



MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA
PRODUCIDA EN LA PLANTA DE ASFALTO TORCOROMA
(BAYUNCA), UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO POR
POLIMEROS

Álvarez Torres, Myriam Esther
Palencia Morales, José Enrique

López Salas, Yenny
Director

Universidad Tecnológica de Bolívar
Ingeniería Civil
Cartagena de Indias
2007

INTRODUCCIÓN

La producción de concreto asfáltico en el país se ha incrementado en los últimos cinco años, ya que el gobierno Colombiano ha entendido que el desarrollo de un país es directamente proporcional a la cantidad y calidad de las vías que permitan el fácil acceso de una región a otra. Por esta razón se ha visto la realización de proyectos de alta envergadura como la doble calzada Bogota-Girardot, el corredor de acceso rápido a la ciudad de Cartagena, el plan 2500 Km del Instituto Nacional de vías (INVIAS), y se avecinan muchas obras como son las diferentes concesiones viales que conectan las principales ciudades del país y la implementación de los sistemas de transporte masivo en las zonas metropolitanas de estas.

Por lo mencionado anteriormente las mezclas asfálticas deben brindar un mayor grado de confianza en su utilización, deben satisfacer las necesidades de los clientes y deben garantizar una mayor vida útil de la estructura del pavimento, condiciones que muy pocas veces cumplen los asfaltos utilizados en el país y mucho menos los empleados en la costa atlántica. Por esta razón se debe recurrir a la utilización de asfaltos modificados en los procesos de producción de mezclas cuyos agentes modificadores utilizados cambian el comportamiento reológico de los mismos y de esta forma mejoran características como la susceptibilidad térmica, las estabilidades, las deformaciones, las fallas a inmersión, etc. Se puede decir que un asfalto modificado es un ligante hidrocarbonado resultante de la interacción física y/o química de los polímeros con un betún asfáltico, siendo este modificador un relleno mineral, caucho, plástico o hidrocarburos naturales, siendo el objeto de esta investigación el polímero SBS.

Debido a esta demanda es necesario que los constructores de pavimentos comiencen a trabajar en la elaboración de mejores diseños que reduzcan los costos totales de una vía, aunque las inversiones iniciales sean un poco más altas. Con esto se quiere decir que la problemática que afecta las construcciones de carreteras en la actualidad es el tratar de economizar los costos iniciales del pavimento por razones como las licitaciones al precio más bajo o el poco presupuesto, excusas que llevan a que los materiales empleados en estas vías no sean de óptima calidad, y por ende las mezclas producidas tienen una menor vida útil.

Pese a que la utilización de las mezclas asfálticas en carreteras va en incremento, en Colombia no se tiene, y mucho menos en la Costa, un avanzado conocimiento científico de este material, razón por la cual todavía se usan métodos clásicos para el cálculo y diseño de estas mezclas, dando pie a que se cometan muchos errores a la hora de su concepción. Es necesario decir que las vías en la costa Atlántica tienen muy poca vida útil, se pueden encontrar vías “nuevas” o recién rehabilitadas con fallos y marcas de bacheos que reflejan la mala calidad de las obras (como es el caso de la vía María la Baja-San Onofre), casos que llaman mucho la atención y que hacen que las empresas de construcción despierten e inviertan en procedimientos de calidad y control. En la mayoría de los casos las vías no cumplen los periodos entre mantenimientos y mucho menos entre rehabilitaciones, haciendo que la obra en realidad resulte mucho más costosa de lo que se había planeado en su presupuesto inicial.

El proyecto busca la realización de un diseño de concreto asfáltico utilizando asfalto modificado que optimice todas las características de la mezcla actualmente empleada en la planta de asfalto Torcoroma (Bayunca-Bolívar), realizando todos los ensayos pertinentes y las evaluaciones respectivas para plantear la posible utilización de esta mezcla en proyectos que, como se comentaba anteriormente, exijan una mayor calidad como es el caso de la concesión doble calzada

Barranquilla-Cartagena, antigua vía la cordialidad que actualmente se encuentra en licitación. Cabe destacar que para el desarrollo de este proyecto se utilizaran los mismos materiales pétreos que se han venido empleando en la ciudad y con los cuales se lleva a cabo el proceso de producción de mezclas en la planta mencionada, y de esta forma poder establecer diferencias importantes entre la colocación o no de modificadores en el asfalto.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL: Mejorar la calidad de la mezcla producida en la planta de asfalto Torcoroma (Bayunca), utilizando asfalto modificado con polímero SBS.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar información de utilizaciones anteriores de asfaltos modificados con SBS en Colombia y el mundo.
- Localizar las canteras de agregados pétreos utilizados en la región y establecer contactos con productores de polímeros en Colombia.
- Elaborar un diseño de mezcla completo utilizando asfalto normal de penetración 60-70 y obtener todos sus parámetros de resistencia.
- Elaborar el diseño de mezcla utilizando asfalto modificado con SBS y determinar todas sus características mecánicas.
- Comparar los resultados obtenidos en los diferentes diseños realizados.
- Calcular los diferentes módulos dinámicos y los esfuerzos de fatiga de las mezclas calculadas a diferentes estados de temperatura.
- Calcular los espesores de una estructura de pavimento empleando como carpeta la mezcla obtenida con asfalto 60-70 y también la obtenida con asfalto modificado.

- Calcular los costos totales de la estructura de pavimento en un periodo de 10 años.
- Hacer una evaluación financiera y económica de los resultados obtenidos en los costos totales.
- Elaborar conclusiones y recomendaciones que permitan el uso del polimero SBS como modificador de mezclas asfálticas en la ciudad de Cartagena y en el departamento de Bolívar.

1. ASFALTOS

1.1 DEFINICION.

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe disolución. El petróleo crudo se destila para separar sus diversas fracciones y recuperar el asfalto. Procesos similares producidos naturalmente han dado lugar a yacimientos naturales de asfalto, en algunos de los cuales el material se encuentra prácticamente libre de materias extrañas, mientras que en otros esta mezclado con cantidades variables de minerales, agua y otras sustancias.

El asfalto es un material de particular importancia para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación.

En la prehistoria se han encontrado esqueletos de animales prehistóricos conservados intactos hasta nuestros días en depósitos superficiales de asfalto en el pozo La Brea, en Los Ángeles de California. Hacia el 3200 al 540 a.c., excavaciones arqueológicas indican el amplio uso del asfalto en Mesopotámica y en el valle del Indo como aglomerante para albañilería y construcción de carreteras y para capas de impermeabilización en estanques y depósitos de agua. En el 300 a.c. el asfalto se emplea extensamente en Egipto en los embalsamamientos. En el 1802 d.c. en Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras. Luego en el 1938 d.c. en Filadelfia se

emplea roca asfáltica importada en la construcción de aceras. Aproximadamente en el 1870 d.c. se realiza la construcción del primer pavimento asfáltico en Newark, Nueva Jersey, por el profesor E. J. DeSmedt, químico belga. En 1876 d.c. se construyó el primer pavimento de tipo sheet asphalt en Washington D.C., con asfalto de lago importado. En el año de 1902 d.c. en los Estados Unidos se obtienen de la destilación del petróleo, aproximadamente 20000 Ton. de asfalto por año. La mayoría de los asfaltos son obtenidos de la destilación del petróleo. Este se produce en una variedad de tipos y grados que van desde sólidos duros y quebradizos a líquidos casi tan fluidos como el agua. La forma semi-sólida conocida como betún asfáltico, es el material básico.

1.2 MODIFICACIÓN DEL ASFALTO.

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

1.3 EL ASFALTO EN LA CONSTRUCCION

Aunque en una mezcla asfáltica, el asfalto sea minoritario en proporción, sus propiedades pueden influir de manera significativa en su comportamiento. El tipo de mezcla será el que, en gran medida, determine la contribución hecha por el ligante sobre todo el conjunto. Generalmente, las propiedades de las mezclas con granulometría continua dependen del enclavamiento o trabazón de los áridos, mientras que las preparadas con altos contenidos de mortero asfáltico dependen más de la rigidez de la proporción de ligante, polvo mineral y arena.

A altas temperaturas de servicio, puede que el ligante llegue a reblandecerse, facilitando la deformación de la mezcla (ahuellamiento). El riesgo de aparición de estas deformaciones es aún mayor en pavimentos sometidos a la circulación de vehículos pesados. De manera generalizada y sin tener en cuenta otros factores que pueden influir, se puede disminuir la probabilidad de aparición de estas deformaciones aumentando la rigidez del ligante mediante el empleo de un asfalto más duro.

Por otro lado a temperaturas de servicios bajas, el ligante se vuelve relativamente rígido y va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible de fisuraciones. El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las sollicitaciones inducidas por el tráfico.

1.4 CARACTERISTICAS DE LOS ASFALTOS

Las propiedades físicas más importantes del cemento asfáltico, que son tenidas en cuenta en el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, son:

1.4.1 **Durabilidad:** Indica qué tanto permanecen en un cemento asfáltico sus características cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

1.4.2 **Adhesión y Cohesión:** Adhesión es la capacidad del cemento asfáltico para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del cemento asfáltico de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

1.4.3 **Susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento:** El endurecimiento del asfalto es causado por la combinación con el oxígeno (oxidación) o por volatilización. La oxidación y el endurecimiento más severo ocurren durante el mezclado, pues el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas.

1.4.4 **Susceptibilidad a la temperatura:** Esta es una de las propiedades más importantes del asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

1.4.5 **Viscosidad:** La viscosidad es la resistencia del material a fluir. No es una propiedad intrínseca del asfalto, es decir, depende de la temperatura y del tipo de ensayo que se realiza. En general, se puede medir la viscosidad cinemática o la dinámica. Las normas generalmente piden la viscosidad dinámica a 60 °C.

1.4.6 **Penetración:** La penetración es una medida de la consistencia del asfalto a la temperatura media de servicio, 25 °C. Sus valores son dados en décimas de milímetro. Los valores más comunes de nuestro asfalto son los de penetraciones desde 60 dmm hasta 90 dmm. Ver figura 1.

Figura 1. Penetrómetro



1.4.7 Índice de Penetración: Este valor proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad del cemento asfáltico a los cambios de temperatura. El índice de penetración se mide indirectamente y más comúnmente como resultado de un cálculo especial que se hace con los resultados de la penetración y el punto de ablandamiento.

1.4.8 Punto de Ablandamiento: Como los cementos asfálticos no tienen un punto de fusión definido, por ser materiales termoplásticos, se ha definido un punto de ablandamiento convencional, determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado de fluidez a la cual el asfalto no puede soportar una carga de una bola de acero dentro de un anillo, por lo que la prueba también se denomina “de anillo y bola”.

1.4.9 Ductilidad: La ductilidad es la capacidad para mantenerse cohesionado bajo las deformaciones inducidas por el tránsito. Se mide en un equipo denominado “ductilímetro”. El ensayo consiste en someter las muestras de asfalto a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en centímetros que se estira la probeta hasta el instante de rotura.

1.5 TIPOS DE ASFALTOS.

A la hora de buscar comportamientos globales satisfactorios de la mezclas bituminosas, la elección del asfalto adecuado para cada tipo de mezclas se vuelve un compromiso entre ambos extremos; ahuellamiento a altas temperaturas y fisuramiento por fragilidad térmica a bajas temperaturas. Donde mejorando el comportamiento a altas temperaturas, se influye negativamente en el comportamiento a bajas temperaturas.

En Colombia la empresa encargada de distribuir el cemento asfáltico es ECOPETROL, que cuenta con tres grandes refinerías. Ubicadas en la ciudad de Cartagena, Barrancabermeja y en Apiay respectivamente, siendo en la actualidad las dos ultimas las que distribuyen este tipo de producto. La refinería de Barrancabermeja produce en su mayoría asfalto 80-100 y la refinería de Apiay produce el asfalto 60-70. Para la elaboración del presente proyecto se utilizo en los diseños el asfalto 60-70, que tiene un mejor comportamiento en climas calidos y cuyas características mecánicas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades asfalto 60-70

Característica	Unidad	Método ASTM	Min.	Máx.	Resultado
Ductibilidad a 25 °C, 5 cm/min	cm	D 113	100		140
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s	mm/10	D 5	60	70	68
Punto de ablandamiento	°C	D 36	45	55	48.7
Punto de inflamación	°C	D 92	232		232
Solubilidad en Tricloroetileno	g/100g	D 2042	99		100
Pérdida de masa	g/100	D 2872		1	0.29
Índice de Penetración	NA				-1

1.6 MODIFICADOR DE ASFALTO SBS

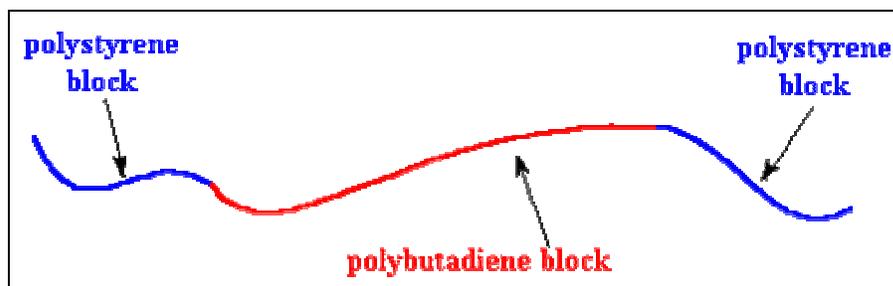
Cuando se trata de mezclas abiertas donde la durabilidad esta en juego, porque se disminuye la cantidad de mortero de la mezcla y por consecuencia la cohesión, se debe utilizar asfaltos modificados con polímeros ya que estos aportan a las mezclas la adherencia necesaria para ser resistentes al trafico. En este caso se trata de una mezcla cerrada MDC (mezcla densa en caliente) a la cual se le va a agregar un aditivo modificante que mejore todas sus propiedades. Se debe recordar que los factores propios que pueden limitar la durabilidad de una mezcla son básicamente tres: el envejecimiento, la fatiga y la deformabilidad. Se admite de manera general que los dos primeros están íntimamente ligados al contenido de ligante de la mezcla. Se debe entonces diseñar la mezcla con el mayor contenido de ligante posible, siempre que no se desatienda la capacidad de resistencia a la deformación plástica. Por esta razón en este caso de estudio, y atendiendo a las altas temperaturas que presenta el medio costero, se escogió el asfalto modificado con aditivo SBS (Estireno-butadieno-estireno), ver figura 2, ya que este brinda altas consistencias cuando sube la temperatura y proporciona también una alta cohesión entre partículas.

Figura 2. Asfalto modificado con SBS



El polímero (estireno-butadieno-estireno), o SBS, es un caucho duro, que se usa para hacer objetos tales como suelas para zapatos, cubiertas de neumáticos, y otros donde la durabilidad sea un factor importante de diseño. Es un tipo de copolímero llamado copolímero en bloque. Su cadena principal está constituida por tres segmentos. El primero es una larga cadena de poliestireno, el del medio es una cadena de polibutadieno, y el último es otra larga sección de poliestireno tal como lo muestra la figura 3.

Figura 3. Cadena del Polímero Estireno- Butadieno- Estireno



El poliestireno es un plástico duro y resistente y le da al SBS su durabilidad. El polibutadieno es un material parecido al caucho y le confiere al SBS sus características similares al caucho. Además, las cadenas de poliestireno tienden a agruparse formando grandes masas. Cuando un grupo estireno de una molécula de SBS se une a una de estas masas y la otra cadena de poliestireno de la misma molécula de SBS se une a otra masa, las diversas masas se ensamblan entre sí con las cadenas similares al caucho del polibutadieno. Esto le da al material, la capacidad de conservar su forma después de ser estirado.

El SBS es también un tipo de material inusual, llamado elastómero termoplástico. Estos son materiales que a temperatura ambiente se comportan como cauchos elastoméricos, pero cuando se calientan, pueden ser procesados como plásticos. La mayor parte de los cauchos son difíciles de procesar, porque están

entrecruzados. Pero el SBS y otros elastómeros termoplásticos se las arreglan para ser similares al caucho sin ser entrecruzados, por lo que resulta sencillo procesarlos para lograr curiosas formas útiles.

El asfalto modificado para el estudio fue suministrado por la empresa Shell, en su departamento de bitúmenes con la referencia MEXPHALTE PM TIPO II, y cuenta con las propiedades físicas que se representan en la tabla 2. (Cuadro comparativo de los dos asfaltos, ver anexo F).

Tabla 2. Características del Asfalto Modificado MEXPHALTE PM II

Característica	Unidad	Método ASTM	Min.	Máx.	Resultado
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s	mm/10	D 5	55	70	57
Punto de ablandamiento	°C	D 36	58		69
Punto de inflamación	°C	D 92	230		290
Solubilidad en Tricloroetileno	g/100g	D 2042	99		110
Pérdida de masa	g/100	D 2872		1	0.1038
Recuperación por torsión 25°C	%	NLT-329/91	40		60
Peso Especifico		D 71			1.006
Índice de Penetración	NA				0.5

2. MATERIALES PETREOS

2.1 DEFINICION

Un agregado pétreo es un material mineral duro e inerte usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento flexible. Los agregados se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de la mezcla asfáltica. El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento.

2.2 CLASIFICACION

Los agregados pueden ser naturales o procesados. De acuerdo con su tamaño, se dividen en gravas, arenas y relleno mineral (llenante mineral o filler). Los materiales pueden ser producidos en canteras abiertas o tomados de la ribera de los ríos (cantera de río). En este último caso son agregados pétreos aluviales. Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. La roca se tritura para volver angular la forma de la partícula y para mejorar la distribución (gradación) de los tamaños de las partículas.

2.3 PROPIEDADES

Los agregados pétreos deben cumplir las siguientes propiedades para ser considerado apropiado para una mezcla asfáltica:

2.3.1 Gradación y tamaño máximo de partícula: Se requiere que las partículas estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño esté presente en ciertas proporciones.

2.3.2 Limpieza: En los agregados existen materiales indeseables que le restan propiedades y afectan desfavorablemente el comportamiento del pavimento. Dentro de estos se tienen vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, materia orgánica, etc.

2.3.3 Dureza: Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla y las exigencias durante la vida de servicio del pavimento.

2.3.4 Forma de la partícula: La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla, la cantidad de fuerza necesaria para compactarla y la resistencia de la estructura del pavimento. Las partículas irregulares y angulares proporcionan las mejores características.

2.3.5 Textura de la superficie: Es un factor que determina la trabajabilidad, la resistencia final de la mezcla y las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Según la textura, los agregados pueden ser rugosos o lisos.

2.3.6 Capacidad de absorción: La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es un elemento importante de información, pues un agregado poroso requiere cantidades mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

2.3.7 Afinidad con el cemento asfáltico: Es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto.

2.4 ENSAYOS A LOS MATERIALES PETREOS

Al igual que el cemento asfáltico, los agregados pétreos deben pasar por una serie de ensayos que determinarán su calidad.

2.4.1 Índice de consistencia: Indica la capacidad de la fracción de arenas finas y llenante para retener agua.

2.4.2 Equivalente de arena: Es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz No.4.

2.4.3 Contenido de materia orgánica: Proporciona una estimación de la cantidad de materia orgánica presente en el agregado.

2.4.4 Desgaste en la máquina de Los Ángeles: El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando para ello la máquina de Los Ángeles con una carga abrasiva.

2.4.5 Solidez: Se usa para medir la resistencia de los agregados pétreos frente a la acción de sulfato de sodio o de magnesio, y representa la resistencia de los agregados pétreos frente a la acción de las condiciones ambientales.

2.4.6 Índice de aplanamiento y de alargamiento: Los índices son una indicación de la cantidad de material (porcentaje de agregado) cuyas medidas proporcionan una forma demasiado alargada o son demasiado planas para ser utilizadas en una mezcla asfáltica.

2.4.7 Porcentaje de caras fracturadas: Se determina el porcentaje, en peso, del material que presenta una o más caras fracturadas de las muestras de agregados pétreos.

2.5 MATERIALES UTILIZADOS EN PLANTA DE ASFALTO TORCOROMA

2.5.1 Arenas de Bayunca. Actualmente la empresa PMV se encuentra explotando dos canteras en la región cercana al municipio de Bayunca, la primera se encuentra localizada en la finca del señor Jesús Amaris y la segunda en la finca del señor Isidoro Blanco, canteras que arrojan materiales de similares características, ya que se encuentran separadas solamente por dos kilómetros de distancia. Para explotar estas canteras se deben evaluar varios aspectos que llevan a implementar una logística eficaz a la hora de la obtención del material, los cuales se detallan a continuación.

- **Ubicación.** El parámetro principal que define la escogencia o no de una cantera es la ubicación con respecto al sitio de trabajo, en este caso la planta de asfalto y las maquinas trituradoras y clasificadoras de material. Es totalmente lógico afirmar que entre mas cerca este la cantera, más fácil será el transporte del material ya que se disminuirían los costos y los tiempos de recorrido y se aumentaría la producción de forma inversamente proporcional a la distancia en que se encuentre la cantera. Las canteras en estudio se encuentran a solo 5 Km. de la planta de asfalto, una distancia bastante corta y que hace que la afluencia de material sea constante.
- **Permisos.** Es de especial importancia tener todos los papeles en orden para la explotación de una cantera antes de iniciar cualquier trabajo. Lo primero que se debe averiguar es por la licencia de explotación que expide el ministerio de minas y obras publicas que permite explorar y explotar el

subsuelo colombiano en cualquiera de sus regiones y lo segundo es hacer toda la tramitología en CARDIQUE para las licencias ambientales para explotación. Sin estas autorizaciones es imposible hacer cualquier tipo de montaje ya que esto implicaría un gasto innecesario a la hora de ser negados estos permisos.

- **Vía.** Lo ideal sería que el acceso a las canteras fuera con una vía en perfecto estado, cosa que no ocurre en la mayoría de los casos debido a los altos costos de construir una vía y a que las canteras en esta zona no tienen la cantidad de material que amerite tener una vía pavimentada. Sin embargo para poder optimizar la explotación se debe tener la vía de acceso acondicionada para la circulación de vehículos pesados, trabajo que se puede efectuar primeramente con un despeje de la zona con un Buldózer (en el caso que sea virgen), luego se perfila la vía con una motoniveladora para hacer desagües y canales, y dependiendo de la calidad del material de rasante se estudia la factibilidad de extender una capa de un mejor material como zahorra; o el mismo explotado en la cantera se reafirma y compacta con un compactador de llantas o con las mismas volquetas. Teniendo en cuenta estas recomendaciones se puede obtener un acceso estable independientemente a las condiciones del trabajo, ya sean climáticas, ambientales, geológicas, etc. Ver figura 4.

Figura 4. Vía hacia la cantera en Bayunca



- **Estudios.** Antes de arreglar la vía e invertir dinero en la explotación se deben hacer todos los apiques necesarios en la cantera para definir la estratificación de esta, la profundidad del material, las alturas de las diferentes vetas para determinar descapotes, la calidad del material y el nivel freático. Todos estos datos sirven para saber cuantos metros cúbicos de material se pueden extraer de la zona y hacer un análisis costo-beneficio, además de saber los metros de descapote y de conocer las características físicas y mecánicas del material explotado.
- **Apiques.** Luego que se conoce la calidad del material a explotar y su posible ubicación en los diferentes estratos del terreno, se procede a la localización in situ de los módulos de corte a través de diferentes apiques efectuados a lo largo y ancho de la cantera. Estos se efectúan de dos formas, la primera puede ser manual en la cual dos obreros excavan un cuadrado en la parte inicial y se van profundizando haciendo una seguidilla de cuadrados más pequeños que el anterior a cada metro de excavación, teniendo en cuenta que las dimensiones del primer cuadrado dependen de la profundidad a la cual se calcula este el material buscado. Este método es demasiado engorroso y se usa poco en la medida que se tenga la seguridad que en la cantera exista el material. La segunda forma para elaborar los apiques, y es la mas usada, es con una retroexcavadora ya que esta agiliza los trabajos para definir las zonas de corte o módulos de trabajo es aconsejable hacer un apique por cada 50 m² de cantera.
- **Descapotes.** El espesor del descapote depende de los apiques anteriores, y es necesario conocer tanto el espesor así como las características del material a cortar para de esta forma saber cual debe ser la capacidad de la maquina Buldózer que se va a emplear en este trabajo, ver figura 5. Es muy importante definir con anterioridad al trabajo de la maquina los sitios de relleno con el material descapotado. En el caso de las canteras de bayunca

se hace fácil esta tarea ya que el terreno es montañoso y el material descapotado se puede extender hacia las faldas de las montañas, teniendo cuidado de no obstruir pasos naturales o artificiales de agua ya que esto complicaría el eficiente desarrollo de las operaciones. Esta labor se facilita en los siguientes módulos de corte, ya que a través de un diagrama de masas, se puede rellenar el corte del primer modulo con material descapotado del segundo para de esta forma reducir los trabajos en la etapa final de la explotación.

Figura 5. Descapote arcilloso



- **Accesos.** Una cosa es la vía de acceso a la cantera y otra son los accesos a los distintos cortes de una cantera. Estos accesos deben ser muy bien preparados y seleccionados ya que de ellos depende la rapidez del despacho del material, y por esta razón debemos tener en cuenta que deben tener el mínimo de protuberancias y ondulaciones por que estas hacen que los carros sufran daños en los muelles y suspensiones. Se deben evitar las pendientes pronunciadas de salida y llegada, debe haber posibilidad de giro y también tener espacio para que puedan pasar dos carros, entre otras recomendaciones que hacen un mejor desarrollo de la operación.
- **Cortes.** Cuando se tiene una zona totalmente descapotada y el acceso al corte listo se procede a realizar el cargue del material seleccionado, que en

el caso nuestro este material tiene un tono amarillo rojizo y contiene una cantidad considerada de piedras chinas de no mas de 1" de diámetro, figura 6. Este corte se puede efectuar con un cargador de orugas o una retroexcavadora también de orugas con baldes que oscilen entre uno y dos metros cúbicos de capacidad. No es aconsejable utilizar maquinas de llantas debido a las posibles dificultades del terreno, y si se llegaran a usar se recomienda colocarle a las llantas unas mallas que impidan deslizamiento. Estos cortes se deben realizar por capas no muy profundas, teniendo en cuenta que las pendientes de salida de las volquetas no pueden ser tan pronunciadas y que la maquina debe bajar a medida que baja el corte. Si en algún momento se encuentra el nivel freático es aconsejable la instalación de una motobomba que evacue el agua por dos razones, la primera es para evitar transportar un material saturado que perjudicaría a las volquetas y la segunda para que el operador pueda observar la calidad del material que esta extrayendo en ese momento.

Figura 6. Cortes en arena limpia



- **Etapas Final.** Cuando se termina de extraer todo el material pronosticado a explotar en la cantera se deben efectuar los trabajos de adecuación de la zona para que topográficamente el terreno se mantenga con características similares a las encontradas inicialmente. Por esta razón en la etapa de descapote es necesario ir rellenando las zonas explotadas para así ir

compensando masas y teniendo el terreno organizado proceder a la etapa de arborización y demás tareas que aseguren el mantenimiento del ecosistema.

2.5.2. Materiales pétreos de Arroyo de Piedra. En realidad se llama cantera de Arroyo de Piedra a la vertiente de arroyos que se desprenden de esa zona y de los cuales se extraen los materiales que componen parte de la mezcla asfáltica producida en la empresa PMV Ltda. Esta zona contiene el material de Arroyo de Piedra en si que es un balastro (mezcla de piedra grande con arena y algo de arcillas), las piedras sobre tamaño de Arroyo Negro y las arenas gruesas de los arroyos San Juan (figura 7) y Colombia, pero actualmente solo se esta utilizando el material proveniente de Arroyo Negro y del arroyo San Juan. Por ser arroyos las características de explotación son similares y las vamos a detallar a continuación.

Figura 7. Arena de San Juan



- **Ubicación.** Aunque es importante acortar distancias, la necesidad de obtener un material con las características que solo da un arroyo nos lleva a que paguemos ese sobre costo, teniendo en cuenta que el arroyo San Juan es el mas cercano de todos y esta ubicado antes de llegar al Uruaco al igual que arroyo Negro. De igual forma la cantidad de material explotada es pequeña en comparación con la de Bayunca, por esta razón están bien

balanceadas las distancias a los centros de extracción con respecto a la planta de producción que es al final lo que se requiere.

- **Permisos.** En los casos de los arroyos los permisos son suministrados por la alcaldía municipal a la cual este circunscrito el terreno donde se encuentre el arroyo, además de un permiso suministrado por CARDIQUE. En el caso nuestro los permisos fueron suministrados sin ningún problema debido que se generaron varias fuentes de empleo cuando se inicio la explotación de estos arroyos.
- **Vía. :** En la mayoría de los casos las vías que conducen a los arroyos están totalmente pavimentadas, pero en el caso que no lo estén se debe hacer un esfuerzo para adecuar una vía que conduzca a la orilla del río, cabe anotar que estas explotaciones se hacen en tiempo de verano cuando estos arroyos están secos y por lo general no se presentan problemas para acceder a estas ubicaciones.
- **Estudios.** Para la elaboración de mezclas asfálticas los materiales provenientes de arroyos como son las arenas y los bolos sobre tamaños son muy apetecidos ya que cuentan con una limpieza superficial natural, ósea que son lavados naturalmente por el agua en épocas de invierno y no necesitan ningún tipo de proceso adicional en planta, cosa que disminuye costos. Es necesario a las arenas examinar su granulometría por que lo que buscamos es que tengan una gradación superior a la de la arena de cantera (Bayunca) para compensar los tamaños y de esta manera obtenerla mezcla deseada. Por el otro lado las piedras deben ser macizas y no Bofas, esto lo da la edad de la piedra y del arroyo, para mantener los parámetros de desgaste por debajo del máximo admisible.

- **Accesos.** en el interior del arroyo es aconsejable empezar a explotar desde aguas abajo hacia aguas arriba por esta razón el acceso se convierte en el cauce del mismo arroyo, y hay que tener especial cuidado en la capacidad portante del material que conforma el fondo para que las volquetas no sufran atoramiento ni deslizamientos dentro del arroyo. La parte de especial atención es a la hora de adecuar la salida ya que se debe evitar colocar pendientes pronunciadas para que los carros salgan de la mejor forma posible.
- **Explotación.** Para explotar la piedra primero hay que extraer la arena ya que esta se deposita encima de la piedra a la hora de ser arrastrados por la corriente. La arena puede extraerse a pala o con un mini cargador, pero en la mayoría de los arroyos no se permite la presencia de maquinas debido a que disminuye la mano de obra, y hay que tener mucho cuidado de no tocar los taludes por dos motivos, el primero es que casi siempre el talud es de un material arcilloso que no nos serviría en este caso y el segundo motivo es que al quitar taludes estaríamos modificando el cauce natural de arroyo. Las piedras son cargadas a mano por los trabajadores y deben ser seleccionadas, es recomendable cargar las piedras pesadas, ya que las que son livianas a menudo son areniscas en formación que no sirven al momento de triturarlas.
- **Etapa Final.** Es necesario mantener las condiciones del arroyo intactas para que este en el invierno se renueve y mantenga los volúmenes de piedras y arenas intactos para su posterior explotación en el próximo verano. La vegetación también es importante y por lo general contribuye a la conformación del arroyo, por esta razón debemos evitar lo mas que se pueda destruirla por el contrario seria de beneficio común el regenerar la zona verde del sector.

2.6 CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN PLANTA

Teniendo en cuenta lo citado en el numeral 2.4, los agregados utilizados en la planta de asfalto Torcoroma de la empresa Promotora Montecarlo Vías cuenta con las propiedades físicas citadas en la tabla 3, resultados que cumplen con todas la especificaciones de INVIAS. Estos resultados se pueden verificar en los diseños de mezclas que se presentan en el anexo A.

Tabla 3. Propiedades de los Agregados

Ensayo	Norma INV	Agregado Grueso	Agregado fino	Especificación
Partículas fracturadas mecánicamente	E-227	80.8%	NA	>75%
Desgaste en la maquina de los Ángeles	E-218, E-219	24.3%	NA	<30%
Perdida de solidez en sulfato de sodio	E-220	1.8%	1.6%	<12%
Adherencia en bandeja	E-732	>95%	NA	>95%
Índice de aplanamiento	E-230	15.2%	NA	<35%
Índice de alargamiento	E-230	15.2%	NA	<35%
Plasticidad	E-125, E-126	NA	NP	NP
Equivalente de arena	E-133	NA	57%	>50%
Resistencia conservada inmersión compresión	E-738	18.5%		>25%
Peso especifico ponderado	E-223	2.583	2.582	NA

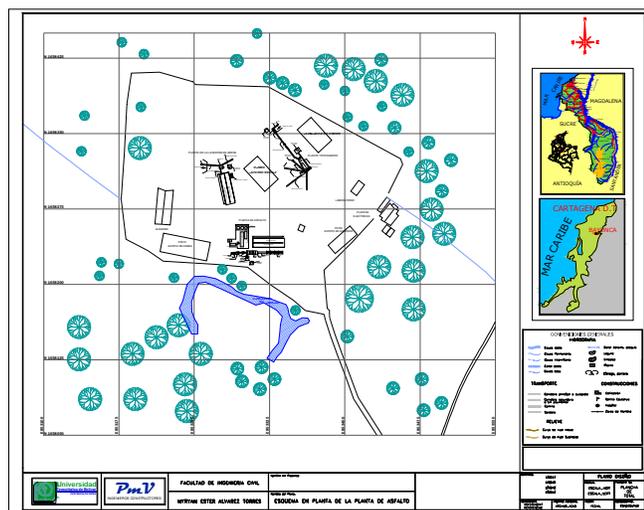
3. PRODUCCION EN PLANTA

El sistema de producción en planta se compone de varios procesos que hacen posible la concepción de mezcla asfáltica en grandes cantidades. Estos procesos se detallan a continuación, y tratan de explicar como funciona una planta de asfalto, y de esta forma escoger la mejor opción de mejoramiento de la mezcla asfáltica en la planta Torcoroma.

3.1. UBICACIÓN DE LA PLANTA.

La planta de asfalto Torcoroma perteneciente a la empresa constructora Promotora Montecarlo Vías S.A., se encuentra ubicada en la circunscripción del municipio de Bayunca en el departamento de Bolívar. El municipio de Bayunca se encuentra ubicado en el kilómetro 15 de la vía la Cordialidad, y se debe girar a la izquierda (sentido Cartagena-Barranquilla), en la colectora de dicha carretera con la vía al mar, en esta se recorren 2,5 kilómetros y se dobla a la derecha, en este punto exactamente esta la planta de producción de mezcla asfáltica, ver figura 8 y anexo E.

Figura 8. Ubicación de la planta de asfalto



Se puede decir que se cuenta con una posición estratégica, ya que la planta está rodeada de canteras muy importantes como son la de Bayunca, Palmarito, Arroyo de piedra etc, haciendo el suministro de materiales mucho más fácil.

3.2. DESPACHO Y RECEPCIÓN DE MATERIALES.

Todos los materiales que entran o salgan de la planta deben ser inspeccionados y pesados en la báscula. Este procedimiento se lleva a cabo con el fin de llevar un control exacto de cuanto material en un momento dado se ha extraído o en su defecto, ha entrado a la planta. Es necesario en este punto tener claras las densidades de cada material, que puede ser asfalto, rechazo, triturado, arena, gravas, balastros, etc, para poder calcular el equivalente a metros cúbicos por cada viaje, ya que este parámetro es el que define la cantidad a pagar. En el caso de no tener definida con anterioridad la densidad, el laboratorista y el basculero procederán a calcularla en la misma volqueta ya que de esta forma se obtiene una medida más representativa, teniendo en cuenta que sería bueno repetir esta operación cada mes de transporte, o cada vez que cambien las propiedades del material.

3.3. ALMACENAMIENTO DE MATERIALES.

Cabe resaltar que todo material que entra a la planta debe estar encarpado, ya que el objetivo fundamental del almacenamiento es evitar la humedad. Por tal motivo en época de verano los materiales se dejan descubiertos para que el sol y el calor evaporen el agua, pero en época de invierno deben permanecer encarpados para evitar exceso de esta, ver figura 9.

Figura 9. Almacenamiento de arena



El material humedecido por lo general aumenta los costos de producción, ya que se hace más difícil su zarandeo o clasificación y además se ha demostrado que se consume más combustible a la hora de secar los materiales y producir mezcla asfáltica. Por esta razón en la planta de asfalto Torcoroma existe una bodega para almacenar y mantener seco el material mezclado y listo para procesar, esta facilita la operación y disminuye costos de producción al economizar combustibles, figura 10.

Figura 10. Bodega para almacenar materiales



Las zonas de almacenamiento deben estar definidas en el área total de la planta y su capacidad debe exceder en un 10% al total esperado para un stock óptimo, teniendo en cuenta que estas deben ser señaladas con avisos que indiquen la

clase de material almacenado. También se recomienda ubicar las zonas de almacenamiento de materiales sin procesar cerca de las trituradoras y zarandas, y la zona de materiales procesados cerca de la planta de asfalto, de esta forma se garantiza la economía en la utilización de cargadores.

3.4 ALMACENAMIENTO DE CEMENTO ASFALTICO.

El cemento asfáltico en planta se almacena en tanques e acero reforzado, con un recubrimiento de fibra de vidrio y zinc, que en su interior contiene una serie de serpentines en los cuales recorre aceite térmico (Texaterm) a altas temperaturas provocando de esta forma el calentamiento del asfalto contenido. Los tanques tienen capacidades de 10 a 50 toneladas y pueden alcanzar temperaturas hasta 200 °C, sistemas que cuentan con bombas de descarga y tuberías de conducción, figura 11.

Figura 11. Tanques de almacenamiento de asfalto



En este caso la planta de asfalto Torcoroma cuenta con tres tanques de almacenamiento de cemento asfáltico de 35 toneladas cada uno, ósea una capacidad neta de 105 toneladas, y con tres tanques de 15 toneladas para mezclado de aditivos, con sus respectivos sistemas de descargue e inyección. El sistema de calentamiento lo compone un quemador Honeywell de 2 millones de

BTU y una bomba de recirculación de aceite térmico que lo distribuye por todos los tanques. El combustible utilizado es gas natural, pero se puede utilizar ACPM en el caso de que el sistema falle.

El objetivo del sistema es entregar por medio de una bomba de inyección el cemento asfáltico a la planta de producción a una temperatura de trabajo que varia de 120 a 150°C, en una proporción que corresponda a la cantidad de kilos por metros cúbicos planteada en el diseño.

3.5 TRITURACION Y CLASIFICACION.

En toda planta de asfalto la trituración y clasificación de materiales cumple un papel muy importante, ya que de ello depende la capacidad y calidad de la producción continúa de esta. El objetivo de la trituración es convertir una cantidad de piedras de tamaños grandes variados, en pedazos de material de tamaños pequeños variados, con paredes o caras fracturadas que permitan un mejor agarre cemento asfáltico-agregado, y de esta forma obtener mezclas mas resistentes a los esfuerzos y deformaciones. La clasificadora o zaranda esta íntimamente relacionada con la trituradora, ya que esta es la que permite organizar el material de tamaños variados a pilas de material con características granulométricas similares, y así poder obtener las combinaciones adecuadas de agregados dentro del diseño de la mezcla.

En la planta de asfalto Torcoroma el sistema de trituración se compone por un alimentador vibratorio, un pulmón o túnel, un alimentador estático, una trituradora primaria de mandíbulas, una trituradora secundaria de impacto (TI-100), una zaranda vibratoria y ocho bandas alimentadoras y apiladoras, figura 12. Este montaje permite obtener gravas y arenas de diversos tamaños y texturas que hacen posible alcanzar la gradación ideal de la mezcla.

Figura 12. Sistema de Trituración y clasificación.



3.6 LAVADO DE MATERIALES PÉTREOS.

La clave en la adherencia de los agregados con el cemento asfáltico es la limpieza superficial y el secado completo de estos. El trabajo de secado lo efectúa el Droom Mixer o tambor mezclador de la planta y colabora con la limpieza cuando los agregados no están muy contaminados, pero en el caso contrario se debe utilizar la lavadora de materiales que puede ser un tornillo sin fin, un tambor giratorio, una zaranda dinámica con inyección de agua, etc, todas con el fin de lavar la superficie de los agregados y permitir una mejor adherencia de estos con el asfalto. El parámetro que indica el grado de suciedad de un material es el equivalente de arena, que en Colombia fue fijado por el instituto nacional de vías INVIAS en el año 2002 en un 50%, que significa que material que tenga menos del 50% de material limpio debe ser sometido a lavado parcial o general, dependiendo de cómo sea su estado.

En la planta de asfalto Torcoroma el sistema de lavado lo compone una lavadora de tambor giratorio con mallas de 3/8 de pulgada marca Noriand, dos bandas alimentadoras, una tolva estática y un túnel, y una piscina de lodos de

aproximadamente 300 metros cúbicos, con un rendimiento de 40 m³ hora, figura 13.

Figura 13. Lavadora de arena Noriand



3.7 PRODUCCION DE MEZCLA ASFÁLTICA

Todos los procesos anteriores se desarrollan para llegar a la etapa final o de producción, en la cual se utilizan todos los materiales para la elaboración de un producto que cumpla con las especificaciones pactadas en el diseño y que sea optima su consecución desde el punto de vista económico, de calidad y de tiempo. La planta que se va a desarrollar a continuación es una planta de asfalto de producción continua marca CIBER, de capacidad 180 ton/hora, con un silo de almacenamiento de 30 toneladas, figura 14.

Figura 14. Planta de asfalto Torcoroma



3.7.1 Tolvas de agregados en frío. Son cuatro tolvas que tienen paredes resistentes a presión de agregados con dispositivos de salida que pueden ser ajustados exactamente y mantenidos en cualquier posición durante el proceso de producción. En cada tolva se colocan los materiales necesarios para el diseño de mezcla, las arenas, el triturado y el llenante, y por medio de potenciómetros y reguladores de frecuencia se puede controlar la cantidad de material entregado a la banda alimentadora para cumplir la granulometría de diseño. Las velocidades de los motovariadores se controlan desde la cabina de control, y es necesario garantizar por parte de los operadores el flujo constante de material a la banda, evitando que los agregados se atoren a la salida de la tolva ya sea por sobrepeso o por exceso de humedad. Cabe anotar que las tolvas siempre deben ubicarse a nivel del cargador, esto se logra fabricando una rampa de acceso a estas, figura 15.

Figura 15. Tolvas de agregados en frío.



3.7.2 Banda Alimentadora. Esta se compone de dos secciones de bandas que se encargan de transportar el material de las tolvas en frío hacia el tambor mezclador, a velocidad constante, ya que el flujo de material se controla desde las tolvas. En la parte media debe tener un control de sobretamaños o sucios, que puede ser una malla de una pulgada, que evite la entrada de material no deseado a la mezcal final, ver figura 16.

Figura 16. Banda alimentadora



3.7.3 **Quemador.** Su función es proporcionar la cantidad de combustible mas aire capaz de secar completamente la mezcla de agregados y llevarlos a una temperatura entre 120 y 150°C. Se compone de una turbina impulsada con un motor de 50Hp a 3600 Rpm que inyecta aire, y de un tren de combustible que puede ser gas natural o Fuell oil, figura 17.

Figura 17. Quemador de Gas natural



3.7.4 **Tambor mezclador.** Es un tambor de 10 metros de longitud y 2 metros de diámetro que gira a revolución constante sobre cuatro rodillos fijos, cuya función es la de mezclar y secar los agregados que vienen de la banda alimentadora, figura 18. En el último tercio del tambor se inyecta el asfalto caliente proveniente de los tanques de almacenamiento y se hace una primera etapa de mezclado al

final de este. Este tambor entrega el material premezclado con asfalto al elevador de canjilones.

Figura 18. Tambor mezclador.



3.7.5 Elevador de canjilones. Se compone de un cajón de 18 metros de alto, dentro del cual se desplazan dos cadenas que soportan 40 baldes o canjilones, cuya función es la de elevar el material mezclado que sale del tambor hacia la parte mas alta de la planta, donde lo entrega al homogenizador, figura 19. A este mecanismo se le debe hacer limpieza cada vez que se termine una jornada de producción, ya que dentro de este se acumula residuo de asfalto.

Figura 19. Elevador, Homogenizador y Silo de almacenamiento



3.7.6 **Homogenizador.** Es un cajón donde llega el material que es transportado por el elevador de canjilones, dentro del cual hay una serie de paletas en forma de sin fin cuyo objetivo es el de dar un acabado a la mezcla asfáltica haciéndola mas homogénea, y de esta forma evitar la segregación.

3.7.7 **Silo de almacenamiento.** Su función principal es la de acumular suficiente cantidad de mezcla para evitar el enfriamiento cuando sea despachada dentro de las volquetas transportadoras. Además se puede emplear para almacenar material luego de una producción, haciendo la planta más efectiva.

3.7.8 **Sedimentador.** Se compone de un sistema completo de antipolucion que tiene dos plumillas que inyectan agua constante a la salida del exhausto, y cuya finalidad es la de sedimentar las partículas pesadas evitando de esta forma que sean expulsadas al medio ambiente, figura 20.

Figura 20. Sistema de sedimentación



3.7.9 **Exhausto.** Es un sistema de succión de aire de la planta y de expulsión de humo hacia el medio ambiente.

4. DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS

4.1 DESCRIPCION DEL METODO MARSHALL

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas.

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5"). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con gradación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100”) que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

Para detallar el procedimiento de diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall se siguen tres parámetros fundamentales que son: caracterización de materiales, elaboración de las probetas asfálticas y pruebas de densidad a la mezcla asfáltica, que luego conllevan a la escogencia de la dosificación óptima de diseño.

4.1.1 Caracterización de materiales. En el capítulo 1 y 2 del presente trabajo se hace un detallado estudio de la forma como se obtienen los materiales, cómo se procesan y cómo se ensayan en laboratorio para obtener especímenes de óptima calidad. Cabe resaltar que los materiales que componen el asfalto son de vital importancia en la consecución de la mezcla, ya que conforman el esqueleto final de la estructura del pavimento asfáltico, figura 21.

Figura 21. Selección de materiales para diseño de mezcla.



4.1.2 **Elaboración de la mezcla asfáltica.** Después de haber realizado las pruebas correspondientes al material granular y verificar que cumple con las especificaciones mínimas se procede a encontrar una dosificación de estos materiales que cumpla con los parámetros establecidos por la norma INVIAS de 1996, teniendo en cuenta que la mezcla objeto del proyecto es una Mezcla Densa en Caliente tipo 2 (MDC-2).

4.1.2.1 **Determinación de la granulometría.** La granulometría se seleccionó teniendo en cuenta que esta debería cumplir con la especificación de diseño descrita en la norma INV 450 para MDC-2, tabla 4.

Tabla 4. Límites para gradación de mezclas asfálticas.

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA		
Normal	Alternativo	MDC-1	MDC-2	MDC-3
25.0 mm	1"	100	-	-
19.0 mm	3/4"	80-100	100	-
12.5 mm	1/2"	67-85	80-100	-
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88	100
4.75 mm	No.4	43-54	51-68	65-87
2.00 mm	No.10	29-45	38-52	43-61
425 µm	No.40	14-25	17-28	16-29
180 µm	No.80	8-17	8-17	9-19
75 µm	No.200	4-8	4-8	5-10

Para la selección de los porcentajes de cada material utilizado (Arena de Bayunca, Arena de San Juan, Triturado $\frac{3}{4}$, y triturado $\frac{1}{2}$), se usó el método de tanteos para lograr la gradación mas uniforme dentro de los parámetros establecidos por la norma, y se verificó la gradación escogida realizando una granulometría de prueba, ver figura 22.

Figura 22. Verificación de gradación escogida.



4.1.2.2 Dosificación de las probetas. Para la realización del diseño se elaboraron tres probetas por cada porcentaje de asfalto utilizando la misma granulometría escogida según el procedimiento del numeral 4.1.2.1, solo variando la cantidad de asfalto dosificado. Los porcentajes de asfalto van desde el 4% al 6% con diferencias de 0.5%, generando un total de 15 probetas para el ensayo y 5 puntos de control.

4.1.2.3 Preparación de la mezcla compactada. Para elaborar lo que se conoce como envuelta de la mezcla, se llevó al asfalto a la temperatura de mezclado (140°C); y para el agregado, una temperatura mayor que la del asfalto, pero sin exceder de 28°C la temperatura de mezclado del asfalto; al igual que el asfalto a utilizar, no debe ser calentado a la temperatura de mezclado por más de una hora. Cuando los materiales alcanzan las temperaturas deseadas, se prepara el agregado para recibir el cemento asfáltico, haciendo una especie de cráter en donde se coloca el asfalto (Figura 23) y se mezcla hasta que todas las partículas de agregado estén cubiertas de asfalto (Figura 24). De igual forma, el molde de compactación debe ser calentado (en el horno) para que alcance una temperatura aproximada a la de compactación ($136 - 139^{\circ}\text{C}$).

Figura 23. Dosificación del asfalto en mezcla.



Figura 24. Envuelta de la mezcla finalizada



Una vez que la mezcla asfáltica alcanza la temperatura de mezclado, se saca el molde del horno; se coloca el papel en la parte inferior interna del molde y se vacía la mezcla asfáltica (Figura 25); con una espátula o cuchara caliente se golpea 15 veces el perímetro del molde y diez veces en el interior; después se compacta la muestra con el martillo Marshall proporcionándole 75 golpes por cara. Para la extracción de la probeta se puede emplear un gato hidráulico o cualquier sistema que garantice una extracción segura del material.

Figura 25. Molde para diseño Marshall.



4.1.3 Pruebas a las mezclas asfálticas. Las pruebas a las probetas de mezcla asfáltica pueden ser de dos tipos, la primera, con el fin de evaluar las características volumétricas debidas a los diferentes equipos de compactación utilizados; en la segunda, se valorarán los parámetros de resistencia de la mezcla asfáltica mediante diferentes pruebas mecánicas con el fin de calificar la influencia de la compactación, bajo diferentes condiciones de falla.

4.1.3.1 Pruebas Volumétricas. Un factor que debe tenerse en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica es el de las proporciones volumétricas de los componentes, el ligante asfáltico y el agregado. A continuación se describen las pruebas que más influyen en los resultados de la volumetría y los parámetros a evaluar en este estudio.

- **Gravedad Especifica de los agregados (Gagr):** Este método de prueba se usa para determinar la densidad de la proporción esencialmente sólida de cantidad de partículas de agregado y provee un valor promedio representativo de la muestra, se evalúa según norma E-222 y E-223, figura 26.

Figura 26. Ensayo de Gravedad Específica.



- **Gravedad Específica de la mezcla compacta (Gmb):** Esta prueba se realiza para estimar el grado de densificación que tendrá la mezcla asfáltica colocada en la estructura del pavimento. Debe tenerse en cuenta que esta densificación es el valor estimado que tendrá la mezcla asfáltica después de un tiempo de haberse colocado en el pavimento. Esto debido a que el pavimento después de ser colocado, sigue sufriendo densificación debido al paso de los vehículos. Norma INVIAS E-711.
- **Gravedad Teórica máxima de la mezcla (Gmm):** La determinación de la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica, es posiblemente la prueba de laboratorio más importante para definir las características volumétricas de la mezcla asfáltica, debido a que el cálculo del volumen de vacíos es la proporción que existe entre el Gmb y el Gmm, se obtiene según el método INVIAS E-735. Esta prueba se debe efectuar con un aparato que extraiga todos los vacíos de la mezcla succionándolos con una bomba de vacío, este puede ser un picnómetro de vacío, ver figura 27.

Figura 27. Picnómetro de vacío.



4.1.3.2 **Pruebas Mecánicas.** Estas pruebas dan una indicación acerca de cómo se comportará estructuralmente la mezcla, teniendo en cuenta correlaciones dadas por el INVIAS. Estas pruebas se describen a continuación.

- **Prueba de Inmersión-Compresión:** Esta prueba se realiza de acuerdo con la Norma INVIAS E-738 y se utiliza para determinar la pérdida de resistencia debido a la acción del agua. Esta determinación consiste en realizar dos juegos de probetas; las primeras, se evalúan en compresión a una temperatura de 25 °C; el segundo juego se sumerge en agua a una temperatura de 60 °C durante 24 horas; después se vuelve a sumergir en agua a 25 °C por 2 horas; finalmente se seca superficialmente la muestra y se evalúa en compresión a una temperatura de 25 °C.
- **Prueba de estabilidad y flujo Marshall:** Esta prueba se realiza con el propósito de conocer los valores de cohesión (estabilidad) y fricción (flujo) de la mezcla asfáltica, mediante la aplicación de una carga a deformación controlada de 50.8 mm/min. Esta prueba es solamente para probetas fabricadas con el martillo Marshall y consiste en sumergir la probeta en baño María a una temperatura de 60

°C de 30 a 40 min, para después ensayarla en la máquina Marshall (Figura 28); los valores obtenidos se utilizan para la determinar el contenido óptimo de asfalto, este método se describe en la norma INVIAS E-748.

Figura 28. Máquina Marshall para Estabilidad y Flujo.



4.1.4. **Escogencia de la dosificación óptima de asfalto.** En el numeral 4.1.1 se escoge la granulometría óptima de la mezcla que presente una curva equidistante a las dos curvas de límites superior e inferior. A esta se le adiciona una cantidad de asfalto tal que lleve a la mezcla a tener la mejor calidad posible, teniendo en cuenta la tabla de rangos de valores que presenta el INVIAS en su artículo 450, y que se muestra en la tabla 5.

Para el calculo del contenido óptimo de asfalto se grafica el porcentaje de asfalto contra el peso unitario, contra la estabilidad, contra el flujo, contra los vacíos en la mezcla y contra los vacíos en los agregados, escogiendo el porcentaje de asfalto que mas se acomode a los parámetros establecidos por la norma y teniendo en cuenta que los mas representativos son el de estabilidad y flujo.

Tabla 5. Parámetros de diseño.

Características	Transito de diseño ejes de 80 KN (mil)		
	> 5.000	500 – 5.000	< 500
Golpes por cara	75	75	75
Estabilidad mínima Kg.	750	650	500
Flujo (mm)	2 – 3.5	2 – 4	2 - 4
Vacíos con aire (%)	4 - 6	3 – 5	3 - 5
vacíos mínimos en agregados	15	15	15

4.2 DISEÑO DE MEZCLA CON ASFALTO 60-70

Para la elaboración de este diseño se utilizó asfalto de penetración 60-70 de características descritas en el numeral 1.5, y materiales descritos en el numeral 2.6, siguiendo cada uno de los pasos que se indicaron en el subcapítulo anterior, teniendo en cuenta que la dosificación empleada de materiales pétreos se muestra en la tabla 6. Cabe indicar que esta gradación fue empleada tanto para el diseño 60-70 como para el de asfalto modificado con SBS, para poder establecer comparaciones entre los dos.

Tabla 6. Dosificación de Agregados.

Agregados	Porcentaje en mezcla
Triturado de $\frac{3}{4}$ de Arroyo	15%
Triturado de $\frac{1}{2}$	34%
Arena zarandeada San Juan	26%
Arena zarandeada de Bayunca	25%

De este diseño se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Resumen diseño Marshall asfalto 60-70

DISEÑO MEZCLA CON ASFALTO 60-70	
ITEM	RESULTADO
Contenido de Asfalto	5.4
Densidad (g/cm ³)	2.308
Estabilidad (lb)	2220.0
Flujo (0.01 pulg)	11-12
Vacíos con aire (%)	5.0
Vacíos en agregados (%)	15.0
Vacíos con asfalto (%)	84.6
Temperatura de mezclado	150°C
Temperatura de compactación	140°C

De estos resultados se puede observar que los resultados cumplen las especificaciones mínimas dadas por el INVIAS y por esta razón se asume que el diseño escogido respeta las normas y ofrece las condiciones necesarias de trabajo en la vía. Para mayor información de la obtención de cada uno de los resultados anteriores, ver anexo A, en el cual se detalla cada uno de los ensayos realizados a la mezcla y agregados.

4.3 DISEÑO DE MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON SBS

Para la elaboración de este diseño se utilizó asfalto MEXPHALTE PM de tipo II modificado con polímeros SBS de características descritas en el numeral 1.6, y materiales descritos en el numeral 2.6, siguiendo cada uno de los pasos que se indicaron en el subcapítulo 4.1, teniendo en cuenta que la dosificación empleada de materiales pétreos se muestra en la tabla 6. De este diseño se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Resumen diseño Marshall asfalto Modificado

DISEÑO MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO	
ITEM	RESULTADO
Contenido de Asfalto	5.3
Densidad (g/cm ³)	2.300
Estabilidad (lb)	3096
Flujo (0.01 pulg)	12
Vacíos con aire (%)	5.0
Vacíos en agregados (%)	15.5
Vacíos con asfalto (%)	80.1
Temperatura de mezclado	160°C
Temperatura de compactación	160°C

De estos resultados se puede observar que los resultados cumplen las especificaciones mínimas dadas por el INVIAS y por esta razón se asume que el diseño escogido respeta las normas y ofrece las condiciones necesarias de trabajo en la vía. Para mayor información de la obtención de cada uno de los resultados anteriores, ver anexo B, en el cual se detalla cada uno de los ensayos realizados a la mezcla y agregados (cuadros comparativos y gráficas de los dos diseños, ver anexo F)

4.4 CALCULO DE LEY DE FATIGA

Generalmente se acepta que en la mayor parte de las situaciones, el tráfico genera un daño por fatiga del material que se inicia en la parte inferior de la capa asfáltica y se propaga hacia la superficie. En el modelo tradicional de fatiga las fisuras se originan en la fibra inferior de la mezcla bituminosa (zona donde la tensión de tracción es mayor) y se propaga verticalmente hacia la superficie del pavimento.

Daño por fatiga significa que un estado de tensión provocado por una sollicitación, muy alejada del valor de rotura, llega a producir por acumulación (es decir, por repetición de la sollicitación un número muy elevado de veces) el agotamiento del material, agotamiento que se manifiesta por la fisuración del mismo. Ensayos de laboratorio han verificado que la relación entre la deformación, ϵ , (producida por la sollicitación) y la duración o vida del fatiga del material representada por el número **N** de veces que soporta la sollicitación antes de romperse por fatiga. ϵ y **N** están ligadas por la expresión:

$$N = k_1 * \epsilon^{k_2}$$

Donde N representa el número de ciclos de carga hasta la fatiga del material al nivel de deformación ϵ , que es la deformación unitaria de tracción (en micro deformaciones ϵ m/m) y k1 y k2 constantes que describen el comportamiento a fatiga del material.

Numerosos estudios se han realizado para establecer que parámetros de la mezcla intervienen de manera significativa en la determinación de los valores de k1 y k2. Se ha comprobado que están principalmente afectados por:

- * El módulo de la Mezcla
- * El contenido de betún
- * La viscosidad del betún (medida por el Índice de Penetración, IP)
- * La granulometría y la naturaleza de los áridos
- * El contenido de aire (huecos en la mezcla)
- * La temperatura del pavimento

La determinación de la ley de fatiga de una mezcla bituminosa es una cuestión compleja que requiere muchos y costosos ensayos de laboratorio y calibraciones y calados posteriores del modelo in situ. Por ello se suele recurrir a los estudios

genéricos realizados por laboratorios nacionales o por organizaciones con grandes recursos. Para el caso que nos ocupa se describen los dos métodos más conocidos aunque solo se aplica el método del Instituto del Asfalto para determinar las características de fatiga de la mezcla de Alto Módulo.

4.4.1 Calculo de los Módulos Dinámicos: Con esta prueba se determina el Modulo dinámico de una probeta tipo Marshall, por medio del principio de tensión indirecta. El principio enuncia que al aplicar una carga compresiva a través del diámetro de una muestra cilíndrica, se produce una tensión sobre un diámetro ortogonal al cual se aplica la carga. Al registrar la carga vertical aplicada y la deformación horizontal producida se obtiene el modulo dinámico (Mpa).

Con base en la prueba de tensión indirecta y teniendo en cuenta que es no destructiva, podemos evaluar la incidencia de la temperatura en el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica realizando ensayo a temperaturas en un rango de temperaturas establecido, con lo cual se construye un grafico semilogaritmico del valor del modulo en función de la temperatura, denominado curva maestra, estas se pueden observar en el anexo C.

Para el cálculo de los módulos dinámicos se hicieron dos pruebas, una con asfalto 60-70 y otra con asfalto modificado con Mexalpalte tipo II, en las cuales se obtuvieron las siguientes correlaciones, donde MD es el modulo dinámico y T es la temperatura:

* Asfalto 60-70

$$MD = 16404.07 - 4135.66 \cdot \ln(T)$$

* Asfalto Modificado con Mexalpalte tipo II

$$MD = 23783.95 - 6018.51 \cdot \ln(T)$$

4.4.2 Calculo de la Ley de Fatiga: La prueba de fatiga por tracción indirecta se realiza midiendo los módulos a diferentes niveles de esfuerzo en un rango de valores de esfuerzo de prueba entre 100 y 600 Kpa, particularmente se hacen pruebas por pares de briquetas sumando en total nueve briquetas y nueve puntos para la elaboración de la ley de fatiga. Sin embargo se puede realizar una ley de tipo restringido utilizando solo tres especímenes, pero si el valor del coeficiente de correlación estadística R^2 es menor de 0.90, se debe incrementar el número de especímenes. A medida que se reduce el número de especímenes se incrementa la incertidumbre sobre el ensayo, es importante tener en cuenta que los especímenes deben ser lo más homogéneos entre sí, en cuanto altura, diámetro y densidad.

Una vez se han realizado las pruebas de módulos dinámicos a esfuerzo controlado, se procede a realizar la prueba de fatiga, aplicando los mismos valores de esfuerzo aplicados en la prueba de módulos dinámicos. La carga se repite tantas veces como sea necesario para que los LVDTs registren un desplazamiento vertical de 10 mm. La frecuencia de carga es de 2.5 Hz, y la temperatura es de 20°C. la frecuencia del ensayo puede variar entre 5, 7.5 y 10 Hz.

Para el cálculo de las leyes de fatiga se hicieron dos pruebas, una con asfalto 60-70 y otra con asfalto modificado con Mexalpalte tipo II, en las cuales se obtuvieron las siguientes correlaciones, donde ϵ es la deformación unitaria de tracción y N es el número de ciclos de carga hasta la fatiga, ver anexo D:

* Asfalto 60-70

$$N = 2.84 \times 10^{12} * \epsilon^{-3.717}$$

* Asfalto Modificado con Mexalpalte tipo II

$$N = 3.634 \times 10^{12} * \epsilon^{-3.663}$$

5. DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

El dimensionamiento de la estructura de un pavimento es un tema que preocupa a los técnicos de carreteras desde el comienzo de este siglo. Durante mucho tiempo se han utilizado métodos que tienen gran correlación experimental y considerable tiempo de uso para su verificación. Estos métodos pueden ser de tipo empírico, semiempírico o racional. Estos últimos son los más empleados ya que se basan en consideraciones teóricas sobre distribución de esfuerzos y deformaciones, entre los cuales se pueden destacar el Navy, Shell y el del instituto del asfalto.

En el presente proyecto se emplea el método Shell para realizar un diseño de prueba con los dos tipos de asfaltos empleados, asfalto 60-70 y modificado con MEXPHALTE PM Tipo II, con el fin de establecer diferencias de tipo estructurales y económicas que permitan obtener conclusiones satisfactorias al final de este proyecto. A continuación se describe la base teórica del método Shell para el diseño de pavimentos asfálticos y seguidamente se muestran los diseños de prueba.

5.1 METODO SHELL PARA EL DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Este, es un método analítico que considera al pavimento como un sistema multicapa linealmente elástico, en el cual los materiales se encuentran caracterizados por su modulo de elasticidad de Young (E) y su relación de Poisson (μ). Para hacer esta evaluación se considera que los materiales son Homogéneos e isótropos y que además son infinitos de manera horizontal.

El tránsito se expresa en ejes equivalentes de 8.2 toneladas, con cargas aplicadas por medio de sistemas de rueda doble y área de contacto de las llantas circular con diámetro de 210 mm. Hay dos condiciones de falla, la primera por deformación horizontal por tracción (ϵ_t) en la fibra inferior de las capas asfálticas, estas al flexionar bajo las cargas de tránsito superan cierto límite admisible. La falla se manifiesta como agrietamiento; y la segunda es la deformación Vertical por compresión (ϵ_v) de la subrasante, al superar el límite admitido por esta. La falla se manifiesta como deformación permanente y por consiguiente en todo el pavimento.

La filosofía del método es elegir la combinación de espesores y características de los materiales (ϵ y μ) de modo que las deformaciones por tracción (ϵ_t) y vertical por compresión (ϵ_v), permanezcan dentro de límites admisibles durante el periodo de diseño del pavimento.

5.2 DISEÑO DE ESPESORES CON ASFALTO 60-70

Se debe diseñar la estructura de un pavimento asfáltico que tenga una vida útil de 10 años para un tramo de un kilómetro de vía de dos carriles en el sector comprendido entre la carretera la Cordialidad y el municipio de Santa Rosa en el departamento de Bolívar, cuyos datos entregados a la consultaría fueron los siguientes:

- TPD = 430 Vehículos, con porcentaje (A,B+C) de (55%, 45%)
- Rata de crecimiento = 3%
- Factor Camión = 2.2
- Ancho de Carril = 3.5 m
- CBR Subrasante = 5%
- Súbase a emplear CBR = 20%, y Base de 80% CBR.

5.2.1 **Cálculo del tránsito:** Se debe calcular el número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 Ton que se espera circulen en la vía durante el periodo de diseño, y se hace mediante la siguiente expresión:

$$N = TPD \times (A/100) \times (B/100) \times 365 \times ((1+r)^n - 1) / \ln(1+r) \times FC$$

Donde al reemplazar los datos se obtiene un número de repeticiones de carga de 994317 ejes, al redondear se obtiene $N = 1 \times 10^6$.

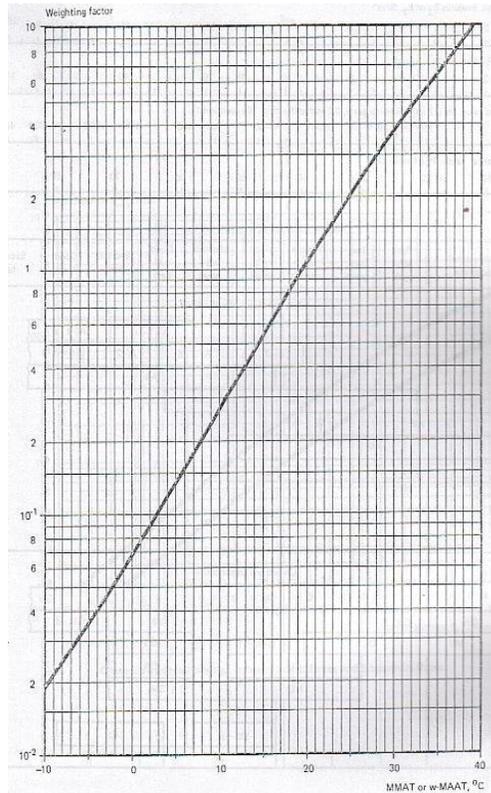
5.2.2 **La temperatura:** El objetivo del diseño es calcular la temperatura media anual ponderada del aire (w-MAAT) en la región del proyecto, la cual se define por medio de las temperaturas medias mensuales del aire (MMAT). Estas temperaturas se obtuvieron con registros del HIMAT y se presentan en la siguiente tabla 9, y con ella los factores de ponderación obtenidos en la grafica W del método Shell.

Tabla 9. Registro de temperaturas mensuales.

Mes	MMAT, °C	Factor de Pond.
Enero	32	4.6
Febrero	29	3.2
Marzo	30	3.7
Abril	28	2.9
Mayo	27	2.6
Junio	28	2.9
Julio	29	3.2
Agosto	27	2.6
Septiembre	28	2.9
Octubre	29	3.2
Noviembre	30	3.7
Diciembre	30	3.7
Total		39.2

El factor promedio de ponderación es de 3.27, y entrando a la grafica W genera un w-MAAT de 29°C, ver figura 29.

Figura 29. Grafica W para factor de ponderación.



5.2.3 Propiedades de la subrasante, súbase y base: El cálculo del módulo resiliente de la base y demás capas se calcula en el método Shell por medio de la siguiente expresión:

$$MR = 10^7 \times CBR \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Y al calcular se obtienen los siguientes módulos:

- Subrasante = 5×10^7 (N/m²)
- Súbase = 2×10^8 (N/m²)
- Base = 8×10^8 (N/m²)

5.2.4 Características de la mezcla asfáltica: Existen infinidad de variedades de mezclas asfálticas, pero para efecto del método Shell se consideran dos propiedades fundamentales que son la rigidez de la mezcla y la resistencia a la fatiga. Para obtener el código de diseño se siguen los siguientes pasos:

5.2.4.1 Determinación del índice de penetración y la temperatura T_{800} del asfalto: El asfalto empleado es 60-70 que en el ensayo de penetración a 25°C se obtuvo un resultado de 68 (0.1mm), y que tiene un índice de penetración de -1. Entrando al nomograma 5.40 del libro de Alfonso Montejo se obtiene un valor de T_{800} de 55°C.

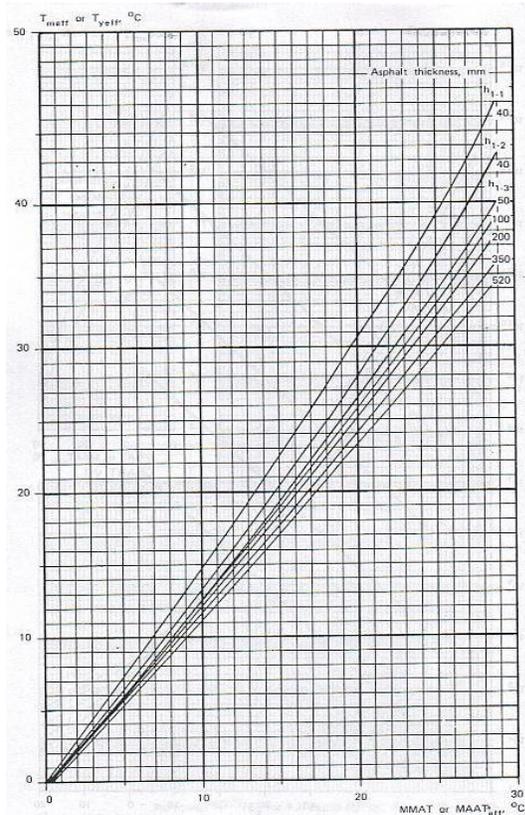
5.2.4.2 Determinación del Stiffness del asfalto a la temperatura de trabajo en obra: Para el calculo de esta resistencia se emplea la grafica de Van Deer Poel (Nomograma 5.41 del libro de pavimentos de Montejo), entrando con el tiempo de aplicación de carga de 10Hz que simula una velocidad de 60 Km/h. Se debe calcular la temperatura de la mezcla en obra entrando en la grafica RT del manual Shell con la temperatura w-MAAT y se corta con el espesor mas pequeño (condición mas desfavorable) y en el eje de las ordenadas se calcula el valor de T_{mix} que es la temperatura de la mezcla que en nuestro caso es de 42°C, ver figura 30.

Con esta temperatura y la T_{800} se calcula ΔT , que es la diferencia de las dos así:

$$\Delta T = T_{800} - T_{mix}$$

Dando como resultado $\Delta T = 13^\circ\text{C}$, y cortando con el índice de penetración que es de -1 se obtiene un valor de rigidez del asfalto de $2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Figura 30. Grafico Temperatura del aire VS temperatura mezcla



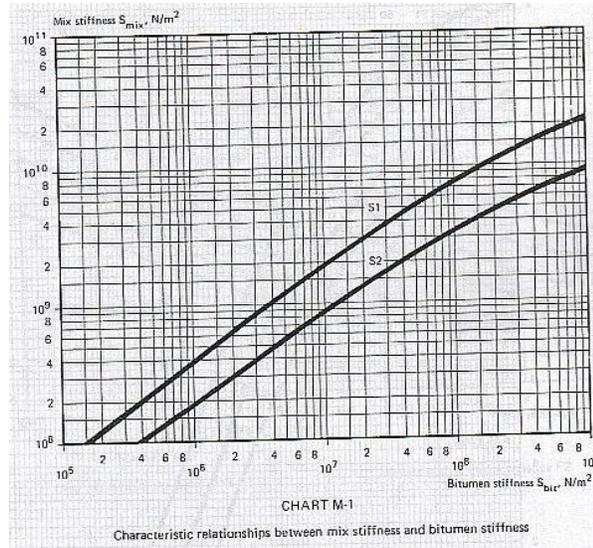
5.2.4.3 **Determinación del Stiffness de la mezcla asfáltica:** Para el calculo del stiffness de la mezcla se puede emplear el nomograma de Heukelom, o en su defecto el modulo dinámico encontrado en pruebas de laboratorio. En este caso se cuenta con la ecuación que define el modulo dinámico de la mezcla a diferentes temperaturas de trabajo, descrita en el capitulo 4.4.1 del presente trabajo y se muestra a continuación:

$$MD = 16404.07 - 4135.6 \cdot \ln(T)$$

Y al remplazar la temperatura de la mezcla $T_{mix} = 42^{\circ}\text{C}$ se obtiene un modulo dinámico o stiffness de 946 Mpa, o $9.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

5.2.4.4 **Identificación del código de rigidez de la mezcla (S1 o S2):** Para esto se emplea la grafica M-1 del manual Shell entrando en las abscisas con la rigidez del asfalto y en las ordenadas con la rigidez de la mezcla y se nota a que curva se acerca más el punto, dando como resultado Tipo S1, ver figura 31.

Figura 31. Grafica para código de mezcla S1 y S2



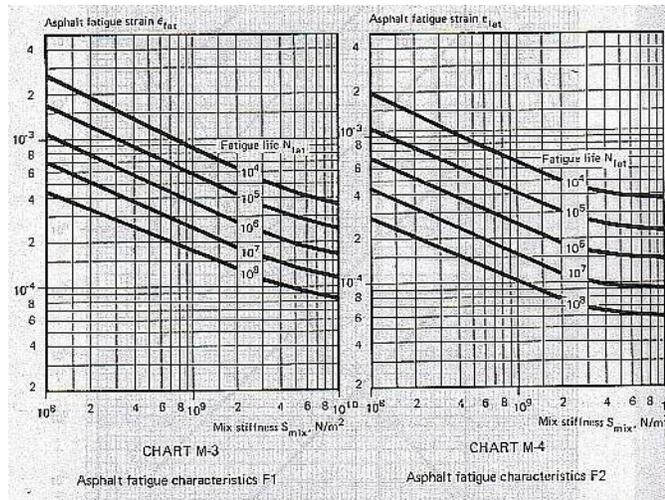
5.2.4.5 **Determinación de la deformación máxima admisible específica de tracción en la fibra inferior de las capas asfálticas:** Teniendo en cuenta las ecuaciones de ley de fatiga encontradas en el capítulo 4.4.2 del presente trabajo, se puede calcular la deformación de la fibra inferior con la ecuación:

$$\epsilon = N^{-0.269} \times 10^{3.35}$$

Donde $N = 1000000$ de ejes o repeticiones de carga, generando un valor de $\epsilon = 54.5 \times 10^{-6}$.

5.2.4.6 **Identificación del código de fatiga de la mezcla:** Para esta identificación se emplean las graficas M-3 y M-4 del manual de la Shell y se entra con el stiffness de la mezcla y la deformación unitaria, encontrando en este caso un código de fatiga tipo F2, ver figura 32.

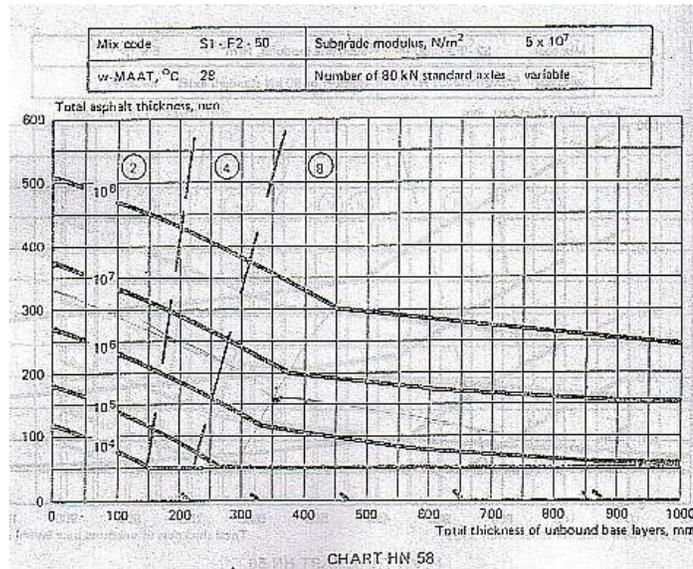
Figura 32. Gráficos para código de mezcla F1 y F2



5.2.4.7 **Identificación del código total de la mezcla:** Teniendo en cuenta los códigos obtenidos en el numeral 5.2.4.4 y el 5.2.4.6, y sabiendo que el asfalto es de penetración 60-70, se escoge el código de mezcla S1F2-50, 50 por ser la penetración mas cercana que contiene el manual.

5.2.5 **Diseño estructural:** Para la escogencia de la grafica de diseño Shell se debe tener en cuenta el Transito esperado N que es de 1×10^6 , la temperatura del aire $w\text{-MAAT} = 29^\circ\text{C}$ (se puede aproximar al valor de 28°C que contiene el manual), los módulos de la subrasante, súbbase y de la base, y el código de la mezcla que es S1F2-50. La grafica que se ajusta a los valores antes mencionados es la HN-58, figura 33.

Figura 33. Grafico de diseño HN 58

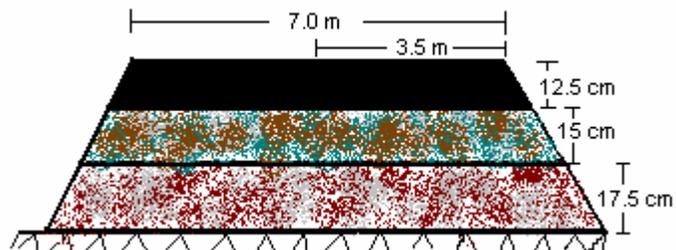


Donde se ha demostrado que el punto optimo es donde se cruzan las curvas de esfuerzos (punto de inflexión), obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 10 Y la estructura definitiva mostrada en la figura 34.

Tabla 10. Espesores de pavimento con asfalto 60-70

Capa	Especificación	Espesor (mm)	Espesor (pulg.)
Carpeta Asfáltica	MDC-2	125	5
Base Granular	CBR 80%	150	6
Súbase Granular	CBR 20%	175	7
Subrasante	CBR 5%	NA	NA

Figura 34. Estructura de pavimento usando asfalto 60-70



5.3 DISEÑO DE ESPESORES CON ASFALTO MODIFICADO CON MEXPHALTE PM TIPO II

Para este diseño se van a adoptar todos los datos empleados en el numeral 5.2, con el objetivo de poder comparar físicamente y económicamente los resultados obtenidos, y así poder decidir la mejor opción en el diseño de mezclas asfálticas. Por tal motivo los numerales de tránsito, temperaturas y capas granulares se va a obviar en este subcapítulo para entrar de lleno en el diseño definitivo. Cabe indicar que los resultados obtenidos seguirán siendo los mismos.

5.3.1 Características de la mezcla asfáltica: Para obtener el código de diseño se siguen los siguientes pasos:

5.3.1.1 Determinación del índice de penetración y la temperatura T_{800} del asfalto: El asfalto empleado es MEXPHALTE PM TIPO II que en el ensayo de penetración a 25°C se obtuvo un resultado de 55 (0.1mm), y que tiene un índice de penetración de 0.5. Entrando al nomograma 5.40 del libro de Alfonso Montejo se obtiene un valor de T_{800} de 60°C.

5.3.1.2 Determinación del Stiffness del asfalto a la temperatura de trabajo en obra: Para el cálculo de esta resistencia se emplea la gráfica de Van Deer Poel (Nomograma 5.41 del libro de pavimentos de Montejo), entrando con el tiempo de aplicación de carga de 10Hz que simula una velocidad de 60 Km/h. Se debe calcular la temperatura de la mezcla en obra entrando en la gráfica RT del manual Shell con la temperatura w-MAAT y se corta con el espesor mas pequeño (condición mas desfavorable) y en el eje de las ordenadas se calcula el valor de T_{mix} que es la temperatura de la mezcla que en nuestro caso es de 42°C.

Con esta temperatura y la T_{800} se calcula ΔT , que es la diferencia de las dos así:

$$\Delta T = T_{800} - T_{mix}$$

Dando como resultado $\Delta T = 18^\circ\text{C}$, y cortando con el índice de penetración que es de 0.5 se obtiene un valor de rigidez del asfalto de $5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

5.3.1.3 Determinación del Stiffness de la mezcla asfáltica: Para el cálculo del stiffness de la mezcla se puede emplear el nomograma de Heukelom, o en su defecto el módulo dinámico encontrado en pruebas de laboratorio. En este caso se cuenta con la ecuación que define el módulo dinámico de la mezcla a diferentes temperaturas de trabajo, descrita en el capítulo 4 del presente trabajo y se muestra a continuación:

$$MD = 23783.95 - 6018.51 \cdot \ln(T)$$

Y al reemplazar la temperatura de la mezcla $T_{mix} = 42^\circ\text{C}$ se obtiene un módulo dinámico o stiffness de 1289 Mpa, o $1.3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.

5.3.1.4 Identificación del código de rigidez de la mezcla (S1 o S2): Para esto se emplea la gráfica M-1 del manual Shell entrando en las abscisas con la rigidez del asfalto y en las ordenadas con la rigidez de la mezcla y se nota a que curva se acerca más el punto, dando como resultado Tipo S1.

5.3.1.5 Determinación de la deformación máxima admisible específica de tracción en la fibra inferior de las capas asfálticas: Teniendo en cuenta las ecuaciones de ley de fatiga encontradas en el capítulo 4 del presente trabajo, se puede calcular la deformación de la fibra inferior con la ecuación:

$$\varepsilon = N^{-0.273} \times 10^{3.429}$$

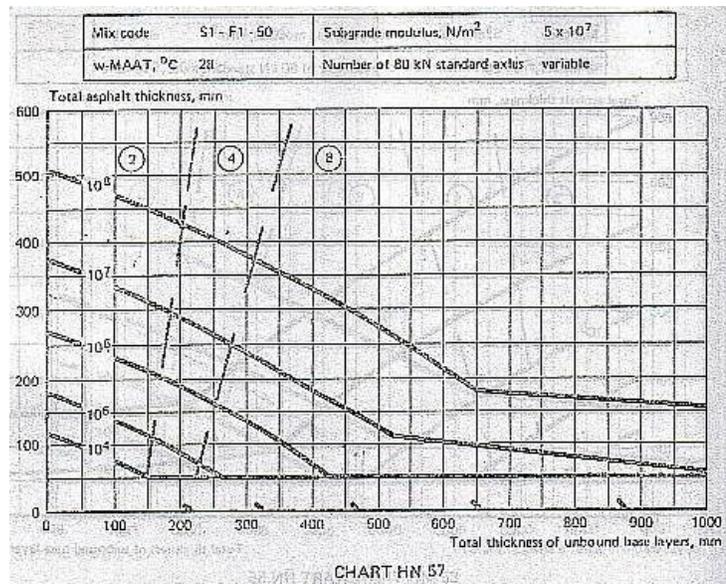
Donde $N = 1000000$ de ejes o repeticiones de carga, generando un valor de $\varepsilon = 61.8 \times 10^{-6}$.

5.3.1.6 **Identificación del código de fatiga de la mezcla:** Para esta identificación se emplean las graficas M-3 y M-4 del manual de la Shell y se entra con el stiffness de la mezcla y la deformación unitaria, encontrando en este caso un código de fatiga tipo F1.

5.3.1.7 **Identificación del código total de la mezcla:** Teniendo en cuenta los códigos obtenidos en el numeral 5.3.1.4 y el 5.3.1.6, y sabiendo que el asfalto es de penetración 50-60, se escoge el código de mezcla S1F1-50, 50 por ser la penetración mas cercana que contiene el manual.

5.3.2 **Diseño estructural:** Para la escogencia de la grafica de diseño Shell se debe tener en cuenta el Transito esperado N que es de 1×10^6 , la temperatura del aire $w\text{-MAAT} = 29^\circ\text{C}$ (se puede aproximar al valor de 28°C que contiene el manual), los módulos de la subrasante, súbbase y de la base, y el código de la mezcla que es S1F1-50. La grafica que se ajusta a los valores antes mencionados es la HN-57, ver figura 35.

Figura 35. Grafico de diseño HN 57

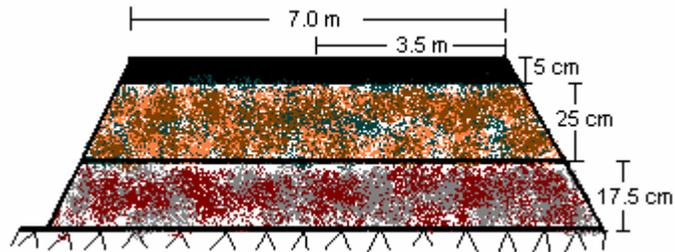


Donde se ha demostrado que el punto optimo es donde se cruzan las curvas de esfuerzos (punto de inflexión), obteniendo resultados que se muestran en la tabla 11, y la estructura definitiva mostrada en la figura 36.

Tabla 11. Espesores de pavimento con Mexphalte PM tipo II

Capa	Especificación	Espesor (mm)	Espesor (pulg.)
Carpeta Asfáltica	MDC-2	50	2
Base Granular	CBR 80%	250	10
Súbase Granular	CBR 20%	175	7
Subrasante	CBR 5%	NA	NA

Figura 36. Estructura de pavimento usando asfalto con aditivos.



6. ANÁLISIS ECONOMICO DE LOS PAVIMENTOS

En los anteriores capítulos se ha demostrado que al usar pavimentos con mezclas asfálticas modificadas se obtienen resultados mayores que al utilizar las mismas estructuras con asfaltos comunes. El objetivo de este capítulo es establecer una comparación de carácter económico entre los dos tipos de pavimentos, con el fin de poder obtener una solución óptima, que genere la mejor estructura pero con los menores costos, y de esta forma asegurar la vida útil del pavimento.

A continuación se describen los análisis de precios unitarios y los presupuestos para el diseño estructural de pavimento planteado en el numeral 5.2.

6.1 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

6.1.1 Mezcla asfáltica MDC-2 con asfalto 60-70 suelta en planta.

ITEM : MDC-2, con Asfalto 60-70
UNIDAD : M3 (Suelto)
FECHA : 5 de Febrero de 2007

MATERIALES	UN	CANT,	VR. UNITARIO	VR. PARCIAL
Asfalto 60-70	Kg	105	\$ 850,00	\$ 89.250,00
Triturado de 3/4	M3	0,18	\$ 45.000,00	\$ 8.100,00
Triturado de 1/2	M3	0,35	\$ 45.000,00	\$ 15.750,00
Arena de San Juan	M3	0,28	\$ 40.000,00	\$ 11.200,00
Arena de Bayunca	M3	0,25	\$ 23.000,00	\$ 5.750,00
SUB-TOTAL				\$ 130.050,00
MANO DE OBRA	REN	JORN+ PRESTAC.		VR. PARCIAL
Jefe de planta	0,1	\$ 100.000		\$ 10.000
Operador de Planta	0,1	\$ 40.000		\$ 4.000
Ayudantes	0,1	\$ 30.000		\$ 3.000
SUB-TOTAL				\$ 17.000

EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	REN	TARIFA	VR. PARCIAL
Planta de Asfalto Continua	0,01	\$ 1.200.000,00	\$ 12.000,00
Cargador de Llantas	0,01	\$ 800.000,00	\$ 8.000,00
herramientas Menores			\$ 1.000,00
SUB-TOTAL			\$ 21.000,00
COSTO DIRECTO			\$ 168.050,00
AUI (25%)			\$ 42.012,50
COSTO TOTAL			\$ 210.062,50

6.1.2 Mezcla asfáltica MDC-2 con asfalto Mexphalte PM tipo II suelta en planta.

ITEM : MDC-2, con Asfalto Mexphalte PM tipo II
UNIDAD : M3 (Suelto)
FECHA : 5 de Febrero de 2007

MATERIALES	UN	CANT,	VR. UNITARIO	VR. PARCIAL
Asfalto 60-70	Kg	105	\$ 1.900,00	\$ 199.500,00
Triturado de 3/4	M3	0,18	\$ 45.000,00	\$ 8.100,00
Triturado de 1/2	M3	0,35	\$ 45.000,00	\$ 15.750,00
Arena de San Juan	M3	0,28	\$ 40.000,00	\$ 11.200,00
Arena de Bayunca	M3	0,25	\$ 23.000,00	\$ 5.750,00
SUB-TOTAL				\$ 240.300,00
MANO DE OBRA	REN	JORN+ PRESTAC.		VR. PARCIAL
Jefe de planta	0,1	\$ 100.000		\$ 10.000
Operador de Planta	0,1	\$ 40.000		\$ 4.000
Ayudantes	0,1	\$ 30.000		\$ 3.000
SUB-TOTAL				\$ 17.000
EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	REN	TARIFA	VR. PARCIAL	
Planta de Asfalto Continua	0,01	\$ 1.200.000,00	\$ 12.000,00	
Cargador de Llantas	0,01	\$ 800.000,00	\$ 8.000,00	
herramientas Menores			\$ 1.000,00	
SUB-TOTAL			\$ 21.000,00	
COSTO DIRECTO			\$ 278.300,00	
AUI (25%)			\$ 69.575,00	
COSTO TOTAL			\$ 347.875,00	

6.2.3 Base Granular de 80% CBR, suelta mezclada en planta.

ITEM : Base Granular, CBR 80%
UNIDAD : M3 (Suelto)
FECHA : 5 de Febrero de 2007

MATERIALES	UN	CANT,	VR. UNITARIO	VR. PARCIAL
Triturado 1"	M3	0,3	\$ 50.000,00	\$ 15.000,00
Arena de San Juan	M3	0,4	\$ 40.000,00	\$ 16.000,00
Arena de Bayunca	M3	0,4	\$ 23.000,00	\$ 9.200,00
SUB-TOTAL				\$ 40.200,00
EQUIPOS Y HERRAMIENTAS		REN	TARIFA	VR. PARCIAL
Cargador de Llantas		0,005	\$ 800.000,00	\$ 4.000,00
SUB-TOTAL				\$ 4.000,00
COSTO DIRECTO				\$ 44.200,00
AUI (25%)				\$ 11.050,00
COSTO TOTAL				\$ 55.250,00

6.2.4 Subbase granular 20% CBR, suelta mezclada en planta.

ITEM : Subbase Granular, CBR 20%
UNIDAD : M3 (Suelto)
FECHA : 5 de Febrero de 2007

MATERIALES	UN	CANT,	VR. UNITARIO	VR. PARCIAL
Zahorra	M3	0,8	\$ 25.000,00	\$ 20.000,00
Arena de Bayunca	M3	0,3	\$ 23.000,00	\$ 6.900,00
SUB-TOTAL				\$ 26.900,00
EQUIPOS Y HERRAMIENTAS		REN	TARIFA	VR. PARCIAL
Cargador de Llantas		0,005	\$ 600.000,00	\$ 3.000,00
SUB-TOTAL				\$ 3.000,00
COSTO DIRECTO				\$ 29.900,00
AUI (25%)				\$ 7.475,00
COSTO TOTAL				\$ 37.375,00

6.2 PRESUPUESTO DE PAVIMENTOS

La estructura de pavimento a presupuestar, como se comento en el capítulo 5.2, es un tramo de vía de 1000 metros y de 7 metros de ancho, generando un área de 7000 m² de pavimento. Las estructuras son las calculadas en los numerales 5.2 y 5.3, y cabe mencionar que los precios enunciados están relacionados a los materiales en boca de planta, ósea que no incluyen transporte y extensión y compactación, ya que estos valores son constantes, y el objetivo es comparar la diferencia en costos entre las dos mezclas fabricadas en planta, teniendo en cuenta que la base y subbase también serán procesadas en planta.

6.2.1 Presupuesto de fabricación de materiales para estructura de pavimento usando asfalto 60-70.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Ud.	Valor Total
1	Mezcla Asfáltica	M3	1094	\$ 210.062	\$ 229.807.828
2	Base Granular	M3	1365	\$ 55.250	\$ 75.416.250
3	Subbase granular	M3	1593	\$ 37.375	\$ 59.538.375
TOTAL					\$ 364.762.453

6.2.2 Presupuesto de fabricación de materiales para estructura de pavimento usando asfalto modificado Mexphalte PM tipo II.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Ud.	Valor Total
1	Mezcla Asfáltica	M3	437	\$ 347.850	\$ 152.010.450
2	Base Granular	M3	2275	\$ 55.250	\$ 125.693.750
3	Subbase granular	M3	1593	\$ 37.375	\$ 59.538.375
TOTAL					\$ 337.242.575

Donde se nota que la producción con asfalto modificado es **\$ 27.519.878** mas económica que con asfalto 60-70 (ver gráficas comparativas en anexo F).

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo fundamental de este proyecto es el de mejorar la propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica producida en la planta de asfalto Torcoroma, perteneciente a la empresa constructora Promotora Montecarlo Vías S.A, utilizando asfalto modificado con polímeros, donde particularmente se utilizó el producto distribuido por Shell Betumen Mexphalte PM tipo II, hipótesis que se demuestra a cabalidad a lo largo de esta investigación y que se detalla a continuación con las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- * Para el modelo académico se emplearon composiciones de agregados iguales para los dos tipos de asfalto, pero a la hora de realizar el diseño de mezcla con asfalto modificado se pueden obtener porcentajes menores de materiales costosos que harían el diseño más económico.
- * En los resultados de los análisis a los asfaltos, se nota que el asfalto modificado presenta una menor susceptibilidad térmica, ya que la penetración a 25°C es menor y el punto de ablandamiento es mayor. Esto se puede verificar al comparar los índices de penetración que es de -1 para el asfalto 60-70 y de 0.5 para el modificado.
- * Los dos asfaltos comparados son producidos por la empresa Shell Betumen, situación que hace que las distancias de acarreo sean iguales y no genera ningún costo adicional el transporte de cualquiera de los dos productos.
- * El asfalto modificado se puede almacenar en los mismos tanques en que se almacena el asfalto normal sin que tenga ningún peligro de decantación del aditivo, y que necesite un sistema de mezclado constante. Este producto viene mezclado de planta y contiene también aditivos homogenizantes.

- * El asfalto modificado va a tener un costo adicional en calentamiento ya que este tiene que estar a una temperatura mayor a 160°C para su mezclado con los agregados, por el contrario el asfalto 60-70 necesita 150°C para su dosificación.
- * El tiempo de homogenización en planta va a ser mayor en el asfalto modificado que en el asfalto normal, situación que hace un poco mas demorada la producción de la mezcla, retraso que no es representativo en la jornada de producción diaria.
- * El porcentaje de asfalto necesario para alcanzar el diseño óptimo de mezcla es menor en el asfalto modificado que en el asfalto normal, reduciendo de esta forma los costos de producción.
- * Las densidades de las mezclas son prácticamente iguales, así como los demás parámetros de diseño, pero al observar las estabilidades se nota que hay una diferencia de 876 libras entre las mezclas, cifra que equivale al 28.3% que es un valor considerable a la hora de concebir del diseño.
- * Los ensayos realizados por la empresa Corasfaltos a las mezclas demuestran que el modulo dinámico de la mezcla con asfalto modificado es mayor que el de la mezcla normal, y las deformaciones de fatiga son menores, resultados que demuestran la calidad de la mezcla con respecto a ensayos en el tiempo.
- * En este proyecto se ensayaron productos de la empresa Shell por motivos de confiabilidad y por que son los actualmente empleados por la empresa PMV, pero los diseños se pueden montar con asfaltos producidos en otras empresas como MPI o ECOPETROL.
- * La metodología empleada para diseñar la estructura de pavimento ficticia corresponde al método Shell, pero se pueden revisar espesores por métodos empíricos como la AASHTO, y verificar resultados, revisión que se puede realizar en trabajos posteriores.
- * Las estructuras diseñadas se obtuvieron suponiendo periodos de vida útil iguales, supuesto que generó espesores diferentes, pero se puede

demostrar que al suponer espesores iguales se llega a la conclusión que el asfalto modificado proporciona una mayor vida a las estructuras de pavimento.

- * Todos los análisis de precios unitarios fueron calculados insertando los costos de producción y mezclado en planta ya que esta es el foco principal del proyecto. Cabe anotar que al anexar los costos de extensión y compactación de subbases, bases y mezcla asfáltica se obtienen valores mas altos en el presupuesto final que el calculado en este proyecto, situación que hace la mezcla modificada una opción ideal en el aspecto constructivo.
- * Al comparar los presupuestos finales mostrados en el capítulo 6 se nota que hubo una diferencia del 7.55% en los costos de producción de los materiales para construir las capas del pavimento, cifra que demuestra la viabilidad de la mezcla asfáltica con asfalto modificado.
- * Es necesario concientizar a los contratistas y mucho mas a los contratantes de obras viales que el uso de agentes modificadores se convierte en una opción ideal a la hora de mejorar la calidad de las mezclas producidas, aunque parezcan altos los costos iniciales, peor teniendo en cuenta que los costos totales se van a reducir en un porcentaje muy alto.

BIBLIOGRAFIA

ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES Y PAVIMENTADORES ASFALTICOS DE COLOMBIA, ASOPAC, Cartilla del Pavimento Asfáltico, 1ª Edición, Bogotá (Colombia) 2004.

GARNICA ANGUAS, Paúl. Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica numero 246. Sanfandila, Qro 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, INVIAS. Normas de Ensayos para Materiales de Carreteras. Santa fe de Bogotá, Colombia, 1996.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Primera edición, Santa fe de Bogota, 1997.

RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica numero 104. Sanfandila, Qro 1998.

Shell International Petroleum Company Limited. Shell Pavement design manual (asphalt pavements and overlays for road traffic). Londres 1978.

SÁNCHEZ SABOGAL, Diego. Guía para la ejecución e interpretación de los resultados de laboratorio de pavimentos, Bogota.1990.

THE ASPHALT INSTITUTE. Asphalt materials, mixes, construction and quality, Productos Asfálticos S.A., Madrid, España. 1985. pp 22-30, 40-73, 37-40.