández, 1991).

Dependiendo del tipo de emulsificante empleado, las emulsiones se identifican como catiónicas (los glóbulos son atraídos por el cátodo) y aniónicas, lo que significa que las primeras están cargadas electro-positivamente y las segundas electro-negativamente. De acuerdo con la manufactura y tipo de materiales empleados, a las emulsiones se les identifica como a continuación se indica:

<u>Velocidad de rompimiento</u>	<u>Aniónicas</u>	<u>Catiónicas</u>
Rápido	RR-1, RR-2	RR-2K, RR-3K
Medio	RM-2	RM-2K, RM-3K
Lento	RL-1, RL-2	RL-2K, RL-3K

2.5. Estabilización de materiales.

A menudo, se tiene que los materiales cercanos a las obras no cumplen con los requisitos necesarios para ser utilizados en alguna capa de la sección transversal de una obra, entonces se precisa realizar uno o varios tratamientos para mejorar sus características, que resulten más económicos que el tener grandes distancias de acarreo. Los principales tratamientos que se utilizan en las vías terrestres son: disgregado, cribado, compactación y estabilización.

Los tres primeros tratamientos tienen como finalidad que las partículas sean de tamaños menores al máximo requerido; aunque también se pueda controlar con ellos la granulometría.

Se llama estabilización de suelos a la mezcla de dos o más materiales, para que éste presente las características deseadas. Se pueden distinguir dos tipos de estabilizaciones: las del tipo mecánico y las del tipo químico, ya que en éstas se presentan reacciones de esta índole, mientras que en las primeras no (Fernández, 1991).

Entre las principales propiedades que se buscan mejorar con la estabilización de un suelo, se encuentran las siguientes:

- Estabilidad volumétrica.
- Resistencia mecánica.
- Permeabilidad.
- Durabilidad.
- Compresibilidad.

La estabilización de un suelo se puede llevar a cabo con algunos de los siguientes métodos:

- Mediante su mezclado con otros suelos o la modificación de su granulometría.
- Mediante la adición de cal.
- Mediante la adición de cemento Pórtland.
- Mediante la adición de asfalto.
- Mediante la adición de productos diversos:
 - * Con sales.
 - * Con ácidos inorgánicos.
 - * Con resinas y polímeros.

Como en el caso de cualquier tipo de estabilización, es la economía la que ha conducido en muchos países al empleo de materiales con aditivos que los hacen adecuados para su empleo en carreteras y se ha encontrado que cuando dichos materiales están constituidos por limos, arenas y gravas, los productos asfálticos ocupan uno de los lugares primordiales para lograr una estabilización exitosa y económica.

Se denomina base negra o estabilizada a la mezcla de agregado con producto asfáltico para mejorar las características de granulometría, estabilidad, resistencia, permeabilidad de un suelo, para que éste sea apto para soportar las condiciones a las que será sometido (Olivera, 2000).

2.6. Pruebas de clasificación para materiales pétreos y suelos.

Las principales pruebas de clasificación que se realizan a los materiales pétreos y suelos que se utilizan en una vía terrestre son: granulometría, plasticidad, resistencia, expansión, valor cementante, densidad, adherencia con el asfalto, dureza y forma de la partícula (SCT, 1996).

2.6.1. Granulometría.

La prueba de granulometría de un material sirve para determinar el porcentaje en peso, de las partículas de diferentes tamaños que lo forman. Para realizar esta prueba, se hace uso de tamices o mallas por las que se hace pasar el material, se pesan las partículas que se retienen en cada una de ellas y se encuentra el porcentaje respectivo con relación al peso seco total; después se calcula el porcentaje que pasa por las diversas mallas.

2.6.2. Plasticidad.

La plasticidad de un material se puede definir como la facilidad que presenta a remoldarse sin cambio de volumen y teniendo un mínimo de resistencia al corte. Por tanto, en la plasticidad de un material pueden intervenir sus características de humedad, peso volumétrico, sensibilidad de sus partículas, principalmente las finas, con respecto al agua y al porcentaje de éstas dentro del total.

Para conocer la sensibilidad de los finos a cambiar sus características de consistencia en presencia del agua, se realizan pruebas de plasticidad, entre las que se encuentran los límites de Atterberg y la de contracción lineal; estas pruebas se realizan sobre la porción de los materiales que pasan la malla No. 40.

2.6.3. Límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg corresponden a la humedad, o sea, al porcentaje de agua con respecto al peso de los sólidos, en que los finos de los materiales pasan de una consistencia a otra; así, el límite líquido (LI) es la humedad correspondiente al límite entre el estado semilíquido y el plástico, en esta condición el material tiene una resistencia mínima al esfuerzo cortante de 25 gr/cm^2 .

El límite plástico (L_p) es la humedad correspondiente al límite entre el estado plástico y el semisólido; a la diferencia entre el límite líquido y plástico se le denomina índice plástico (I_p). Hay otros límites como el de contracción o el equivalente de humedad de campo.

2.6.4. Prueba de contracción lineal.

La prueba de contracción lineal, es también una medida de la plasticidad de la porción de los materiales que pasa la malla 40. En este caso, no se obtiene una humedad sino una relación de longitudes.

2.6.5. Pruebas de adherencia de materiales pétreos con el asfalto.

Los materiales que van a estar en contacto con asfalto como lo son los que se utilizan en carpetas asfálticas, bases negras o bases naturales, deben tener buena adherencia con el asfalto.

Esta característica se ve muy afectada, en forma negativa, cuando se tiene agua, de tal manera que aquellos materiales que son afines al agua (hidrófilos), en general tienen mala adherencia con el asfalto; es por ello que las pruebas que se realizan con este fin, se hacen en presencia de ese elemento y las más usuales en el país son:

1. Prueba de desprendimiento por fricción.
2. Prueba de pérdida de estabilidad por inmersión en agua.
3. Prueba inglesa.

2.6.6. Dureza.

Para conocer la dureza de los materiales pétreos y suelos que se utilizan en la construcción de las vías terrestres, se pueden utilizar diferentes pruebas como son: de desgaste por medio de la máquina de “Los Ángeles” o de la “Deval” o la de durabilidad; también se pueden utilizar las pruebas de intemperismo acelerado, de densidad y de formas de las partículas.

2.6.7. Desgaste.

Las pruebas de desgaste consisten en colocar al material con una granulometría determinada, dentro de un cilindro de acero hueco junto con bolas de acero. Se hace girar el cilindro un determinado número de veces y al final se ve la cantidad de partículas finas que se produjeron, con lo cual se puede calcular el porcentaje de desgaste.

2.6.8. Forma de la partícula.

Las pruebas de forma de la partícula se llevan a cabo a fin de conocer el porcentaje de partículas en forma de aguja o de laja que se tienen en el material, pues éstas al recibir las cargas tienden a romperse con facilidad y hacen que los materiales tengan menos resistencia.

2.7. Pruebas de clasificación para productos asfálticos.

Las pruebas más usuales que se realizan a los productos asfálticos son: destilación, penetración, viscosidad, punto de encendido, asentamiento en cinco días, demulsibilidad con cemento Portland, carga de la partícula y acidez.

2.7.1. Prueba de destilación.

El objetivo de esta prueba es determinar el contenido de solventes que contiene un producto asfáltico rebajado a temperaturas establecidas, así como las proporciones del residuo asfáltico y total del solvente que existe en el producto. En el residuo asfáltico obtenido, se realizan otras pruebas que ayudan a su identificación.

2.7.2. Penetración.

Esta prueba tiene por objeto conocer el grado de dureza de un cemento asfáltico o bien del residuo asfáltico producto de la destilación de un asfalto rebajado o emulsión asfáltica, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de dicho material bajo condiciones establecidas de peso, tiempo y temperatura; la profundidad a la que penetra la aguja mencionada se mide en décimos de milímetro.

2.7.3. Prueba de viscosidad.

El objetivo de esta prueba es conocer la consistencia de los productos asfálticos a las temperaturas especificadas, además de la susceptibilidad térmica de estos productos y fijar los intervalos de temperatura dentro de los cuales adquieren las consistencias apropiadas para su uso.

2.7.4. Punto de encendido.

El objeto de la prueba es conocer el punto de ignición de un producto asfáltico. Este representa la temperatura crítica arriba de la cual deberán tomarse precauciones para eliminar el peligro de incendio durante el manejo.

2.8. Rehabilitación de pavimentos.

Al estar operando una obra, se va deteriorando, presentando diferentes condiciones de servicio a través de los años. Los deterioros que se van teniendo, al principio pueden ser pequeños, pero pueden ser la causa de problemas serios en la obra, que aceleren su falla, por lo que, para que una obra proporcione un servicio adecuado requiere de diferentes trabajos de mantenimiento como son:

Mantenimiento normal preventivo, reconstrucciones aisladas, rehabilitación y reconstrucción (Olivera, 2000).

El mantenimiento normal o preventivo se proporciona en aquellos tramos que no se presentan deformaciones ni agrietamientos fuertes, se llevan a cabo por medio de riegos de sello, dentro de este tipo de conservación rutinaria o normal se encuentran todos aquellos trabajos de bacheo y renivelaciones ligeras, además de los señalamientos.

Las reconstrucciones aisladas se realizan en aquellos tramos que están dañados, estos tramos pueden tener longitudes de 50 a 300 metros, se puede tratar de renivelaciones con mezcla asfáltica, sobre-encarpetamientos y aún de trabajos en las capas de terracerías o algunas otras de las capas superiores.

La rehabilitación se tiene cuando en un tramo importante de 5, 10 o más kilómetros se tienen fallas generalizadas predominando fuertes deformaciones y agrietamientos, y se dan los mismos tratamientos que en las reconstrucciones aisladas. Cuando el camino se encuentra en muy malas condiciones y el tránsito se ha aumentado de un modo considerable, lo conveniente es realizar su reconstrucción, que a menudo requiere un trazo topográfico para corregir el proyecto geométrico.

2.8.1. Reciclado en frío con emulsiones asfálticas.

El reciclado de los pavimentos es una técnica de la construcción de caminos que se ha puesto al servicio de los ingenieros y contratistas, para poder rehabilitar las carreteras con un bajo costo constructivo y que tiene las siguientes ventajas:

- El material pétreo existente en los pavimentos se reutiliza.
- No hay que triturar o extraer nuevos materiales pétreos, ecológicamente es mucho mejor.

- El transporte de materiales pétreos a la obra no existe.
- El asfalto en el pavimento se recupera en cuando menos 50%.
- El período de construcción es menor.
- Los gastos administrativos bajan considerablemente.

Este método de construcción trata de cómo reutilizar los pavimentos existentes, construyendo bases estabilizadas con emulsión asfáltica, lo que permite bajar los costos de construcción.

Para realizar esta operación, hay máquinas diseñadas para disgregar la carpeta y/o base por tratar, incorporan agua, emulsión y mezclan dejándola lista para su tendido y compactado. Se recomienda hacer la operación en dos pasadas, con el objeto de disgregar perfectamente el material por tratar y lograr la incorporación de agua de premezclado (+ cemento si se requiere) y la emulsión asfáltica (Rivera, 1997).

Hay que hacer notar que uno de los ligantes más fáciles de emplear, son las emulsiones por su manejabilidad a temperaturas ambiente. No es recomendable el empleo de rebajados asfálticos porque es imposible evaporar todos los solventes tan rápido como se requiere, además de que éstos en muchas ocasiones necesitan de aditivos para mejorar su adherencia.

Por definición un pavimento puede estar compuesto de las capas de sub-rasante, sub-base, base, carpeta y tratamiento superficial. Esta estructura debe de ser tal que soporte las cargas de los vehículos que transitan en el momento que se hace el diseño y el incremento que se estime durante el período de vida proyectado.

2.8.2. Maquinaria de reciclado empleada.

En la actualidad hay una lista bastante grande de máquinas de reciclado tanto americanas como europeas y todas dicen ser las mejores y con mayores ventajas

tales como Wirtgen, CMI, Caterpillar, etc., sin embargo, en México y en Latinoamérica en general, hay una preferencia por las marcas Wirtgen 2100 DCR o 1000 CR y Caterpillar ya sea la R-250, R-350 y la RM-350. Ésta preferencia está basada en la experiencia que se tiene en la construcción de caminos con esta maquinaria, que tiene un servicio de refacciones en cada ciudad importante de cada país (Rivera, 1997).

El constructor prefiere tener una maquinaria igual o parecida a cualquier otra en el mercado, pero que tenga la garantía de tener refacciones cuando se requieran localmente o en 48 horas vía aérea, lo que representa anualmente un ahorro muy importante en tiempos perdidos. También cuenta el hecho que las empresas tienen un patrimonio técnico que está basado en su personal que conoce las máquinas Wirtgen o Caterpillar.

No se descarta ninguna marca puesto que hay que darles el crédito que son buenas máquinas pero no hay una dinámica en lo que se refiere a las refacciones y servicio.

Por lo novedoso de este sistema constructivo y el auge que ha tenido, los métodos de diseño están un poco atrasados a las necesidades del momento, sin embargo hay ensayos y pruebas que se van a proponer para que los laboratorios especializados sean los que seleccionen el que crean más conveniente en cada caso.

2.8.3. Estudios previos al diseño de la mezcla asfáltica.

Antes de llevar a cabo el diseño de la mezcla asfáltica es necesario llevar a cabo una serie estudios previos como lo son: análisis de tránsito, evaluación del pavimento existente y pruebas a los materiales que componen la estructura del pavimento, en donde se determinan las características y propiedades mecánicas (VRS y módulo de reacción) de los materiales que componen el pavimento, así

como también se determina los tipos de daños físicos que tiene la superficie del pavimento.

2.8.3.1. Análisis de tránsito.

El objetivo de llevar a cabo un estudio de tránsito es conocer las principales características del tránsito como lo son volumen y tipo de vehículo para con ello obtener las cargas equivalentes. Para determinarlo se obtiene el tránsito diario promedio anual (TDPA), el cual se define como el número de vehículos que transitan por un camino en ambos sentidos durante un año dividido entre 365 días. Para determinar el TDPA, se cuenta en forma directa el tránsito, operación que se llama aforo y que puede realizarse por operarios o por contadores (Olivera, 2000).

Es necesario conocer la cantidad de vehículos de los diferentes tipos que circulan por los caminos. Se pueden dividir en grupos para hacer menos difíciles los cálculos; así se pueden dividir en vehículos tipo A, en los que se involucran todos los automóviles, las camionetas pick up y los que tengan un peso menor a 3 ton., los vehículos tipo B en el que quedan incluidos todos los autobuses y los vehículos tipo C, que son los camiones de carga de más de 3 ton. y que se desglosan en grupos, ya que tienen gran variedad de características, pues su peso total puede variar de 3 a 60 ton con diferentes combinaciones en la posición de sus ejes y llantas.

2.8.3.2. Evaluación del pavimento existente.

Es necesario determinar la situación en que se encuentra el pavimento en estudio, ya que de ahí se obtendrán consideraciones importantes en el diseño de la mezcla. Para hacer una evaluación del pavimento se da un seguimiento a los procedimientos mostrados a continuación.

Levantamiento físico de las condiciones actuales. Para lograr esto es necesario identificar cualquiera de los siguientes daños que pueden afectar el comportamiento de un pavimento:

- Levantamientos y expansiones de las capas de apoyo. Esto se realiza mediante una inspección visual.
- Fallas por fatiga, se evalúa visualmente, la cual produce en la superficie una textura del tipo piel de cocodrilo.
- Roderas en la ruta de tránsito de las llantas.
- Agrietamiento transversal y longitudinal que degenera en baches.
- Áreas de falla puntuales en proceso de desintegración y que causan el colapso de las carpetas de rodamiento.

Determinación del espesor actual del pavimento, características de los materiales que lo componen y propiedades mecánicas (VRS y módulo de reacción). El VRS es la relación en porcentaje que existe en la resistencia que el suelo en estudio pone a la penetración de 2.54 cm de una aguja estándar de 5 mm de diámetro y la opuesta por una grava triturada de buena calidad. La prueba de resistencia que se realiza a las capas de apoyo, es la prueba de placa con la que se encuentra el módulo de reacción, éste es igual a la relación de la presión proporcionada entre el promedio de las deflexiones medidas (Olivera 2000).

2.8.4. Diseño de la base estabilizada con asfalto.

El diseño de la base estabilizada consiste en la determinación del contenido mínimo y óptimo de producto asfáltico en la mezcla, de los que hay diversos métodos para su obtención, los cuales se explican detalladamente a continuación.

2.8.4.1. Determinación del contenido mínimo de producto asfáltico.

Para determinar el contenido mínimo de emulsión, se pueden emplear los métodos del Instituto del Asfalto (USA) o el Método Duriez (Francia).

$$\% E = \frac{\% CA}{\% \text{ residuo de la emulsión}}.$$

donde:

% E: Porcentaje de Emulsión asfáltica en la mezcla.

%CA: Porcentaje de Cemento Asfáltico.

Método del Instituto del Asfalto.

$$\%E = \frac{0.035a + 0.04b + Kc + F}{\%R}$$

donde:

%E = % de emulsión en la mezcla.

%a = % retenido en la malla 2.36 mm

%b = % que pasa la malla 2.36 mm

%c = % de agregado que pasa la malla 0.075 mm

K =:

0.15 si el % que pasa la malla 0.75 está entre 11 y 15%

0.18 si el % que pasa está entre 6 y 10%

0.20 si el % que pasa es 5% o menos

F = de 0 a 2.0% que varía según la absorción del material (0.7 a 1.0%)

%R = Residuo de asfalto en la emulsión.

Método de M. Duriez (Francia).

$$SE = \frac{0.237 * G + 1.60 * g + 12.85 * A + 117.80 * F}{100}$$

SE = Superficie específica.

G = % retenido entre las mallas 19.05 mm y 4.75 mm

g = % retenido entre las mallas 4.75 mm y 0.42 mm

A = % retenido entre las mallas 0.42 mm y 0.075 mm

F = % que pasa la malla 0.075 mm.

2.8.4.2. Determinación del contenido óptimo de producto asfáltico.

Una vez obtenido el contenido mínimo de asfalto para la mezcla se procede a determinar el porcentaje óptimo de asfalto. Las cantidades de cemento asfáltico que se van a emplear para los ensayos son:

% CA óptimo teórico y

% CA op. Teo. + 0.5%; + 1.0%; - 0.5%; - 1.0%

No hay un ensayo aceptado oficialmente por alguna institución Oficial, pero se han propuesto varias y son a las que nos vamos a referir: Compresión Simple con Pérdida de Estabilidad, Método Marshall Modificado y Método Argentino. También se hará mención del Método Marshall Modificado que Akzo Chemicals Inc. cita en algunas de sus publicaciones que se difunden como guía o sugerencia para sus usuarios y el Método Alemán que aparece en la revista Wirtgen especializada en reciclado y que a su vez es una modificación del L. P. C. Francés (Rivera, 1997).

Se debe de tener claro que los métodos mencionados, únicamente servirán para determinar el contenido óptimo de asfalto, peso volumétrico máximo compacto y su comportamiento en un medio húmedo.

Para determinar algún valor de soporte se tendría que evaluar con las pruebas C.B.R. o Hveen ya que no hay ninguna prueba aceptada oficialmente por el A.S.T.M. o el Instituto del Asfalto.

De antemano se conoce que el Valor de soporte que se obtenga para este tipo de mezcla, va a tener magníficos resultados y también es conocido que el factor de conversión con respecto al concreto asfáltico es: $F_c = 1 : 1.5$. A continuación se explica brevemente cada uno de estos métodos.

Prueba de compresión sin confinar y pérdida de estabilidad por inmersión.

- Prueba de compresión sin confinar.

La prueba de compresión sin confinar se utiliza para valorar la fatiga máxima que soporta un espécimen elaborado con dimensiones y condiciones de prueba normalizadas (Rivera, 1997).

Cumple dos objetivos, determinar por medio de una serie de ensayos con diferentes porcentajes de asfalto, el valor óptimo será evaluado comparativamente con la prueba de "Pérdida de estabilidad por inmersión" definiéndose de esta forma el porcentaje de asfalto que resiste mejor los efectos del agua durante la inmersión.

En general este procedimiento no se aplicará a mezclas que tengan menos del 10% de partículas del material pétreo que pasan la malla 19.05 mm ($\frac{3}{4}$ "), consideradas como textura abierta limitándose también su aplicación al caso de las mezclas conteniendo más de 12% de partículas retenidas en la malla 25.4 mm (1") y pasan 38.1 mm ($1\frac{1}{2}$ ").

Prueba de pérdida de estabilidad por inmersión.

Los especímenes elaborados con los mismos porcentajes de las series ensayadas en seco, se someten a inmersión durante 96 horas a la temperatura ambiente, después de transcurrido este tiempo se sacan de las tinas y se dejan escurrir, se seca el agua en exceso y se prueban en la máquina de compresión de igual forma que se hizo con los secos.

En este caso se tendrán los valores por triplicado y se sacará el triplicado de cada serie con el porcentaje de asfalto correspondiente.

$$P_{ha} = \frac{P_{h1} + P_{h2} + P_{h3}}{3}$$

La pérdida de estabilidad por inmersión se calcula de la siguiente forma:

$$\%P_i = \frac{P_s - P_h}{P_s} \cdot 100$$

$$\%P_i < 25\%$$

Para que se considere que un proyecto de mezcla es correcto la pérdida de estabilidad por inmersión no debe ser mayor al 25% con respecto al obtenido en seco. Por lo que se seleccionará el porcentaje de asfalto cuyo valor de estabilidad cumpla con este parámetro.

Método de Marshall (Modificado para ser usado en emulsiones).

La prueba Marshall es conocida desde hace mucho tiempo para el diseño y control de las mezclas asfálticas en caliente y sigue siendo una guía muy importante para determinar las características de éstas. Por la facilidad de diseño que tiene, se pensó utilizarla empleando como ligante las emulsiones asfálticas,

modificando la metodología del desarrollo de la prueba original, únicamente en lo que se refiere a la preparación de la mezcla (Rivera, 1997).

El método Marshall se emplea para el proyecto de mezclas elaboradas utilizando materiales pétreos con tamaños máximos que pasan la malla 25.4 mm (1") y emulsiones asfálticas que satisfagan los requisitos establecidos para cada caso.

El procedimiento consiste en elaborar especímenes cilíndricos a los cuales se les determina su peso específico, porcentaje de vacíos, estabilidad en sentido diametral y deformación (flujo) al alcanzar la máxima resistencia. Estas últimas determinaciones se hacen bajo condiciones desfavorables de humedad y temperatura.

Método Argentino.

El método Argentino es una variante de los métodos Francés y Alemán que emplean los moldes perforados, ya que consideran que el agua libre debe drenar por las partes superior e inferior de los especímenes, por lo que las perforaciones están localizadas en la parte inferior y superior de las placas de soporte y carga respectivamente (Rivera, 1997).

Método Marshall modificado (Akzo USA).

Puede emplearse el método ASTM D-75 para el muestreo de los materiales. Empléense los agregados a la temperatura ambiente. Determínese la humedad del material antes de emplearse.

Método oficial de la República Federal Alemana (Zusatzliche Technische ZTVT-StB 86).

Los laboratorios Alemanes están totalmente convencidos que no se puede emplear el método Marshall original para probar las mezclas con emulsión. La forma de compactación no permite desalojar el agua que contiene la mezcla, provocando un efecto de émbolo a resiliencia.

El Método Alemán fue inspirado en el método Duriez (Francés) empleando los moldes originales de la prueba Marshall, pero haciéndoles ciertas modificaciones. Se perforaron 24 hoyos de 2 mm de diámetro en forma de círculo en la placa de la base de compactación.

2.8.4.3. Determinación de la humedad óptima de mezclado

Esta se determinará haciendo pruebas de mezclado empleando el % óptimo teórico de emulsión previamente calculada (% op. teo.) Con diferentes cantidades de agua agregada al material pétreo. Se escogerá aquella que presente el mejor cubrimiento y trabajabilidad de la mezcla.

Con el agua óptima de mezclado se elaborarán tres especímenes de cada uno de los porcentajes de emulsión que se mencionan en el párrafo anterior.

Se determina el peso aproximado del material pétreo que pasa la malla 25 mm, necesario para elaborar cada uno de los especímenes para lo cual se tomará aproximadamente el peso volumétrico compacto de un espécimen de 10.16 cm de diámetro y 63.5 cm de altura con un volumen de 514 cm³.

Se debe de hacer la corrección de + 25% dado que la mezcla está húmeda y su peso volumétrico es menor.

2.9. Diseño de pavimentos flexibles.

Para llevar a cabo el diseño de un pavimento flexible se deben tomar en cuenta varios factores, como lo son:

1. Tránsito vehicular.

- Intensidad actual y futura (TDPA).
- Tasa de crecimiento anual.
- Clasificación o tipo de vehículos.
- Cargas por eje y presiones de inflado.

2. Determinación del VRS de diseño (Percentil de Diseño).

- Importancia del camino.
- Nivel de Conservación.
- Condiciones climáticas.
- Drenaje natural.
- Control de calidad de los materiales.
- Procedimientos de construcción.
- Factores políticos o criterios de decisión.

Para el diseño de pavimentos flexibles existen varios métodos, de los cuales algunos son: el Método del Cuerpo de Ingenieros, el Método del Instituto de Ingeniería y el Método del Instituto del asfalto, los cuales se basan principalmente en el Valor Relativo de Soporte (VRS) de los materiales que componen el pavimento.

III. METODOLOGÍA

3.1. Introducción.

Para el desarrollo de esta investigación es importante conocer los pasos que se siguen en su realización, con esto sabemos llevar un orden lógico que nos servirá como referencia conforme se vaya avanzando.

Para llevar a cabo este proyecto se seguirá una serie de procedimientos propuestos inicialmente, todo esto con el fin de diseñar una base asfáltica recuperada mediante el método de Marshall para ser usado con emulsiones, para aplicarlo en un tramo para su rehabilitación dadas las condiciones del pavimento existente, en Calle Sinaloa entre Blvd. Ignacio Ramírez y Calle 300, para al final del estudio obtener conclusiones certeras del experimento y poder dar un juicio objetivo y preciso de nuestro planteamiento del problema.

Se realizará un análisis de tránsito, necesario para conocer la cantidad y tipo de tránsito que tiene la avenida. Se hará una evaluación del pavimento existente, para ello se hará una inspección visual para detectar los daños existentes, se tomarán muestras del pavimento y a los materiales obtenidos se le efectuarán pruebas de calidad, también se le harán pruebas a la emulsión asfáltica.. Esta serie de estudios es necesaria para justificar la rehabilitación del tramo además de la obtención de datos de los materiales para realizar el diseño de la base estabilizada. Para el diseño de la base estabilizada se determinará el contenido mínimo y óptimo de asfalto. Finalmente se hará el diseño de las capas del pavimento y procedimiento constructivo de la rehabilitación.

3.2. Análisis de tránsito.

Las principales características del tránsito que necesitamos conocer y que se llevará a cabo para el proyecto son sus volúmenes, para determinarlos se utilizarán aforos por muestreo.

Para el estudio de tránsito se tomará el tramo de la calle en estudio. Se realizarán aforos que serán de 09:00 a 10:00 y de 17:00 a 18:00 hrs. como mínima demanda, de 10:00 a 12:00 hrs. como media demanda y de 12:30 a 14:30 hrs. como máxima demanda, tomando en cuenta los siguientes tipos de vehículos: A2, A'2, B2, B3, C2, T2-S1, T2-S2, T3-S2, T3-S3. Se aforará en 3 diferentes días de la semana que serán martes, sábado y domingo. Cabe señalar que se hará un aforo de tipo visual y el punto de aforo será a la mitad del tramo en estudio.

Una vez realizado lo anterior se determinará la clasificación vehicular, el Tránsito Horario (TH) y finalmente el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA).

3.3. Evaluación del pavimento existente.

Para tal efecto se procederá a efectuar un seguimiento a los siguientes estudios:

3.3.1. Levantamiento físico de las condiciones actuales.

Para lograr esto será necesario identificar los daños que presenta el pavimento, mediante una inspección visual, la cual se realizará tomando en cuenta las especificaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), y apoyándose con instrumentos como cámaras fotográficas, reglas, cinta métrica y otros.

Una vez efectuada la inspección visual del pavimento se podrán encontrar algunos de los siguientes daños:

- Levantamientos y expansiones de las capas de apoyo.
- Fallas por fatiga, la cual produce una textura del tipo piel de cocodrilo.
- Roderas en la ruta de tránsito de las llantas.
- Agrietamiento transversal y longitudinal que degenera en baches.
- Áreas de falla puntuales en proceso de desintegración y que causan el colapso de las carpetas de rodamiento.

3.3.2. Toma de muestras del pavimento.

Se procederá a tomar muestras del material de base, sub-base y capa sub-rasante así como una porción de carpeta asfáltica. Se realizará un solo muestreo para evitar mayor deterioro de la vía y se hará de acuerdo al lugar donde se considere que la muestra sea representativa.

Una vez realizado el muestreo se procederá a medir con una cinta métrica los espesores de las capas del pavimento, y se elaborará un croquis del lugar del muestreo.

3.3.3. Pruebas a los materiales.

Una vez llevado a cabo el muestreo se efectúan las pruebas necesarias para conocer las propiedades de los materiales recuperados.

A la *carpeta asfáltica* se le hacen las pruebas siguientes:

- % de asfalto mediante el método de “Extracción Centrífuga” (Norma SCT-012-I.04).
- Peso Volumétrico Compacto (Norma SCT-012-E.06)
- Granulometría (Norma SCT-109-07).
- Densidad y absorción (Norma SCT-109-06).
- % Equivalente de Arena (Norma SCT-109-09).

Al material de sub-rasante recuperado se le hacen las siguientes pruebas:

- Granulometría (Norma SCT-109-07).
- Plasticidad (Norma SCT-109-08).

Al material de base y sub-base recuperado se le hacen las siguientes pruebas:

- Granulometría (Norma SCT-109-07).
- Plasticidad (Norma SCT-109-08).
- Densidad y absorción (Norma SCT-109-06).
- % Equivalente de Arena (Norma SCT-109-09).

Además se procederá a obtener la emulsión asfáltica de tipo catiónico, para ello se visitará la planta de concreto asfáltico que tiene la empresa Ingenieros Civiles S. A. (ICSA) en donde se solicitará una pequeña cantidad. A la muestra obtenida se le hará la prueba de densidad (Norma SCT-111-07.15) y porcentaje de residuo asfáltico (Norma SCT-111-07.10). Estos valores serán necesarios para el diseño de la mezcla asfáltica.

3.4. Diseño de la base estabilizada con asfalto.

El diseño de la base estabilizada consistirá en la determinación del contenido mínimo y óptimo de producto asfáltico en la mezcla.

3.4.1. Contenido mínimo de producto asfáltico.

Para obtenerlo se usará el método del Instituto del Asfalto el cual se basa en la siguiente fórmula:

$$\%E = \frac{0.035a + 0.045b + Kc + F}{\%R}$$

donde:

%E = % de emulsión en la mezcla.

%a = % retenido en la malla 2.36 mm

%b = % que pasa la malla 2.36 mm

%c = % de agregado que pasa la malla 0.075 mm

K =:

0.15 si el % que pasa la malla 0.75 está entre 11 y 15%

0.18 si el % que pasa está entre 6 y 10%

0.20 si el % que pasa es 5% o menos

F = de 0 a 2.0% que varía según la absorción del material (0.7 a 1.0%)

%R = % de residuo de asfalto en la emulsión.

3.4.2. Contenido óptimo de producto asfáltico.

Para determinar el contenido óptimo de producto asfáltico en la mezcla se utilizará el Método Marshall modificado para ser usado con emulsiones. Esta prueba

determinará, por medio de una serie de ensayos con diferentes porcentaje de asfalto, el valor óptimo de cemento asfáltico.

La prueba Marshall es conocida desde hace mucho tiempo para el diseño y control de las mezclas asfálticas en caliente y sigue siendo una guía muy importante para determinar las características de éstas. Por la facilidad de diseño que tiene, se pensó utilizarla empleando como ligante las emulsiones asfálticas, modificando la metodología del desarrollo de la prueba original, únicamente en lo que se refiere a la preparación de la mezcla.

El procedimiento consistirá en elaborar especímenes cilíndricos de 4 pulgadas de diámetro, los cuales se obtienen vertiendo la mezcla asfáltica, todavía caliente, en un molde, en el cual se le compacta por ambas caras con un martillo de compactación la cual será del tipo dinámico. Una vez hecho esto se les determinará su peso específico, porcentaje de vacíos, estabilidad en sentido diametral y deformación (flujo) al alcanzar la máxima resistencia. Estas últimas determinaciones se hacen bajo condiciones desfavorables de humedad y temperatura.

Cabe aclarar que este diseño se hará utilizando una emulsión asfáltica del tipo catiónico de rompimiento medio (RM-K), que es la más adecuada para este tipo de trabajo basándose en experiencia nacional y regional.

3.5. Diseño de las capas del pavimento y procedimiento constructivo de rehabilitación.

Una vez diseñada la mezcla se llevará a cabo el diseño de espesores de las capas del pavimento, en este caso no se puede utilizar ningún método establecido, ya que no se cuenta con los valores de VRS de las capas del pavimento, elementos indispensables para estos métodos.

Entonces se propondrá un espesor de carpeta asfáltica buscando cumplir con las condiciones establecidas y considerando que de antemano se conoce que el Valor de Soporte que se obtenga de una base estabilizada, va a tener valores muy altos y también que el coeficiente de equivalencia estructural con respecto al concreto asfáltico es: $F_c = 1 : 1.5$.

Se cuidará de no alterar el espesor del pavimento para no modificar los niveles de rasante y con ello evitar problemas de drenaje.

Finalmente, se propondrá un procedimiento constructivo para la rehabilitación, además del tipo de máquina recicladora que sea recomendable para nuestra región.

IV. RESULTADOS

4.1. Introducción.

Para el desarrollo de esta investigación es importante conocer los resultados de las pruebas propuestas anteriormente, con ello se busca tener las herramientas necesarias para fundamentar técnicamente nuestro trabajo y poder llegar a conclusiones más acertadas, además de proponer una solución objetiva y precisa a nuestro planteamiento del problema.

Con este proyecto se siguió una serie de procedimientos establecidos, a fin de diseñar una base asfáltica reciclada, dadas las condiciones del tramo, en Calle Sinaloa entre Blvd. Ignacio Ramírez y Calle 300, el croquis de localización se puede apreciar en la figura 4-1.

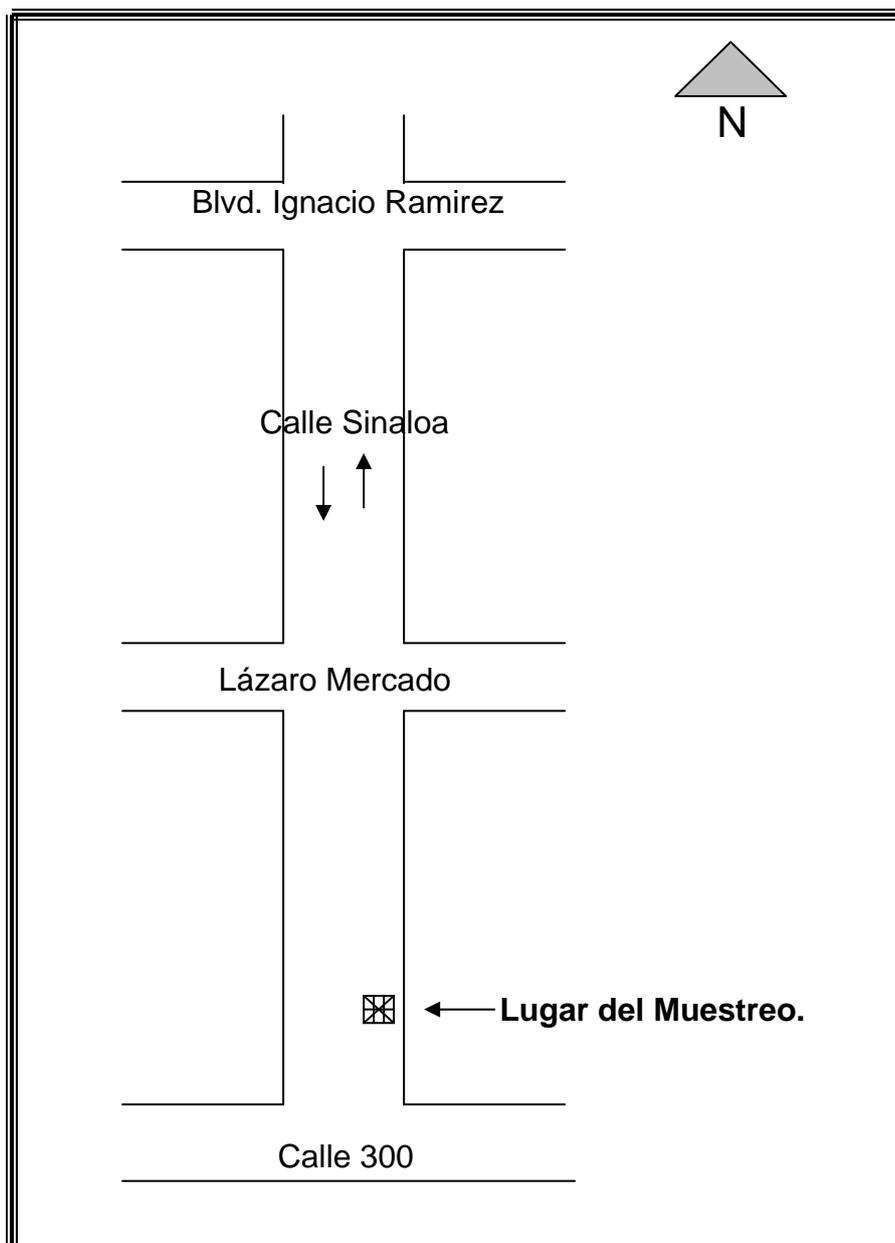


Figura 4-1. Croquis de localización del tramo en estudio.

4.2. Análisis de tránsito.

Para el estudio de tránsito se tomó el tramo de la calle en estudio. Se realizaron aforos de 09:00 a 10:00 y de 17:00 a 18:00 hrs. como período de mínima demanda, de 10:00 a 12:00 hrs. como media demanda y de 12:30 a 14:30 hrs. como máxima demanda, tomando en cuenta los siguientes tipos de vehículos: A2, A'2, B2, C2, T2-S1, T2-S2, T3-S2 y T3-S3, principalmente. Se aforó en 3

diferentes días de la semana, que fueron martes, sábado y domingo. Cabe señalar que se hizo un aforo del tipo visual y el punto de aforo fue a la mitad del tramo en estudio. En la tabla 4-1 se presentan los resultados que arrojó el aforo vehicular.

NOTA: En el anexo I se pueden consultar los resultados detalladamente.

Tabla 4-1. Resultados del aforo de tránsito vehicular.

Día	Hora					
	09:00-10:00	10:00-11:00	11:00-12:00	12:30-13:30	13:30-14:30	17:00-18:00
Martes	252	333	396	490	350	267
Sábado	317	471	504	509	504	324
Domingo	199	230	262	272	282	230

Para obtener el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) se requiere primero el Tránsito Horario (TH).

Total de 09:00 am a 10:00 am:

$$\{ (252 * 5 \text{ días}) + (317) + (199) \} / 7 = \mathbf{253} \text{ unidades promedio a la semana.}$$

Total de 10:00 am a 11:00 am:

$$\{ (333 * 5 \text{ días}) + (471) + (230) \} / 7 = \mathbf{338} \text{ unidades promedio a la semana.}$$

Total de 11:00 am a 12:00 pm:

$$\{ (396 * 5 \text{ días}) + (504) + (262) \} / 7 = \mathbf{392} \text{ unidades promedio a la semana.}$$

Total de 12:30 pm a 01:30 pm:

$$\{ (490 * 5 \text{ días}) + (509) + (272) \} / 7 = \mathbf{461} \text{ unidades promedio a la semana.}$$

Total de 01:30 pm a 02:30 pm:

$$\{ (350 * 5 \text{ días}) + (504) + (282) \} / 7 = \mathbf{362}$$
 unidades promedio a la semana.

Total de 17:00 pm a 18:00 pm:

$$\{ (267 * 5 \text{ días}) + (324) + (230) \} / 7 = \mathbf{269}$$
 unidades promedio a la semana.

Por lo tanto para obtener el Tránsito Horario Promedio, se promedian estos 6 valores:

$$\text{THP} = (253 + 338 + 392 + 461 + 362 + 269) / 6 = 345 \text{ unidades}$$

Tránsito Horario Promedio = **345 unidades**

Para determinar el TDPA se toman 14 horas como el tiempo representativo en que se presenta el tránsito promedio que sería de 07:00 am a 09:00 pm., este tiempo se determinó en base a observaciones hechas con anterioridad, en las que se pudo establecer los períodos de mínima, media y máxima demanda.

$$\text{TDPA} = (365) * (14) = 5,110 \text{ unidades}$$

Tránsito Diario Promedio Anual = **5,110 unidades** en ambos sentidos.

Cabe mencionar que el TDPA se calculó con los únicos datos obtenidos en dicho aforo, ya que no existe un registro en el que se muestre otro aforo realizado a la misma vía y tampoco el TDPA utilizado para el diseño de dicho pavimento. Es importante mencionar que aunque no haya otro estudio de este tipo realizado a la vía para hacer una comparación del aumento que ha tenido, este nos da una idea del tránsito vehicular actual y nos sirve a la vez para evaluarlo conforme a especificaciones. En la tabla 4-2 se muestra la clasificación vehicular obtenida.

Tabla 4-2. Clasificación vehicular.

Vehículo	Descripción	unidades	% unidades
A2	automóvil, pick-up	5259	84.9
A'2	doble rodado y hasta 3 ton.	173	2.8
B2	autobús 2 ejes	329	5.3
B3	autobús 3 ejes	0	0.0
C2	camión 2 ejes	114	1.8
C3	camión 3 ejes	258	4.2
T2-S1	tractor 2 ejes, semi-remolque 1 eje	0	0.0
T2-S2	tractor 2 ejes, semi-remolque 2 ejes	6	0.1
T3-S2	tractor 3 ejes, semi-remolque 2 ejes	33	0.5
T3-S3	tractor 3 ejes, semi-remolque 3 ejes	23	0.4
Total		6195	100

4.3 Evaluación del pavimento existente.

Para tal efecto se procedió a dar un seguimiento a los siguientes procedimientos o pruebas previas.

4.3.1. Levantamiento físico de las condiciones actuales.

Para el levantamiento físico fue necesario identificar los daños que presentaba el pavimento, mediante una inspección visual, la cual se realizó tomando en cuenta las especificaciones de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), y apoyándose con instrumentos como cámaras fotográficas, reglas, cinta métrica y otros.

A continuación se presentan las fallas observadas y consideradas más críticas, cabe mencionar que solo fue considerado el tramo comprendido de la calle Sinaloa entre Blvd. Ignacio Ramírez y calle 300. En la figura 4-2 se muestra la fotografía de una falla por hundimiento en alcantarilla, las cuales son muy comunes en los pavimentos deteriorados.



Figura 4-2. Fallas en alcantarillas (hundimientos).

El origen de esta falla puede ser por cambios volumétricos del cuerpo del terraplén y por una compactación inadecuada, la solución sería dar una buena compactación, esta falla se presentó moderadamente.

En la figura 4-3 se aprecian fallas de tipo surco, que corren de manera longitudinal a la vía. La causa puede ser baja estabilidad de la carpeta o carpeta mal compactada, la solución sería tender una carpeta de mayor calidad, este problema se presentó muy frecuentemente.



Figura 4-3. Fallas tipo surco.

En la figura 4-4 se pueden observar pequeños baches y desprendimientos, su origen puede ser la falta de resistencia de la carpeta, escasez de contenido de asfalto, espesor deficiente o drenaje deficiente; la solución sería tender una carpeta de mayor calidad o mayor espesor. Este problema se presentó con mucha frecuencia.



Figura 4-4. Fallas tipo bache y desprendimientos.

Y finalmente en la figura 4-5 se pueden observar desprendimiento de agregado, la causa puede ser la dosificación inadecuada del ligante o espesores insuficientes, la posible solución sería tender carpeta de mayor calidad o mayor espesor. Este problema se presentó moderadamente.



Figura 4-5. Desprendimiento de agregado.

Como se puede observar en las fotografías, son muchas las fallas que ocasionan un funcionamiento inadecuado para la vía, y aún más si se tiene en cuenta que es una vía principal. Debido a su magnitud, podemos suponer que las causas que están provocando la mayoría de las fallas existentes, afectan toda la estructura del pavimento o, al menos, una gran parte de ésta.

4.3.2. Toma de muestras del pavimento.

Se procedió a tomar muestras del material de base, sub-base y capa sub-rasante así como una porción de carpeta asfáltica, ver figura 4-6. Se realizó un solo muestreo para evitar mayor deterioro de la vía y se hizo de acuerdo al lugar donde se consideró que la muestra era representativa.



Figura 4-6. Muestreo de carpeta, base, sub-base y sub-rasante.

Una vez realizado el muestreo se procedió a medir con una cinta métrica los espesores de las capas del pavimento, lo que arrojó los resultados mostrados en la figura 4-7.

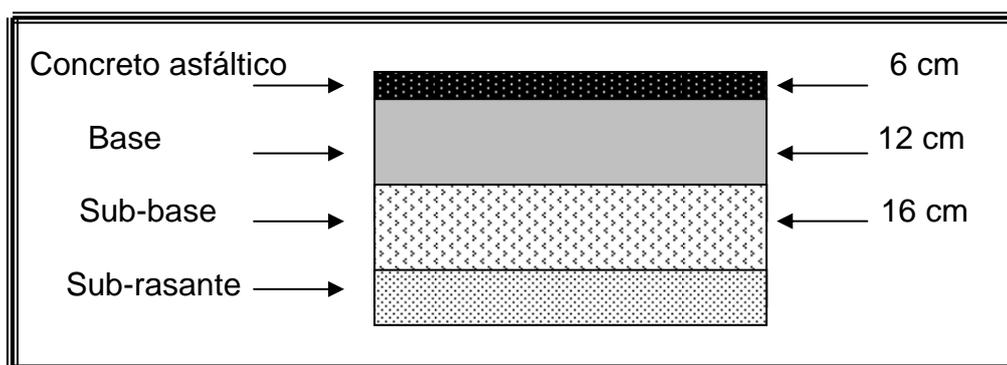


Figura 4-7. Espesores obtenidos de las capas del pavimento.

En resumen, el alto volumen de tránsito con un moderado porcentaje de vehículos pesados además del marcado deterioro del pavimento son elementos suficientes para justificar la rehabilitación del tramo y del uso de una base estabilizada. Por lo que se procederá a conocer las características de los materiales que componen al pavimento y el producto asfáltico a emplear para la estabilización.

4.3.3. Pruebas a los materiales.

4.3.3.1. Pruebas a la carpeta asfáltica.

Determinación del contenido de asfalto y agua en la carpeta asfáltica.

Para determinar el contenido de asfalto en la carpeta se usó el procedimiento de extracción o lavado por centrifugado establecido por la SCT, el cual consiste en lavar la carpeta con algún solvente en la máquina de centrifugado, ver figura 4-8.

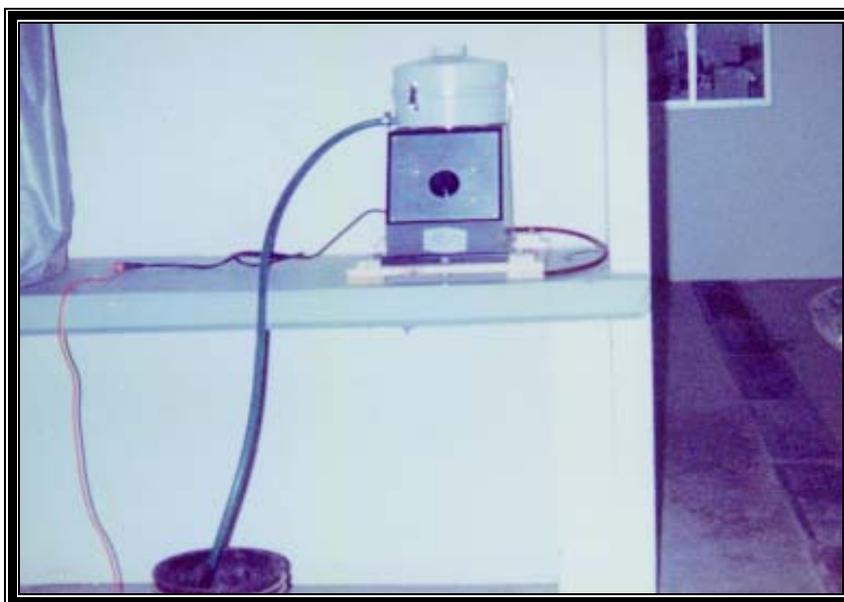


Figura 4-8. Lavado de carpeta por centrifugado.

Luego se utiliza la siguiente fórmula:

$$A = \left\{ \frac{W}{W_1 + (W'_p - W_p)} - 1 \right\} * 100$$

Donde:

A: Contenido de asfalto en la carpeta, en porcentaje

W: Peso de la muestra por lavar.

W_1 : Peso de la muestra lavada.

W'_p : Peso del filtro con finos.

W_p : Peso del filtro limpio.

Enseguida se introducen los valores obtenidos de la prueba en la fórmula:

$$A = \left\{ \frac{500 \text{ gr}}{480.2 \text{ gr} + (15.2 \text{ gr} - 13.0 \text{ gr})} - 1 \right\} * 100 = 3.65\%$$

Por lo tanto, el contenido de asfalto en la carpeta es de **3.65 %**.

Para obtener el contenido de agua en la carpeta se procedió a meter la muestra al horno durante 24 horas, esto con el fin de que se evaporara en agua contenida en la muestra. Para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$W = \frac{Pa}{Pm} * 100$$

Donde:

W: Contenido de agua en la carpeta, expresado en porcentaje.

Pa: Peso del agua contenida en la muestra.

Pm: Peso de la muestra húmeda.

Enseguida se introducen los valores obtenidos en la fórmula:

$$W = \frac{6.50 \text{ gr}}{879.20 \text{ gr}} * 100 = 0.74\%$$

Por lo tanto, el contenido de agua en la carpeta es de **0.74 %**. Cabe señalar que esta prueba se verificó varias veces.

Peso volumétrico compacto.

Para obtener el peso volumétrico compacto de la carpeta se impermeabilizó la muestra con polvo de licopodio para así poder sumergirla en el picnómetro y obtener el volumen desalojado. Se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$Pv = \frac{Pm}{Vm}$$

Donde:

Pv: Peso volumétrico compacto de la muestra.

Pm: Peso de la muestra compacta.

Vm: Volumen de la muestra compacta.

Enseguida se introducen los valores obtenidos de la prueba en la fórmula:

$$Pv = \frac{599.1 \text{ gr}}{266.3 \text{ cm}^3} = 2.25 \text{ gr/cm}^3 = 2,250 \text{ kg/m}^3$$

Por lo tanto, el peso volumétrico compacto de la carpeta es **2,250 kg/m³**. Cabe mencionar que este valor se verificó varias veces.

Granulometría.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de dicha prueba, los cuales se presentan a manera de resumen, ver tabla 4-3. La curva granulométrica de la carpeta asfáltica se muestra en la figura 4-9.

Tabla 4-3. Composición granulométrica de la carpeta asfáltica.

Malla	% Que pasa la malla
1"	100.0
3/4"	95.5
1/2"	88.3
3/8"	81.5
1/4"	62.4
No. 4	52.8
No.10	37.2
No. 20	27.0
No. 40	18.9
No. 60	15.0
No. 100	13.4
No. 200	12.6

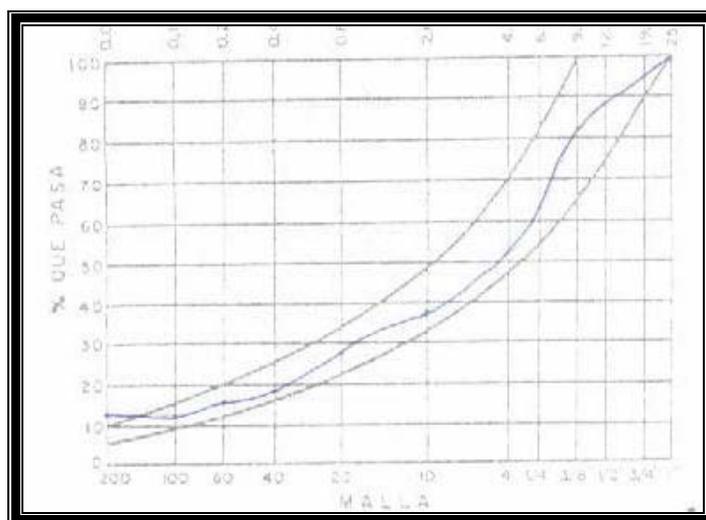


Figura 4-9. Curva granulométrica de la carpeta asfáltica.

Como se puede observar la curva se encuentra dentro de los límites establecidos, por lo tanto sí cumple con especificaciones.

NOTA: En el anexo II se pueden consultar los resultados completos de la composición granulométrica de la carpeta asfáltica.

Densidad y absorción.

En la Tabla 4-4 se muestran los resultados de las pruebas de densidad y absorción de las gravas en la carpeta.

Tabla 4-4. Densidad y absorción de las gravas en la carpeta asfáltica.

Prueba	Carpeta
Peso grava húmeda (gr)	200.00
Peso grava seca (gr)	198.00
Peso agua absorbida (gr)	2.00
Volumen desalojado (ml)	76.00
% de absorción	1.01
Volumen real de los sólidos (gr)	74.00
Densidad de masa Sm	2.61
Densidad de los sólidos Ss	2.68
% Absorción	1.01
Densidad	2.68

Prueba del equivalente en arena.

En la figura 4-10 se muestra la imagen de una prueba de equivalente en arena. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4-5.

Tabla 4-5. Equivalente en arena en la carpeta asfáltica.

Muestra	Lectura nivel superior arena (pulg)	Lectura nivel Superior arcilla (pulg)	Equivalente de arena (%)
1	3.60	5.10	70.59
2	3.30	4.55	72.53
		Promedio	71.56 %



Figura 4-10. Prueba de equivalente en arena.

El resultado obtenido es satisfactorio ya que cumple con las normas establecidas, el mínimo es de 40% y el obtenido es de 71.56%.

4.3.3.2. Pruebas a los materiales de base, sub-base y sub-rasante.

Granulometría.

A continuación se muestran los resultados de composición granulométrica en los materiales de base, sub-base y sub-rasante, los cuales se presentan a manera de resumen, ver tabla 4-6.

La curva granulométrica de los materiales de base y sub-base se muestran en las figuras 4-11 y 4-12, respectivamente.

NOTA: En el anexo II se pueden consultar los resultados completos de la composición granulométrica de base, sub-base y sub-rasante.

Tabla 4-6. Composición granulométrica de base, sub-base y sub-rasante.

Malla	Base % pasa	Sub-base % pasa	Sub-rasante % pasa
1"	88.3	89.9	-
3/4"	80.0	83.2	-
1/2"	73.4	78.9	-
3/8"	67.8	74.0	-
No. 4	50.9	57.8	-
No.10	41.2	48.5	96.8
No. 20	34.6	41.4	93.3
No. 40	27.2	32.9	88.8
No. 60	22.7	27.2	84.9
No. 100	19.9	23.6	80.8
No. 200	17.2	20.8	76.4

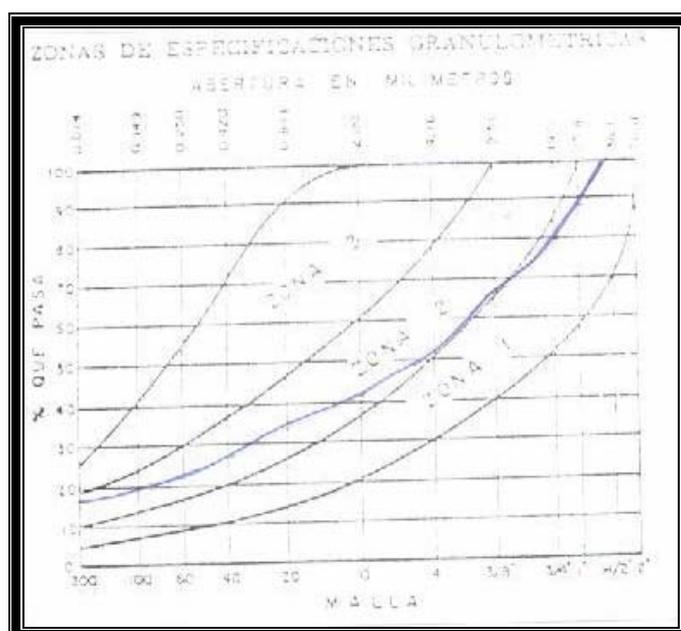


Figura 4-11. Curva granulométrica de la base.

Como se puede observar la curva se encuentra dentro de los límites de la zona 2, por lo tanto el material de base sí cumple con especificaciones.

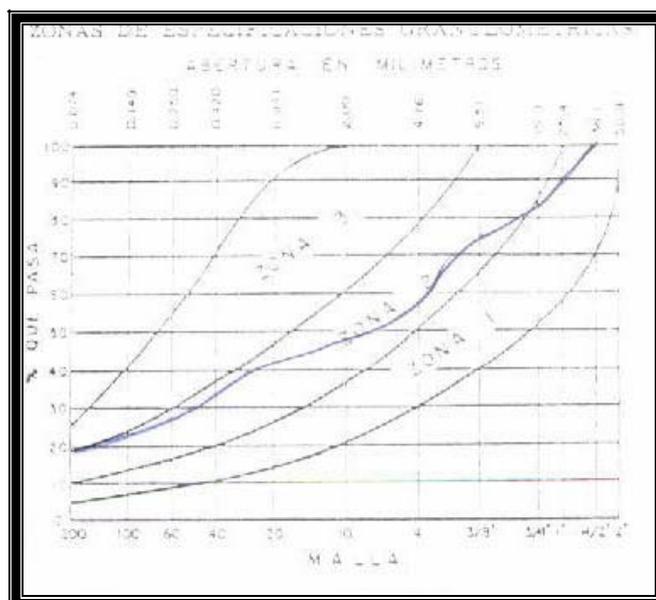


Figura 4-12. Curva granulométrica de la sub-base.

Como se puede observar la curva se encuentra dentro de los límites de la zona 2, por lo tanto el material de sub-base sí cumple con especificaciones.

Plasticidad.

Cabe aclarar que la prueba de límite líquido se efectuó mediante el método de cono.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de límites de plasticidad y contracción lineal en los materiales de base, sub-base y sub-rasante, los cuales se presentan a manera de resumen, ver tabla 4-7.

NOTA: En el anexo III se pueden consultar los resultados completos de las pruebas de plasticidad de base, sub-base y sub-rasante.

Tabla 4-7. Plasticidad y contracción lineal en Base, sub-base y sub-rasante.

Pruebas	Material		
	Base	Sub-base	Sub-rasante
Límite Líquido (%)	31.80	28.80	53.80
Límite Plástico (%)	16.15	17.42	9.76
Índice Plástico (%)	15.65	11.38	44.04
Contracción Lineal (%)	6.71	5.50	17.05

Con los resultados obtenidos y conforme a especificaciones, podemos observar que el material de base en cuanto al límite líquido no cumple, ya que la especificación indica un máximo de 30% y nuestro resultado fue de 31.8%, en contracción lineal se indica un máximo de 3.5% y nuestro resultado fue de 6.71%, por lo tanto no cumple.

En lo referente al material de Sub-base se puede observar cierta similitud, cumple con el límite líquido pero no cumple en contracción lineal. En el material de sub-rasante el límite líquido fue 53.8% y las especificaciones marcan un máximo de 100, por lo tanto si cumple.

Densidad y absorción.

En la Tabla 4-8 se muestran los resultados de las pruebas de densidad y absorción en el material de base.

Tabla 4-8. Densidad y absorción de las gravas de la base.

Prueba	Base	
Peso grava húmeda (gr)	500.00	500.00
Peso grava seca (gr)	496.70	496.30
Peso agua absorbida (gr)	3.30	3.70
Volumen desalojado (ml)	189.40	195.90
% de absorción	1.74	1.89
Volumen real de los sólidos (gr)	186.10	192.20
Densidad de masa Sm	2.62	2.53
Densidad de los sólidos Ss	2.67	2.58
Prom. % Absorción	3.63	
Prom. Densidad	2.63	

Prueba del equivalente en arena.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4-9.

Tabla 4-9. Equivalente en arena en el material de base.

Muestra	Lectura nivel superior arena (pulg)	Lectura nivel Superior arcilla (pulg)	Equivalente de arena (%)
1	2.20	8.60	25.58
2	2.00	10.00	20.00
		Promedio	22.79%

El resultado obtenido no es satisfactorio ya que no cumple con las normas establecidas, el mínimo es de 30% y el obtenido es de 22.79%.

4.3.3.3. Pruebas a la emulsión asfáltica.

Densidad.

Para determinar la densidad se usó la siguiente fórmula:

$$D = \frac{P_a}{V_a \gamma_o}$$

Donde:

D: Densidad del producto asfáltico (gr/cm³).

P_a: Peso del asfalto (gr).

V_a: Volumen del asfalto (cm³).

γ_o: Peso específico del agua (1 gr/cm³).

Sustituyendo en la fórmula:

$$D = \frac{98.5 \text{ gr}}{(100 \text{ cm}^3) * (1 \text{ gr/cm}^3)} = 0.985 \text{ gr/cm}^3$$

Por lo tanto la densidad de la emulsión es de **0.985 gr/cm³**. Cabe mencionar que este valor se verificó tres veces.

Contenido de residuo asfáltico.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4-10.

Tabla 4-10. Contenido de residuo asfáltico en la emulsión.

Muestra	W _t (gr)	W _f (gr)	Ra %
1	229.2	252.5	46.6
2	222.8	246.5	47.4
3	168.5	191.4	45.8
promedio			46.60%

4.4. Diseño de la base estabilizada con asfalto.

El diseño de la base estabilizada consiste en la determinación del contenido mínimo y óptimo de producto asfáltico en la mezcla.

4.4.1. Contenido mínimo de producto asfáltico.

Se tiene como dato que el peso volumétrico compacto de la carpeta es de 2,250 kg/m³ y de 1660 kg/m³ para la base, por lo que se hace la determinación del peso volumétrico del material granular de la carpeta, tomando en cuenta que la carpeta contiene 3.65% de asfalto:

$$PVC_{\text{agreg.}} = 2,250 \text{ kg/m}^3 - (2,250 \text{ kg/m}^3 * 0.0365) = 2,167 \text{ kg/m}^3.$$

Considerando que el espesor de la carpeta es de 6 cm y de la base es 12 cm, entonces la combinación de los materiales de la carpeta y la base es:

$$P_{\text{carpeta}} = (0.06 \text{ m}) * (1.0 \text{ m}) * (1.0 \text{ m}) * (2,167 \text{ kg/m}^3) = 130.07 \text{ kg} \quad (40\%)$$

$$P_{\text{base}} = (0.12 \text{ m}) * (1.0 \text{ m}) * (1.0 \text{ m}) * (1,660 \text{ kg/m}^3) = \underline{199.20 \text{ kg}} \quad (60\%)$$

$$239.27 \text{ kg}$$

Esta combinación de materiales de carpeta asfáltica y de base da como resultado la siguiente granulometría, ver tabla 4-11. La curva granulométrica del material mezclado se puede observar en la figura 4-13.

Tabla 4-11. Granulometría del material mezclado.

Malla	Carpeta % Pasa 40%	Base % Pasa 60%	Mezcla
1"	100.0	88.3	93.0
3/4"	95.5	80.0	86.2
1/2"	88.3	73.4	79.4
3/8"	81.5	67.8	73.3
No. 4	52.8	50.9	51.7
No.10	37.2	41.2	39.6
No. 20	27.0	34.6	31.6
No. 40	18.9	27.2	23.9
No. 60	15.0	22.7	19.6
No. 100	13.4	19.9	17.3
No. 200	12.6	17.2	15.4



Figura 4-13. Curva granulométrica del material mezclado.

Como se puede observar en la figura 4-13 la curva granulométrica se encuentra dentro de los límites de la zona 1 y 2, por lo que se cumple satisfactoriamente con las especificaciones.

Haciendo uso del método del Instituto del Asfalto el cual se basa en la siguiente fórmula:

$$\%E = \frac{0.035a + 0.045b + Kc + F}{\%R}$$

donde:

%E: % de emulsión en la mezcla.

%a: % retenido en la malla 2.36 mm

%b: % que pasa la malla 2.36 mm

%c: % de agregado que pasa la malla 0.075 mm

K:

0.15 si el % que pasa la malla 0.75 está entre 11 y 15%

0.18 si el % que pasa está entre 6 y 10%

0.20 si el % que pasa es 5% o menos

F: de 0 a 2.0% que varía según la absorción del material (0.7 a 1.0%)

%R: Residuo de asfalto en la emulsión.

Sustituyendo en la fórmula:

$$\%E = \frac{0.035 * (60.40) + 0.045 * (24.24) + (0.15) * (15.36) + (0.02)}{(0.466)} = 11.90\%$$

por lo tanto el contenido de emulsión en la mezcla es **0.119** $\frac{\text{kg. de emulsión}}{\text{kg. de agregado}}$

Pero hay que ajustar la cantidad de emulsión (Er) por tratarse de un material de carpeta que contiene una cierta cantidad de asfalto (Acr), esto haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$Er = \%E - \frac{(\%Acr * Pp)}{\%R}$$

donde:

Er: % de emulsión por agregar a la mezcla reciclada.

%E: Emulsión total mínima calculada por la fórmula del Instituto del Asfalto.

%Acr: Asfalto contenido en la carpeta reciclada.

Pp: Espesor expresado en decimal del pavimento reciclado.

%R: Residuo de asfalto en la emulsión.

Sustituyendo en la fórmula:

$$Er = 11.90 - \frac{(3.65\% * 0.34m)}{0.466} = 9.2\%$$

Por lo tanto la cantidad de emulsión por agregar a la mezcla es de **9.2%** en peso.

Transformando la cantidad de emulsión a cemento asfáltico:

$$\%CA = 9.2\% * 0.466 = 4.3\%$$

pero se debe agregar un 0.5% de desperdicio, por lo tanto:

El Contenido Mínimo de cemento asfáltico en la mezcla es **4.8%**.

4.4.2. Contenido óptimo de producto asfáltico.

Para determinar el contenido óptimo de producto asfáltico en la mezcla se utilizó el Método Marshall modificado para ser usado con emulsiones. Este método determina, por medio de una serie de ensayos con diferentes porcentaje de asfalto, el valor óptimo de cemento asfáltico.

Para ello elaboraron 5 muestras con 5 diferentes contenidos de asfalto, a su vez de cada muestra se hicieron 3 especímenes.

Los contenidos de asfalto en las diferentes muestras son los siguientes:

Muestra 1 Contenido mínimo - 1.0% CA

Muestra 2 Contenido mínimo - 0.5% CA

Muestra 3 Contenido mínimo neto

Muestra 4 Contenido mínimo + 0.5% CA

Muestra 5 Contenido mínimo + 1.0% CA

Las mezclas elaboradas se dejaron en reposo durante 24 horas para lograr su curado total y para que el asfalto en forma de emulsión desarrolle la cohesión y adhesividad como ligante, este curado se complementó dejando otras 24 horas la mezcla en hornos de temperatura controlable a 60°C hasta lograr peso constante.

Una vez efectuado el curado de la mezcla con cada uno de los porcentajes de asfalto, se procedió a elaborar las pastillas con el equipo de compactación, el cual consta de molde de compactación, sostén del molde y martillo de compactación, para ello se le dieron 75 golpes a cada lado de la pastilla, ver figura 4-14.

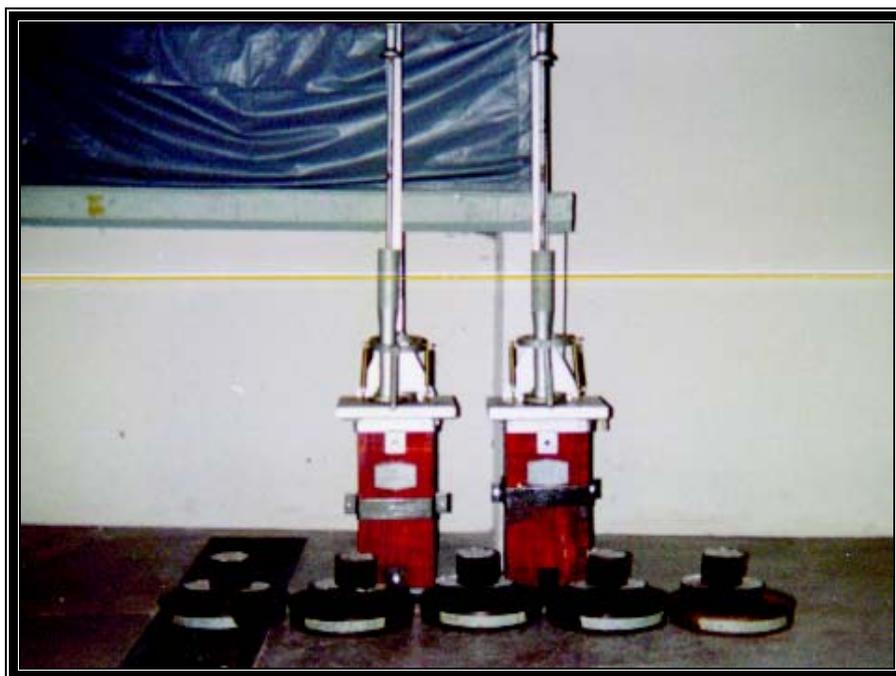


Figura 4-14. Equipo de compactación y muestras elaboradas.

Una vez elaboradas las pastillas se dejaron reposar durante 24 horas a temperatura ambiente. Para determinar el peso específico mediante su inmersión en agua, se cubrieron con estearato de zinc en polvo que tiene la propiedad de rechazar el agua evitando que esta penetre en el espécimen, ver figura 4-15.

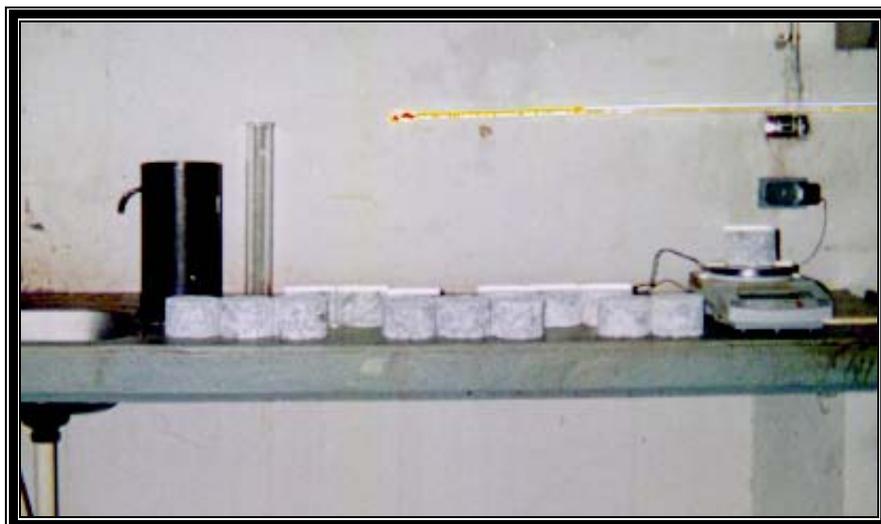


Figura 4-15. Obtención de peso específico en las muestras.

Para el ensaye se tomó uno a uno los especímenes que estaban a temperatura ambiente, se colocaron en la Prensa Universal de Compresión y se siguió el procedimiento normal especificado del ensaye hasta que ocurrió la falla, se registraron la carga máxima y la lectura del extensómetro, esta última como el valor de flujo en milímetros, ver figura 4-16.

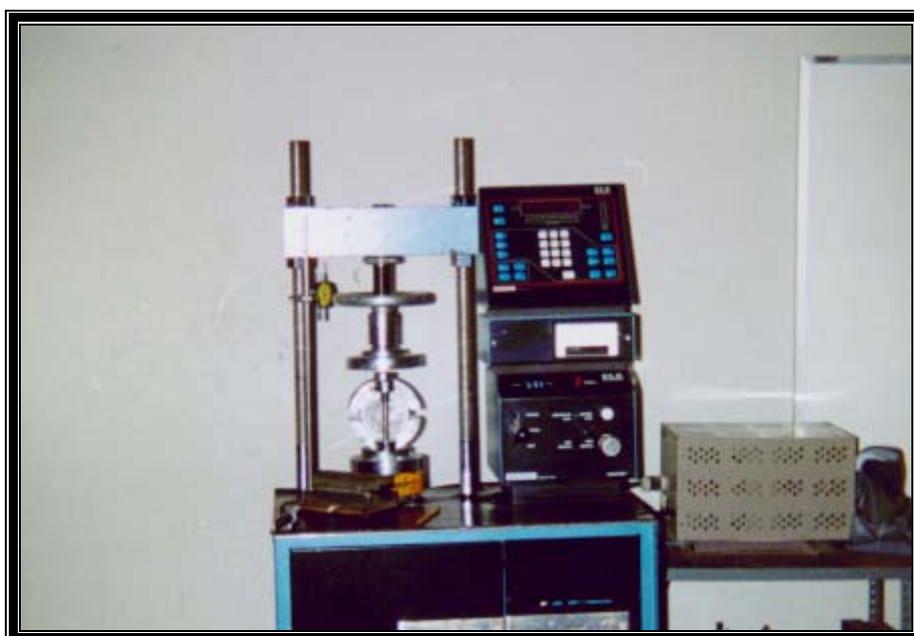


Figura 4-16. Ensaye de los especímenes en la prensa Universal.

Los resultados de las pruebas de estabilidad, densidad, flujo, % de vacíos y % VAM, se presentan en la tabla 4-12. Cabe aclarar que de cada muestra se promediaron los resultados de los tres especímenes.

NOTA: Los resultados completos de estabilidad, densidad, flujo, % de vacíos y % VAM se pueden consultar en el Anexo IV.

Tabla 4-12. Resultados de estabilidad, flujo, densidad, % de vacíos y %VAM.

Muestra	% C. A.	Estabilidad Promedio (kg)	Flujo Promedio (mm)	Peso Vol. Promedio (kg/m ³)	% de Vacíos Promedio (%)	% VAM Promedio (%)
1	3.8	794	3.4	2091	14.5	24.1
2	4.3	987	4.8	2118	13.7	23.5
3	4.8	1086	5.3	2147	12.4	21.8
4	5.3	1122	5.8	2178	10.4	22.2
5	5.8	1111	6.0	2152	9.5	23.5

Una vez determinados los valores de estabilidad, flujo, densidad, % de vacíos y %VAM de los cinco porcentajes de CA, se procedió a graficarlos ver figuras 4-17, 4-18, 4-19, 4-20 y 4-21.

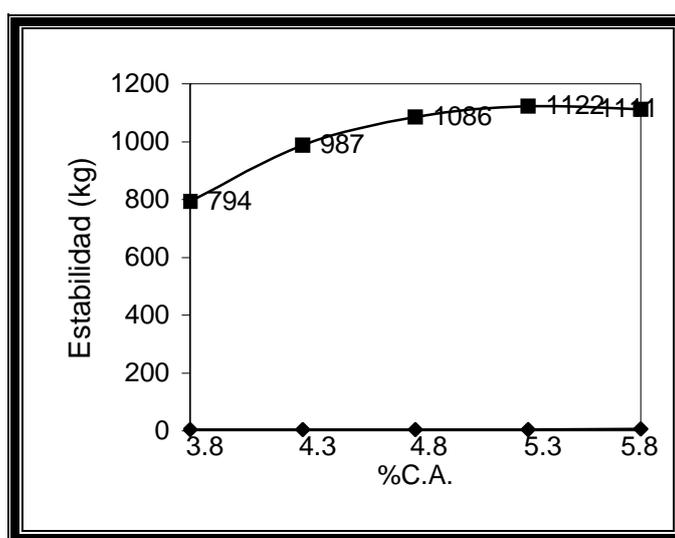


Figura 4-17. Gráfica de Estabilidad vs %C.A.

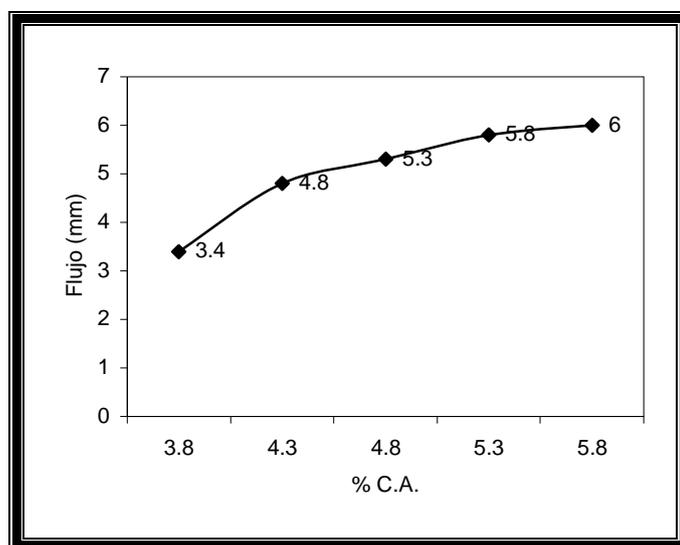


Figura 4-18. Gráfica de Flujo vs %C.A.

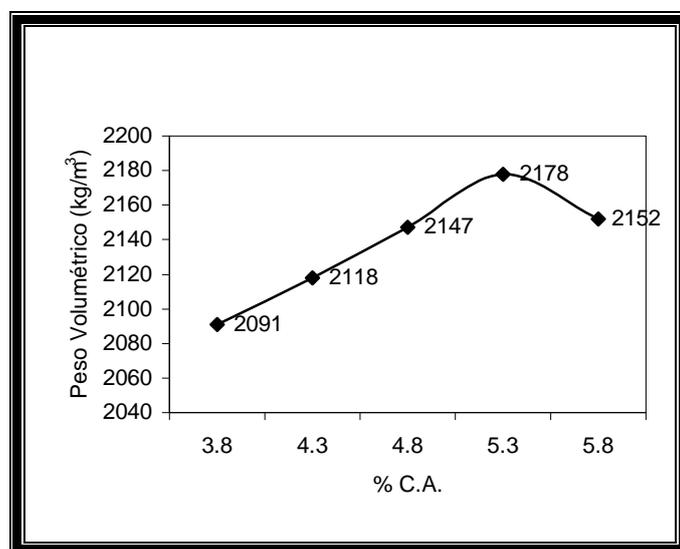


Figura 4-19. Gráfica de Peso Volumétrico vs %C.A.

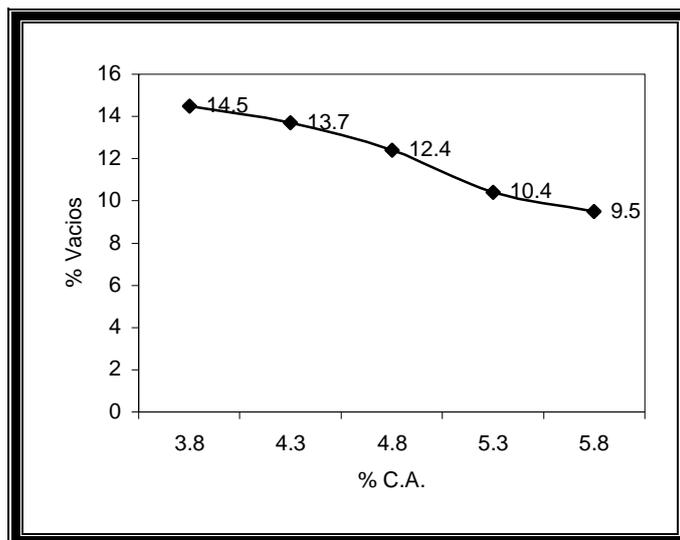


Figura 4-20. Gráfica de % de Vacíos vs %C.A.

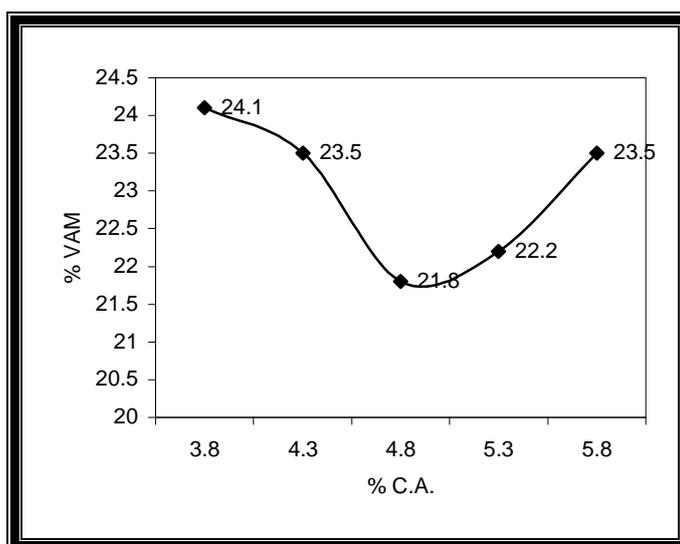


Figura 4-21. Gráfica de % V.A.M. vs %C.A.

De estas gráficas se determina cual será el porcentaje óptimo de asfalto que se deberá emplear, para lo cual se hicieron dos consideraciones: una basándose en el procedimiento descrito en las especificaciones de la SCT, el cual consiste en cumplir con el máximo de especificaciones para obtener el contenido óptimo de asfalto, ver tabla 4-13; y otra cumpliendo con el mínimo requerido de especificaciones ver tabla 4-14.

Tabla 4-13. % óptimo de asfalto con el máximo de especificaciones.

Características	Especificación	Datos Obtenidos	%C.A.
Peso específico (kg/m ³)	--	2178	5.3
% de vacíos	3 -- 8	--	--
Estabilidad (kg)	450 mínimo	1122	5.3
Flujo (mm)	2 -- 4.5	5.3	4.8
Promedio			5.1%

En los cálculos de la tabla anterior no se consideró el porcentaje de vacíos por no quedar dentro del rango especificado. Cumpliendo con el máximo de especificaciones se obtuvo un 5.1% de cemento asfáltico como contenido óptimo en la mezcla, pero para fines prácticos este valor no es recomendable ya que una base no requiere de tan alta estabilidad.

Tabla 4-14. % óptimo de asfalto con el mínimo de especificaciones.

Características	Especificación	Datos Obtenidos	%C.A.
Peso específico (kg/m ³)	--	--	--
% de vacíos	3 -- 8	--	--
Estabilidad (kg)	450 mínimo	450	3.3
Flujo (mm)	2 -- 4.5	3	3.6
Promedio			3.5%

En la tabla anterior no se consideró el valor del peso específico por no tener parámetros mínimos en que basarse, tampoco se consideraron los valores de porcentaje de vacíos por las razones antes mencionadas. Cumpliendo con el mínimo de especificaciones se obtuvo un 3.5% de cemento asfáltico como contenido óptimo en la mezcla. Este valor es más práctico, ya que sin descuidar los aspectos de resistencia y seguridad, se tiene una mezcla más económica.

Por lo tanto, se tomó el valor mínimo, **el Contenido Óptimo de Asfalto es 3.5%**.

4.5. Diseño de las capas del pavimento y procedimiento constructivo de rehabilitación.

Dado que de antemano se conoce que el Valor de Soporte que se obtenga de una base estabilizada, va a tener valores muy altos y también es conocido que su coeficiente de equivalencia estructural con respecto a un agregado pétreo compactado mecánicamente es: $F_c = 1 : 1.5$, (Rivera, 1997).

Tomando en cuenta esta consideración tan sólo con la base asfáltica se cumple con los requisitos de capacidad de carga que necesita este pavimento, dejando los mismos espesores de estructura existente, por lo que se deduce que sólo se requiere un recubrimiento superficial para la base o una carpeta asfáltica de un espesor mínimo.

Un aspecto muy importante, que no debe descuidarse, es que respete el espesor del pavimento existente para no crear problemas de drenaje al no respetar los niveles de rasante.

Por lo anterior se propone una micro-carpeta de concreto asfáltico de 2 cm como mínimo por especificación de la SCT, con un coeficiente de equivalencia estructural $F_c = 2.0$, por lo que se hacen los siguientes cálculos:

Carpeta = (2 cm de concreto asfáltico) * (2) = 4 cm en grava equivalente.

Sub-base existente = 16 cm

Base = 16 cm + 4 cm - 40 cm = 20 cm

Por lo tanto el espesor de base necesario para respetar el espesor existente de pavimento quedaría en:

Base estabilizada = 20 cm / 1.5 = 13.3 cm

Con este espesor de base estabilizada, sumando el de la micro-carpeta y la sub-base original, se tiene el equivalente en gravas que la estructura del pavimento

original, pero quedaría 2.7 cm abajo del nivel de rasante, por lo que el espesor final de la base estabilizada será de **16 cm**.

Con lo cual el pavimento queda estructurado de la siguiente forma:

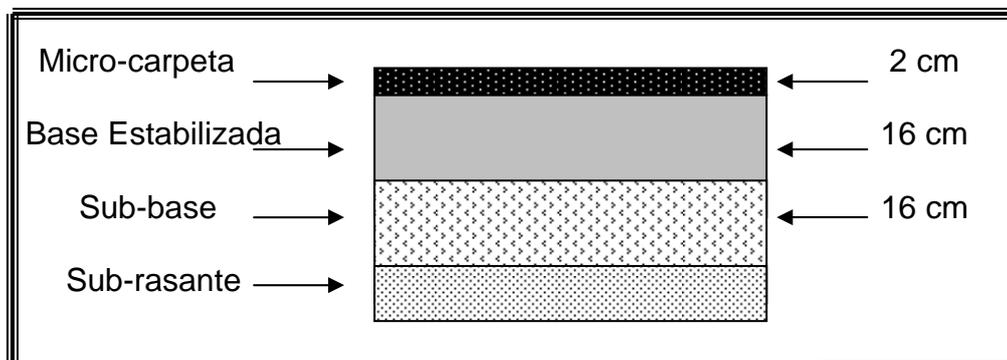


Figura 4-22. Espesores finales de las capas del pavimento.

Para el procedimiento constructivo se propone lo siguiente:

Para iniciar el proceso se debe recuperar y disgregar la carpeta y la base, para ello se propone utilizar una máquina recicladora tipo Cat RS-400, la cual efectuará el proceso en 2 pasadas, en la primera pasada la máquina disgregará la carpeta dejando una granulometría gruesa y en la segunda pasada se disgregará más el material dejándolo más manejable. La máquina cortará un espesor de 18 cm.

Una vez hecho esto se procede a incorporar la emulsión asfáltica y mezclar, para ello se sigue el mismo procedimiento de una mezcla elaborada en el lugar. Se extiende el material reciclado mediante motoconformadora, luego se incorpora la emulsión asfáltica empleando una petrolizadora a razón de 0.12 m^3 de emulsión asfáltica por cada m^3 de material reciclado, dado que con esta cantidad de emulsión el material queda muy manejable no es necesario añadir agua a la mezcla, una vez adicionada la emulsión se procede a homogenizar el material mediante motoconformadora, luego se extiende y acamellona para su curado,

para ello se deja reposar la mezcla durante 24 horas, tiempo en que se debe evaporar el agua contenida en la mezcla.

Una vez llevado a cabo el curado de la mezcla se extiende mediante motoconformadora buscando un espesor de 16 cm en la base estabilizada. Enseguida se lleva a cabo el proceso de compactación en el que se emplean dos tipos de compactadores, primero se emplea el rodillo liso vibratorio, el cual compacta de manera estática y por vibración; luego el rodillo neumático, el cual efectúa un tipo de amasado en el material para cerrar textura; y finalmente se vuelve a utilizar el rodillo liso para borrar las marcas dejadas por el rodillo neumático, se busca alcanzar un grado de compactación mínimo del 95%. Una vez compactada la base estabilizada esta queda lista para tender la nueva micro-carpeta asfáltica.

Para iniciar el proceso de tendido de la micro-carpeta asfáltica se procede a aplicar un riego de liga en la base estabilizada mediante petrolizadora, a razón de 0.5 lt/m² de asfalto rebajado de fraguado rápido (FR-3). Enseguida mediante una pavimentadora se tiende con un espesor de concreto asfáltico, de tal manera que se tenga un espesor compacto de 2 cm, dicho concreto no debe tener una temperatura menor de 90 °C y finalmente se compacta mediante el siguiente tren de compactación: rodillo liso que compacta a media rueda, rodillo neumático que cierra textura y finalmente rodillo liso que borra huellas del neumático, hasta alcanzar un grado de compactación de 95% como mínimo. Y para concluir con este proceso de rehabilitación se procede a pintar las líneas divisorias de los carriles.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

Con los resultados obtenidos sobre algunas pruebas de calidad de los materiales de las capas del pavimento del tramo en estudio se puede decir que no cumple estrictamente con las normas establecidas, lo que trajo como consecuencia que se tuvieran daños anticipados en el pavimento y fallas muy críticas. Aunado a los problemas de drenaje y la falta de conservación oportuna que presenta esta vía.

Además se pudo constatar con el estudio de tránsito que el pavimento en estudio recibe cargas de vehículos tipo trailer (T3-S3) así como altos volúmenes de tránsito, para los cuales no fue diseñada, por lo que con la rehabilitación propuesta se esta en posición de cumplir con la capacidad de carga requerida.

Se puede establecer que este tipo de rehabilitación aprovecha al máximo los materiales por reciclar, ya que se utilizó el asfalto y los agregados presentes en la carpeta reciclada lo que significa menores costos, ya que evita acarreos de material de desperdicio. Cabe mencionar que se requirió un bajo contenido de emulsión asfáltica para estabilizar la mezcla, lo que indica que con pocos materiales se obtienen grandes beneficios.

Otro punto importante es que una base asfáltica le da un apoyo estable a la carpeta asfáltica, dado que una carpeta de concreto asfáltico es de alta rigidez y con los problemas de drenaje existentes en la ciudad da como resultado que se reblandezca la capa de apoyo y por consiguiente que se fracture la carpeta, evitándose esto al colocar la base estabilizada.

Finalmente, se puede concluir que este tipo de rehabilitación es altamente recomendable para los pavimentos dañados de la ciudad, sobre todo las vías con altos volúmenes de tránsito pesado

5.2. Recomendaciones.

Es necesario señalar que para efectuar estudios de estas magnitudes se deben emplear todos los datos que se puedan recopilar del objeto en estudio, además se deben agotar todas las fuentes de información relacionadas, para así con ello tener las herramientas suficientes para obtener resultados confiables del estudio en turno.

Cabe mencionar que los pavimentos están diseñados para cumplir con un período de vida útil y que, en el transcurso de esta, sufren fallas o deterioros producidos por el clima, el intemperismo o por la misma acción de las cargas repetidas de los vehículos, por lo que lo ideal sería que se le diera mantenimiento preventivo a los pavimentos para evitar un rápido deterioro de estos.

Es importante implementar estudios de este tipo, ya que el seguir con procedimientos dirigidos desde un escritorio, que están basados más bien en una receta, que no toma en cuenta las características ni las necesidades reales, lo que da como resultado rehabilitaciones costosas o sobradas y que no satisfacen las necesidades de la población.

BIBLIOGRAFÍA

OLIVERA Bustamante, Fernando. Estructuración de Vías Terrestres. Segunda edición. Editorial CECSA. México, 2000.

FERNÁNDEZ Loaiza, Carlos. Mejoramiento y Estabilización de Suelos. Primera edición. Editorial LIMUSA. México 1991.

RIVERA E, Gustavo, Reciclado de Pavimentos en Frío. Primera edición. Editorial ALFAOMEGA. México 1997.

SECRETARIA de Comunicaciones y Transportes. Normas de Calidad de los Materiales. México 1998.

SECRETARIA de Comunicaciones y Transportes. Normas y Procedimientos de Conservación y Reconstrucción de Carreteras. Segunda edición. México 1997.

SECRETARIA de Comunicaciones y Transportes. Libro 6, Normas para Muestreo y Pruebas de los Materiales, Equipos y Sistemas. Pavimentos 2, Tomo 1 y 2. México 1991.

SECRETARIA de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. Catálogo de Deterioros en Pavimentos Flexibles de Carreteras Mexicanas. Publicación Técnica No. 21. México, 1991.

SECRETARIA de Comunicaciones y Transportes. Instructivo para Efectuar Pruebas en Materiales de Pavimentación. Volumen 2. México 1996.

ANEXO I

RESULTADOS DEL AFORO DE TRÁNSITO VEHICULAR.

Aforo del día sábado

Vehículo	09:00-10:00		10:00-11:00		11:00-12:00		12:30-13:30		13:30-14:30		17:00-18:00	
	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N
A2	133	116	181	203	217	208	228	196	259	163	129	143
A'2	6	3	9	4	10	6	8	8	10	7	7	5
B2	12	9	12	8	15	7	15	12	15	7	15	7
B3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2	7	4	12	9	5	6	6	5	6	4	3	2
C3	11	13	15	15	14	12	10	17	19	9	6	3
T2-S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2-S2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
T3-S2	1	1	0	1	0	1	2	1	1	1	0	1
T3-S3	1	0	1	1	2	0	0	0	1	1	2	1
	171	146	230	241	263	241	269	240	311	193	162	162
Total	317		471		504		509		504		324	

Aforo del día domingo

Vehículo	09:00-10:00		10:00-11:00		11:00-12:00		12:30-13:30		13:30-14:30		17:00-18:00	
	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N
A2	85	98	95	107	122	111	134	115	139	125	115	101
A'2	1	0	0	2	3	6	1	0	0	0	0	0
B2	6	5	10	4	7	5	9	6	6	4	5	4
B3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
C3	2	1	6	3	0	7	1	6	4	3	1	1
T2-S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2-S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T3-S2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
T3-S3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	95	104	113	117	133	129	145	127	149	133	122	108
Total	199		230		262		272		282		230	

Aforo del día martes

Vehículo	09:00-10:00		10:00-11:00		11:00-12:00		12:30-13:30		13:30-14:30		17:00-18:00	
	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N	N - S	S - N
A2	113	97	149	131	187	146	262	143	188	104	111	105
A'2	4	5	8	3	8	6	15	9	8	1	4	6
B2	14	6	14	6	14	6	14	7	15	7	15	6
B3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2	3	0	4	3	5	1	10	1	6	4	4	1
C3	4	2	8	6	7	11	10	6	8	5	8	4
T2-S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2-S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T3-S2	1	2	0	1	0	2	2	7	0	3	0	2
T3-S3	1	0	0	0	1	2	4	0	1	0	0	1
	140	112	183	150	222	174	317	173	226	124	142	125
Total	252		333		396		490		350		267	

ANEXO II

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS MATERIALES.

Material: Carpeta Asfáltica

Composición granulométrica del material retenido en la malla No. 4

Malla	Peso retenido parcial (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa la malla
1"	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.3	4.5	4.5	95.5
1/2"	31.0	7.2	11.7	88.3
3/8"	29.1	6.8	18.5	81.5
1/4"	82.1	19.1	37.6	62.4
No. 4	41.6	9.7	47.2	52.8
Pasa No. 4	226.8	52.8	100.0	0.0
Suma	429.9	100.0		

Composición granulométrica del material tamizado por la malla No. 4

Malla	Peso retenido parcial (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa la malla
No. 10	67.2	15.6	62.8	37.2
No. 20	43.8	10.2	73.0	27.0
No. 40	34.8	8.1	81.1	18.9
No. 60	16.7	3.9	85.0	15.0
No. 100	7.1	1.7	86.6	13.4
No. 200	3.2	0.7	87.4	12.6
Pasa No. 200	54.0	12.6	100.0	0.0
Suma	226.8	52.8		

Material: **BASE**

Composición granulométrica del material retenido en la malla No. 4

Malla	Peso retenido parcial (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa la malla
1"	373.3	11.7	11.7	88.3
3/4"	267.0	8.3	20.0	80.0
1/2"	210.6	6.6	26.6	73.4
3/8"	179.9	5.6	32.2	67.8
No. 4	539.4	16.8	49.1	50.9
Pasa No. 4	1631.6	51.0	100.0	0.0
Suma	3201.8	100.0		

Composición granulométrica del material tamizado por la malla No. 4

Malla	Peso retenido parcial (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa la malla
No. 10	38.2	9.7	58.8	41.2
No. 20	25.8	6.6	65.4	34.6
No. 40	29.1	7.4	72.8	27.2
No. 60	17.6	4.5	77.3	22.7
No. 100	10.9	2.8	80.1	19.9
No. 200	10.7	2.7	82.8	17.2
Pasa No. 200	67.7	17.3	100.0	0.0
Suma	200.0	51.0		

Material: **SUB-BASE**

Composición granulométrica del material retenido en la malla No. 4

Malla	Peso retenido parcial (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa la malla
1"	282.3	10.1	10.1	89.9
3/4"	186.4	6.7	16.8	83.2
1/2"	119.1	4.3	21.1	78.9
3/8"	136.9	4.9	26.0	74.0
No. 4	450.2	16.2	42.2	57.8
Pasa No. 4	1608.6	57.8	100.0	0.0
Suma	2783.5	100.0		

Composición granulométrica del material tamizado por la malla No. 4

Malla	Peso retenido parcial (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa la malla
No. 10	32.2	9.3	51.5	48.5
No. 20	24.4	7.1	58.6	41.4
No. 40	29.6	8.6	67.1	32.9
No. 60	19.7	5.7	72.8	27.2
No. 100	12.5	3.6	76.4	23.6
No. 200	9.7	2.8	79.2	20.8
Pasa No. 200	71.9	20.8	100.0	0.0
Suma	200	57.8		

Material: **SUB-RASANTE**

Composición granulométrica del material tamizado por la malla No. 4

Malla	Peso retenido parcial (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa la malla
No. 10	6.3	3.2	3.2	96.8
No. 20	7.1	3.6	6.8	93.3
No. 40	9.0	4.5	11.3	88.8
No. 60	7.8	3.9	15.2	84.9
No. 100	8.2	4.1	19.3	80.8
No. 200	8.7	4.4	23.6	76.4
Pasa No. 200	152.9	76.5	100.0	0.0
Suma	200.0	100.0		

ANEXO III

**PRUEBAS DE PLASTICIDAD DE BASE, SUB-BASE Y
SUB-RASANTE.**

Material: **BASE**

Límite Líquido

Tara no.	Peso tara	Tara + muestra húmeda	Tara + muestra seca	Peso agua	Peso seco	Contenido de agua en %	Penetración en mm		Penetración Promedio (mm)
1	52.3	132.9	114.6	18.3	62.3	29.37	15.0	15.1	15.1
2	51.4	152.6	128.1	24.5	76.7	31.94	20.3	20.3	20.3
3	52.1	140.0	116.5	23.5	64.4	36.49	32.2	32.0	32.1
4	52.2	103.6	91.9	11.7	39.7	29.47	16.2	16.1	16.2

Límite Líquido = **31.4%**

Límite Plástico

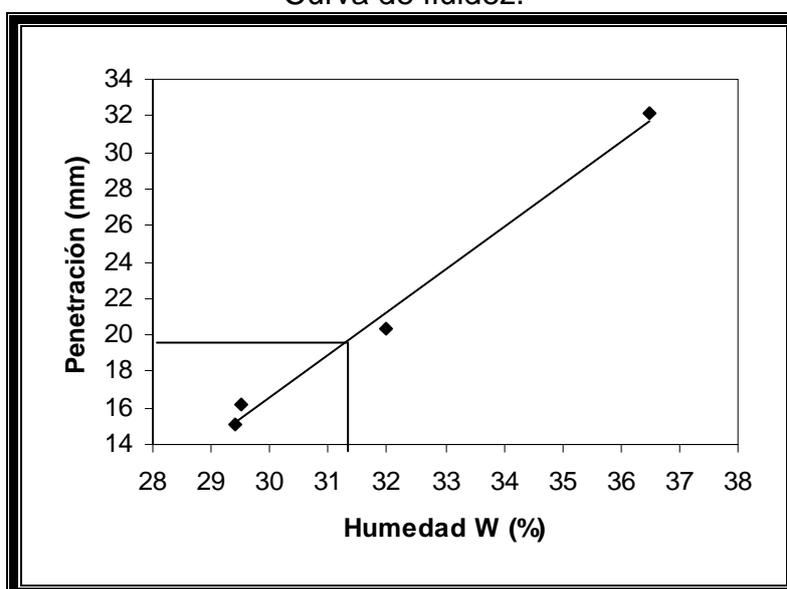
Tara no.	Peso tara	Tara + muestra húmeda	Tara + muestra Seca	Peso agua	Peso seco	Contenido de agua en %
1	52.2	55.9	55.4	0.5	3.2	15.63
2	51.7	55.1	54.6	0.5	3.0	16.67
Promedio						16.15

Índice Plástico = L.L. - L.P. = **15.25%**

Contracción Lineal

Cápsula no.	Longitud inicial (cm)	Longitud Final (cm)	Contracción lineal (%)
1	10.10	9.37	7.23
2	10.02	9.40	6.19
Promedio			6.71

Curva de fluidez.



Material: **SUB-BASE****Límite Líquido**

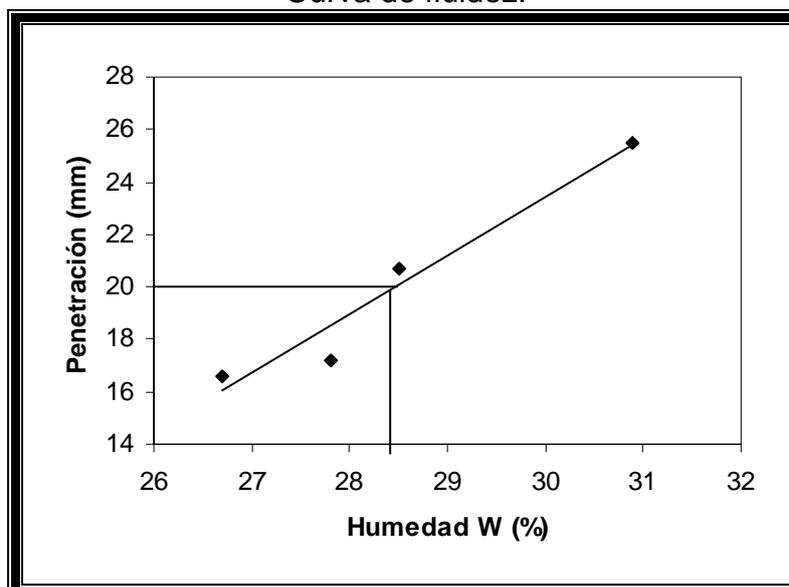
Tara no.	Peso tara	Tara + muestra húmeda	Tara + muestra seca	Peso agua	Peso seco	Contenido de agua en %	Penetración en mm		Penetración Promedio (mm)
1	51.7	98.7	88.8	9.9	37.1	26.68	16.6	16.6	16.6
2	51.6	117.3	103.0	14.3	51.4	27.82	17.3	17.1	17.2
3	51.7	107.2	94.9	12.3	43.2	28.47	20.5	20.8	20.7
4	52.2	128.9	110.8	18.1	58.6	30.89	25.5	25.5	25.5

Límite Líquido = **28.5%****Límite Plástico**

Tara no.	Peso tara	Tara + muestra húmeda	Tara + muestra Seca	Peso agua	Peso seco	Contenido de agua en %
1	51.1	53.7	53.3	0.4	2.2	18.18
2	51.6	55.9	55.4	0.5	3.0	16.67
Promedio						17.42

Índice Plástico = L.L. - L.P. = **11.08%****Contracción Lineal**

Cápsula no.	Longitud inicial (cm)	Longitud Final (cm)	Contracción lineal (%)
1	10.30	9.76	5.24
2	10.08	9.50	5.75
Promedio			5.50

Curva de fluidez.

Material: **SUB-RASANTE**

Límite Líquido

Tara no.	Peso tara	Tara + muestra húmeda	Tara + muestra seca	Peso agua	Peso seco	Contenido de agua en %	Penetración en mm		Penetración Promedio (mm)
1	51.1	97.1	83.0	14.1	31.9	44.20	10.6	10.7	10.7
2	52.7	97.2	82.5	14.7	29.8	49.33	16.1	16.3	16.2
3	51.7	101.8	84.5	17.3	32.8	52.74	20.2	19.5	19.9
4	52.2	91.6	76.9	14.7	24.7	59.51	26.0	25.2	25.6

Límite Líquido = **53.80%**

Límite Plástico

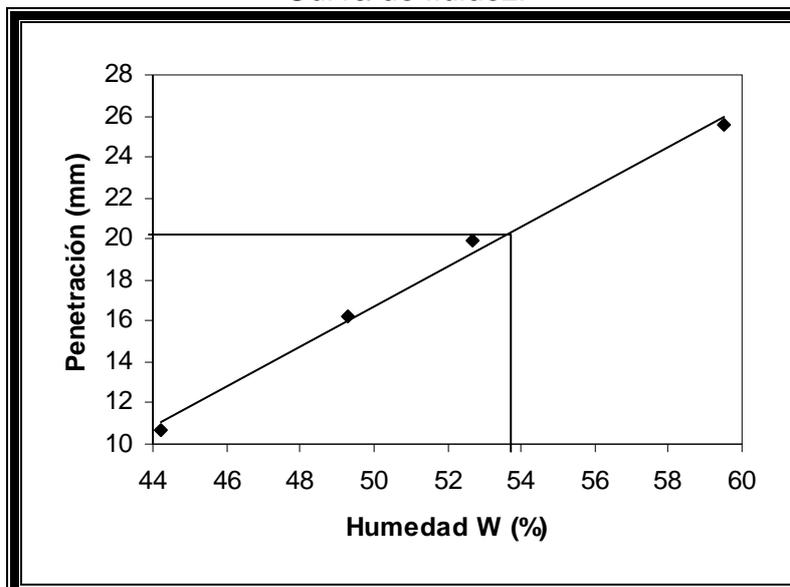
Tara no.	Peso tara	Tara + muestra húmeda	Tara + muestra seca	Peso agua	Peso seco	Contenido de agua en %
1	51.5	53.8	53.6	0.2	2.1	9.52
2	50.9	53.1	52.8	0.3	3.0	10.00
Promedio						9.76

Índice Plástico = L.L. - L.P. = **44.04%**

Contracción Lineal

Cápsula no.	Longitud inicial (cm)	Longitud Final (cm)	Contracción lineal (%)
1	10.00	8.30	17.00
2	9.83	8.15	17.09
Promedio			17.05

Curva de fluidez.



ANEXO IV

**DETERMINACIÓN DE ESTABILIDAD, FLUJO, % DE VACÍOS Y %
DE VAM PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA.**

Determinación del Peso Volumétrico

Muestra	no. Espécimen	% C.A.	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (gr)	Peso Vol. (kg/m ³)	Peso Vol. Promedio
1	1	3.8	10.20	81.71	6.85	534	1139.6	2134	2091
	2	3.8	10.20	81.71	7	570.7	1150.1	2015	
	3	3.8	10.20	81.71	6.8	538.7	1143.7	2123	
2	4	4.3	10.20	81.71	6.9	540.4	1152.2	2132	2118
	5	4.3	10.20	81.71	6.8	553.3	1155.5	2088	
	6	4.3	10.20	81.71	6.75	539.3	1150.6	2134	
3	7	4.8	10.20	81.71	6.85	511.9	1145.3	2237	2147
	8	4.8	10.10	80.12	6.5	518.9	1116.2	2151	
	9	4.8	10.20	81.71	6.4	522.7	1120.2	2143	
4	10	5.3	10.20	81.71	6.8	538.4	1167.9	2169	2178
	11	5.3	10.15	80.91	6.85	530.7	1157.8	2182	
	12	5.3	10.15	80.91	6.4	515.1	1125.2	2184	
5	13	5.8	10.15	80.91	6.6	534.3	1166.4	2183	2152
	14	5.8	10.20	81.71	6.8	540.8	1153.3	2133	
	15	5.8	10.20	81.71	6.8	543.8	1164.1	2141	

Determinación de la Estabilidad y el Flujo

Muestra	no.	% C.A.	Altura (cm)	Factor Corrección	Lecturas Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Estabilidad Corregida (kg)	Estabilidad Promedio (kg)	Flujo (mm)	Flujo
	Espécimen									Promedio (mm)
1	1	3.8	6.85	0.89	2115	960	855	794	3.4	3.4
	2	3.8	7.00	0.86	1880	854	734		5.1	
	3	3.8	6.80	0.90	2500	1135	1022		4.7	
2	4	4.3	6.90	0.88	2495	1133	997	987	4.8	4.8
	5	4.3	6.80	0.90	2390	1085	977		6.4	
	6	4.3	6.75	0.91	2960	1344	1223		6.3	
3	7	4.8	6.85	0.89	2300	1044	929	1086	5.8	5.3
	8	4.8	6.50	0.96	2445	1110	1066		5.8	
	9	4.8	6.40	0.98	2485	1128	1106		5.3	
4	10	5.3	6.80	0.90	2970	1348	1214	1122	5.8	5.8
	11	5.3	6.85	0.89	2550	1158	1030		6.5	
	12	5.3	6.40	0.98	3350	1521	1490		4.1	
5	13	5.8	6.60	0.94	3295	1496	1406	1111	3.0	6.0
	14	5.8	6.80	0.90	2730	1239	1115		6.0	
	15	5.8	6.80	0.90	2710	1230	1107		6.0	

Determinación del Porcentaje de Vacíos en el espécimen de mezcla asfáltica

Muestra	No. de Especimen	% de C.A.	Peso de C.A. (gr)	Peso Mezcla Asfáltica (gr)	Peso Retenido en 1/4" (gr)	Peso Pasa 1/4" (gr)	Pg %	Pf %	Pa %	Dg	Df	Da	D	P.V. (gr/cm ³)	E %	E % Promedio corregido
1	1	3.8	43.3	1139.6	529.5	566.8	46.5	49.7	3.8	2.65	2.65	0.985	2.49	2.134	14.3	14.5
	2	3.8	43.7	1150.1	534.4	572.0	46.5	49.7	3.8	2.65	2.65	0.985	2.49	2.015	19.1	
	3	3.8	43.5	1143.7	531.4	568.8	46.5	49.7	3.8	2.65	2.65	0.985	2.49	2.123	14.7	
2	4	4.3	49.5	1152.2	532.6	570.1	46.2	49.5	4.3	2.65	2.65	0.985	2.47	2.132	13.7	13.7
	5	4.3	49.7	1155.5	534.1	571.7	46.2	49.5	4.3	2.65	2.65	0.985	2.47	2.088	15.5	
	6	4.3	49.5	1150.6	531.8	569.3	46.2	49.5	4.3	2.65	2.65	0.985	2.47	2.134	13.6	
3	7	4.8	55.0	1145.3	526.6	563.7	46.0	49.2	4.8	2.65	2.65	0.985	2.45	2.237	8.7	12.4
	8	4.8	53.6	1116.2	513.3	549.4	46.0	49.2	4.8	2.65	2.65	0.985	2.45	2.151	12.2	
	9	4.8	53.8	1120.2	515.1	551.3	46.0	49.2	4.8	2.65	2.65	0.985	2.45	2.143	12.6	
4	10	5.3	61.9	1167.9	534.2	571.8	45.7	49.0	5.3	2.65	2.65	0.985	2.43	2.169	10.8	10.4
	11	5.3	61.4	1157.8	529.6	566.9	45.7	49.0	5.3	2.65	2.65	0.985	2.43	2.182	10.3	
	12	5.3	59.6	1125.2	514.7	550.9	45.7	49.0	5.3	2.65	2.65	0.985	2.43	2.184	10.2	
5	13	5.8	67.7	1166.4	530.7	568.1	45.5	48.7	5.8	2.65	2.65	0.985	2.41	2.183	9.5	9.5
	14	5.8	66.9	1153.3	524.7	561.7	45.5	48.7	5.8	2.65	2.65	0.985	2.41	2.133	11.6	
	15	5.8	67.5	1164.1	529.7	566.9	45.5	48.7	5.8	2.65	2.65	0.985	2.41	2.141	11.3	

Cálculo del porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) respecto al volumen del espécimen de mezcla.

Muestra	No. de Especimen	% de C.A.	Peso Mat. Pétreo (gr)	Peso Mezcla Asfáltica (gr)	Dr	P.V. (kg/m ³)	A	VAM %	VAM % Promedio
1	1	3.8	1096.3	1139.6	2.65	2134	0.962	22.5	24.1
	2	3.8	1106.4	1150.1	2.65	2015	0.962	26.9	
	3	3.8	1100.2	1143.7	2.65	2123	0.962	22.9	
2	4	4.3	1102.7	1152.2	2.65	2132	0.957	23.0	23.5
	5	4.3	1105.8	1155.5	2.65	2088	0.957	24.6	
	6	4.3	1101.1	1150.6	2.65	2134	0.957	22.9	
3	7	4.8	1090.3	1145.3	2.65	2237	0.952	19.6	21.8
	8	4.8	1062.6	1116.2	2.65	2151	0.952	22.7	
	9	4.8	1066.4	1120.2	2.65	2143	0.952	23.0	
4	10	5.3	1106	1167.9	2.65	2169	0.947	22.5	22.2
	11	5.3	1096.4	1157.8	2.65	2182	0.947	22.0	
	12	5.3	1065.6	1125.2	2.65	2184	0.947	22.0	
5	13	5.8	1098.8	1166.4	2.65	2183	0.942	22.4	23.5
	14	5.8	1086.4	1153.3	2.65	2133	0.942	24.2	
	15	5.8	1096.6	1164.1	2.65	2141	0.942	23.9	