



**CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO EN ASFALTOS EN EL SECTOR
TRANSPORTE E INDUSTRIAL
CORASFALTOS**



**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
EN CRUDOS PESADOS Y ASFALTOS
NATURALES PARA LA CONSTRUCCIÓN
DE VÍAS SECUNDARIAS Y TERCIARIAS**

DOCUMENTO TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN EN CRUDOS PESADOS Y ASFALTOS NATURALES
PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS SECUNDARIAS Y TERCARIAS



**CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
EN ASFALTOS EN EL SECTOR TRANSPORTE E INDUSTRIAL**
CORASFALTOS

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD: CERTIFICADO ISO 9001: 2000

LABORATORIO DE ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS ACREDITADO POR
LA SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO, RESOLUCIÓN 20169
DEL 19 DE JUNIO DE 2001.

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA CERTIFICADO DEL
PANAMERICAN HIGHWAY INSTITUTE DE JULIO 31 DEL 2001

MIEMBRO DE LA ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DEL ASFALTO

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN EN CRUDOS PESADOS Y ASFALTOS
NATURALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS SECUNDARIAS Y
TERCIARIAS

DOCUMENTO TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

"SENA"

MAYO DE 2004



Código N° 1905-1
Prestación de Servicios de
Laboratorio y Fabricación de
Aditivos para Asfaltos y
Mezclas Asfálticas
NTC-ISO 9001:2000

CERTIFICADO DE ACREDITACIÓN



Industria y Comercio
SUPERINTENDENCIA
Resolución 20169 19/06/01
Laboratorio de Ensayos para
Asfaltos y Mezclas Asfálticas

Instituto Panamericano de Carreteras



Pan American Institute of Highways





CORASFALTOS es una entidad mixta de carácter civil sin ánimo de lucro que propende por la integración, difusión y mejoramiento del conocimiento sobre los asfaltos y los materiales empleados en la construcción de la infraestructura vial. Brinda soporte para satisfacer las necesidades tecnológicas en asfaltos y/o pavimentos a los sectores industrial, estatal y educativo. Para ello cuenta con talento humano calificado, tecnología de punta, conocimiento e infraestructura física, trabajando en equipo con filosofía de mejoramiento continuo.

Copyright © 2004 por la Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector Transporte e Industrial - CORASFALTOS. Reservados todos los derechos. Ninguna parte del material cubierto por este título de propiedad literaria puede ser reproducida, almacenada en un sistema de informática o transmitida de cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros métodos, sin el previo y expreso permiso por escrito del editor.

Edición en Español.

Impreso en Colombia por
DISEÑO EMPRESARIAL
Bucaramanga

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS CRUDOS DE PETRÓLEOS	7
2.1.	Crudos del Petróleo	7
2.2.	Clasificación De Los Crudos	7
2.2.1	Clasificación según la densidad API	7
2.2.2	Clasificación por la composición química	8
3.	PRODUCTOS ASFÁLTICOS PARA PAVIMENTACIÓN	9
3.1	Cemento Asfáltico	10
3.2	Asfaltos Naturales	10
3.3	Crudos Pesados	12
4.	CLASIFICACION DE LA RED VIAL NACIONAL	13
4.1.	Sistemas de Carreteras	13
4.2	Fuentes de Financiación	14
5.	ADITIVOS	15
6.	MEJORAMIENTO DE PROPIEDADES DE LOS CRUDOS PESADOS Y LOS ASFALTOS NATURALES	15
6.1	Mezclas Físicas y Modificación Química	15
7.	EJEMPLOS DE EVALUACIÓN, MODIFICACIÓN Y PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO	17
7.1	Asfaltos Naturales	17
7.1.1	Caracterización Físico-Química	17
7.1.2	Curvas Reológicas	18
7.1.3	Temperaturas Óptimas de Mezclado y Compactación	20
7.1.4	Destilación Simulada	20
7.1.5	Grado de Desempeño (PG)	21
7.2	Crudos Pesados	23
7.2.1	Caracterización Físico-Química	23
7.2.2	Curvas Reológicas	24
7.2.3	Temperaturas Óptimas de Mezclado y Compactación	24
7.2.4	Caracterización Físicoquímica Asfaltos Residuales de los Crudos Pesados	25
7.2.5	Grado de Desempeño (PG)	26
7.2.6	Grado de Desempeño de los Asfaltos de los Crudos Pesados	28
7.2.7	Modificación de Crudos Pesados con Aditivos	28
8.	DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	29
8.1	Asfaltita San Pedro	29
8.2	Asfaltita Pesca	30
8.3	Crudo Rubiales	30
8.4	Crudo Cedral	31
9.	PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN	32
9.1	Crudos Pesados	32



9.1.1	Mantenimiento y Construcción del Sistema de Drenaje	33
9.1.2	Preparación de la Superficie de Apoyo	33
9.1.3	Riego de Imprimación	33
9.1.4	Proceso de Mezclado de los Materiales	34
9.1.4.1	Mezclado en Vía o en Patio	34
9.1.4.2	Mezcla en Planta	34
9.1.5	El proceso de Curado	35
9.1.6	Proceso de Extendido y Compactación de la Mezcla	36
9.1.7	Puesta en Servicio	36
9.1.8	Control de Calidad	37
9.1.9	Costos de Construcción	37
9.2	Asfaltos Naturales	38
9.2.1	Procedimiento	38
9.2.2	Costos de Construcción	38
10.	TRAMOS EXPERIMENTALES	39
10.1	Procedimiento	39
10.2	Clasificación de los Suelos	39
10.3	Tramo 1: Armero Guayabal	40
10.3.1	Caracterización de la Capa de Fundación o Subrasante	40
10.3.2	Diseño de la Estructura de Pavimento	40
10.3.3	Seguimiento de las Principales Actividades de Construcción	41
10.3.4	Seguimiento Posterior y Verificación del Comportamiento de la Vía	45
10.4	Tramo 2: San Agustín	45
10.4.1	Caracterización de la Capa de Fundación o Subrasante	46
10.4.2	Diseño de la Estructura de Pavimento	46
10.4.3	Seguimiento de las Principales Actividades de Construcción	48
10.4.4	Seguimiento Posterior y Verificación del Comportamiento de la Vía	53
10.5	Recomendaciones Generales para Construcción de Tramos Experimentales	53
11.	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORAMIENTO VIAL	54
11.1	Definición General de HDM	54
11.2	Alternativas de los Tramos Experimentales	55
11.2.1	Tramo Armero Guayabal (Tolima)	55
11.2.2	Tramo San Agustín (Huila)	55
11.3	Costos de Construcción y Datos de Entrada	55
11.4	Análisis de Resultados	56
11.4.1	Comparación Económica General de Alternativas: Tramo Armero Guayabal (Tolima)	56
11.4.2	Comparación Económica General de Alternativas: Tramo San Agustín (Huila)	57
11.5	Relación Beneficio / Costo y Tasa Interna de Retorno	57
12.	CONCLUSIONES	58
13.	BIBLIOGRAFÍA	59



1. INTRODUCCIÓN

La construcción de vías secundarias y terciarias principalmente en el área rural genera desarrollo social y económico. Su construcción requiere de materiales de bajo costo, alta disponibilidad y con propiedades que garanticen larga vida de servicio con un costo mínimo de mantenimiento. A su vez resulta ideal que estos materiales sean de relativa abundancia y que para su procesamiento requiera tecnología limpia tradicional con el consecuente mínimo impacto ambiental. En este manual se muestran los resultados del proyecto de investigación aplicada **en crudos pesados y asfaltos naturales para la construcción de vías secundarias y terciarias** que incluyen la evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los crudos pesados y asfaltos naturales desde el punto de vista de su aplicación como ligantes asfálticos, para la construcción y mantenimiento de vías. Inicialmente se definen y clasifican los crudos pesados y los asfaltos naturales, y se describe el sistema nacional de carreteras. Posteriormente se presenta la fundamentación teórica para el mejoramiento de las propiedades de estos crudos pesados y asfaltos naturales. Finalmente se presentan los resultados obtenidos experimentalmente en laboratorio, la evaluación, modificación y predicción del comportamiento de las mezclas asfálticas.

Como resultado del estudio, se establecen los parámetros de diseño de las mezclas asfálticas, preparadas a partir de los asfaltos naturales de las Minas San Pedro y Pesca, y de los crudos pesados Rubiales y Cedral. Finalmente se muestran los resultados obtenidos con estas mezclas para la construcción de tramos experimentales, como Armero Guayabal y vías urbanas del Municipio de San Agustín, aunque igualmente se construyó un tramo en la vía Pesca-Toca (Boyacá)

Estas experiencias de laboratorio y campo servirán de guía para el uso de los crudos pesados y asfaltos naturales para la construcción de pavimentos de vías secundarias y terciarias.



2. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS CRUDOS DE PETRÓLEOS

El petróleo es el mineral más utilizado desde finales del siglo XIX. La variedad de los productos derivados de su procesamiento supera a los de cualquier otro mineral empleado por el hombre y ha sido un factor fundamental para el desarrollo económico y social de la humanidad.

2.1. CRUDOS DEL PETRÓLEO

El petróleo obtenido de los pozos es un líquido oscuro más o menos espeso, de densidad inferior a la del agua, formado por una mezcla de diversos hidrocarburos líquidos que se extraen de yacimientos naturales.

2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CRUDOS

Los yacimientos de petróleo crudo muestran gran diversidad de forma física y composición química. Cada yacimiento es distinto y propone un proceso de refinación diferente del cual es posible obtener infinidad de productos para la industria y el comercio.

Una forma para clasificar los petróleos es conocer el contenido de fracciones destilables y de asfalto residual; para ello se recurre a pruebas físicas sencillas, como la densidad expresada de un modo arbitrario en grados API, mediante la siguiente expresión matemática:

$$API = \frac{141,5}{\text{Gravedad específica}} - 131,5$$

2.2.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA DENSIDAD API

De acuerdo con la densidad, los crudos se pueden clasificar en crudos livianos, medios y pesados, de acuerdo con la siguiente tabla:

TIPO DE CRUDO	GRADOS API
Pesados	< 20
Medios	Entre 21 y 30
Livianos	> 31

Tabla 1. Clasificación de crudos de acuerdo con densidad API

• Crudos Livianos.

Son los que presentan alta gravedad API (> 31), o baja densidad; con bajos contenidos de betún y cantidades apreciables de parafina, predominan en su composición los hidrocarburos parafínicos. De estos se obtienen lubricantes de muy buena calidad.



▪ **Crudos Medios**

Son aquellos que tienen una gravedad API intermedia, entre 21 y 30 °API. Tienen contenidos medios de asfaltos, bajos en ceras y presencia de hidrocarburos nafténicos y aromáticos.

▪ **Crudos Pesados**

Son aquellos que presentan baja gravedad API (< 20) o alta densidad. Tienen por lo general altos contenidos de asfalto y generalmente predominan en su composición los hidrocarburos aromáticos. De su destilación fraccionada se obtienen asfaltos residuales de buena calidad.

2.2.2 CLASIFICACIÓN POR LA COMPOSICIÓN QUÍMICA

Teniendo en cuenta la composición química predominante, los crudos se clasifican en **parafínicos, intermedios y nafténicos**.

- **Crudos Parafínicos:** Son aquellos que contienen alta cantidad de hidrocarburos saturados (ceras).
- **Crudos Intermedios:** Son aquellos que contienen cantidades equilibradas de hidrocarburos saturados y no saturados (aromáticos).
- **Crudos Nafténicos:** Son aquellos que contienen altas cantidades de hidrocarburos no saturados, generalmente aromáticos de alto peso molecular.

3. PRODUCTOS ASFÁLTICOS PARA PAVIMENTACIÓN

En la figura 1 se muestra el esquema básico de una planta refinadora de petróleo crudo y en la figura 2 se ilustran las fracciones del petróleo que pueden obtenerse en la destilación atmosférica 5-15 de la norma ASTM 2892 y de la destilación a alto vacío.

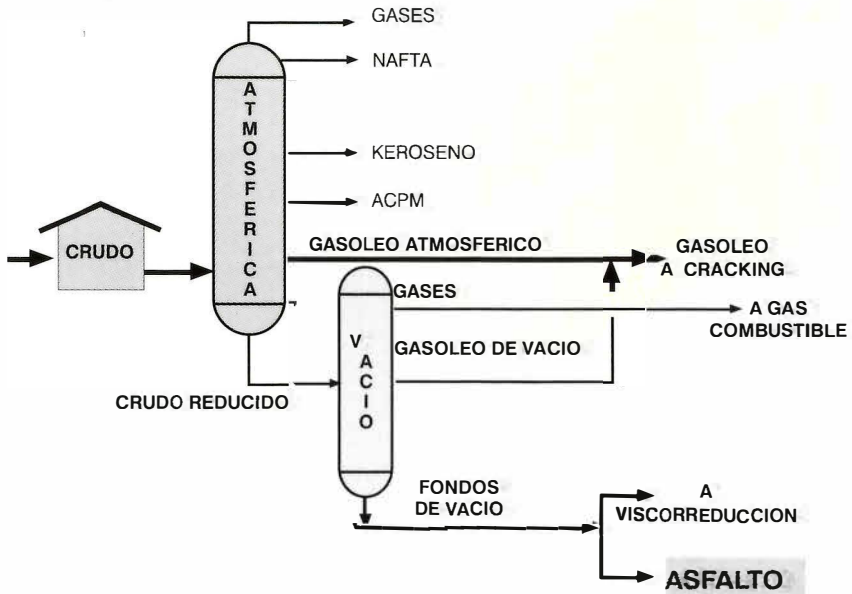


Figura 1. Esquema básico del proceso de refinación de crudo

GASES	0 -- 85 ° F
NAFTA	85 -- 340 ° F
KEROSENO	340 -- 500 ° F
ACPM (DIESEL)	500 -- 700 ° F
GASOLEO LIVIANO	700 -- 800 ° F
GASOLEO MEDIO	800 -- 900 ° F
GASOLEO PESADO	900 -- 1000 ° F
FONDO (BREA)	+ 1000 ° F

Asfalto de Penetración

Figura 2. Fracciones del Crudo del Petróleo



3.1 CEMENTO ASFÁLTICO

El Cemento Asfáltico es el producto mas pesado de la destilación. Se conoce comúnmente como asfalto cuya propiedad ligante permite preparar mezclas asfálticas, para capas de rodadura, nivelación o capas intermedias; sin embargo el elevado costo de producción, transporte y colocación, limitan su uso en proyectos de menor envergadura o en regiones distantes de las ciudades principales.

La tecnología ha desarrollado hasta nuestros días productos asfálticos que se conocen como Asfaltos Líquidos y Emulsiones Asfálticas.

Los Asfaltos Líquidos, provienen de diluir un cemento asfáltico en NAFTA, KEROSENE o ACPM, en 25 o 30 partes de uno de estos solventes contra 75 o 70 partes de cemento asfáltico. Esta mezcla lo convierte en un líquido asfáltico, que a bajas temperaturas (20 y 60°C) se puede manejar en riegos sobre superficies y en mezclas con los agregados, permitiendo un amplio tiempo de manejabilidad que facilita mezclar, extender y compactar, puesto que la adecuación que necesita el cemento asfáltico se traduce en un tiempo de curado, cuya duración depende del tipo y cantidad de solvente que se use, así la mezcla se endurecerá lenta o rápidamente.

De este modo los cementos asfálticos se pueden transformar en ASFALTOS LÍQUIDOS DE CURADO RÁPIDO (RC- Rapid Curing) si el solvente es nafta o gasolina, ASFALTOS LÍQUIDOS DE CURADO MEDIO (MC - Medium Curing) si se utiliza el Kerosene o en ASFALTOS LÍQUIDOS DE CURADO LENTO (SC Slow Curing) si se utiliza ACPM, para disolver al cemento asfáltico.

Con ésta transformación de los cementos asfálticos, se pueden hacer riegos para imprimación, para liga, antipolvo o de protección, tratamientos superficiales, morteros asfálticos y mezclas asfálticas en frío (ya sean éstas elaboradas en el sitio o en plantas); riegos y mezclas que alcanzarán la estabilidad adecuada después de que se liberen los solventes usados en su dilución, en otras palabras, cuando el elemento ligante (cemento asfáltico) aglomere las partículas.

Las Emulsiones Asfálticas para pavimentación, son dispersiones en forma de glóbulos de Asfalto con un 39 % de agua y algunos agentes emulgentes. En esta presentación el producto asfáltico es fluido a temperatura ambiente, de color negro ó café y se puede aplicar en tratamientos superficiales o en diferentes mezclas asfálticas en frío.

En la técnica de las emulsiones se habla del rompimiento rápido, medio o lento de la dispersión y se refiere al tiempo que tiene una emulsión para que los glóbulos de asfalto se unan y el agua se evapore para dejar al cemento asfáltico ligando las partículas de agregado.

Tanto en las mezclas con asfaltos líquidos como con las emulsiones, siempre queda un remanente de disolvente o de dispersor atrapado, pues, es casi imposible que sólo el cemento asfáltico quede actuando en la liga de partículas, sin embargo, esta particularidad no debe afectar el comportamiento ulterior de la mezcla.

3.2 ASFALTOS NATURALES

Son materiales que se forman por la maduración de los crudos pesados o por la oxidación del crudo en la superficie terrestre por contacto con el aire; al estar superficialmente sucede una

volatilización apreciable de las fracciones más livianas quedando un residuo comúnmente denominado Asfaltita. En el país existen yacimientos o minas de asfalto natural formadas principalmente por calizas areniscas y gravas impregnadas de asfalto.



Fotografía 1. Mina de Asfalto Natural

Existen varios asfaltos naturales que se utilizan en la actualidad para la construcción de vías secundarias y terciarias del país. En este manual se analizan tres (3) de ellos, el asfalto natural de la Mina San Pedro en Armero Guayabal, departamento del Tolima, el de Pesca en el departamento de Boyacá y el de Caquetá.

En la Figura 3 se observa la ubicación geográfica de los principales asfaltos naturales existentes en el país.



Figura 3. Yacimientos de Asfaltos en Colombia



3.3 CRUDOS PESADOS

Los Crudos Pesados del Petróleo, se presentan como líquido de color negro, muy viscosos a temperatura ambiente, con densidades cercanas y generalmente inferiores a las del agua y están formados por un alto contenido de cementos asfálticos y un bajo contenido de fracciones destilables. Su refinación es antieconómica para la obtención de combustibles o lubricantes. Su uso en la pavimentación depende de su carácter nafténico.

En Colombia se han estudiado varios Crudos Pesados, en los cuales interesa la cantidad y calidad de los solventes y la calidad de residuo asfáltico presente, entre ellos, se han estudiado las propiedades de los Crudos de CASTILLA, GAVAN, CEDRAL, LA GLORIA Y RUBIALES, de los cuales el CRUDO DE CASTILLA ha tenido un amplio estudio, difusión y aplicación, actualmente se cuenta con una producción y entrega continua, en el campo del mismo nombre en el departamento del Meta, localizado a 53 kilómetros de la ciudad de Villavicencio.



Fotografía 2. Centro de acopio de crudos pesados

En la Figura 4 se muestra en forma proporcional la cantidad de cemento asfáltico presente en los asfaltos líquidos, en las emulsiones asfálticas y en el crudo Castilla.

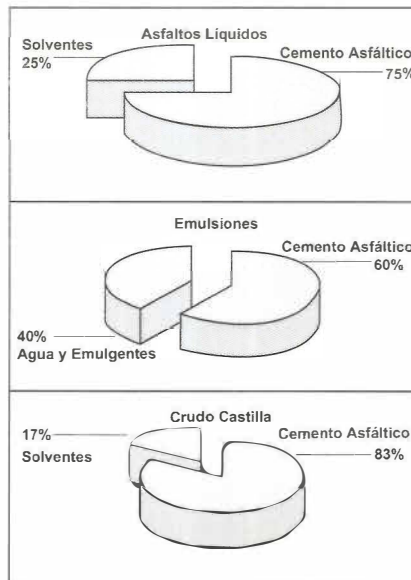


Figura 4. Representación Esquemática de los Productos Asfálticos Líquidos

4. CLASIFICACIÓN DE LA RED VIAL NACIONAL

4.1. SISTEMAS DE CARRETERAS

En Colombia, el sistema de carreteras comprende la totalidad de las vías por las que pueden transitar automotores a lo largo y ancho del país. No obstante, se ha realizado una categorización de ellas, de acuerdo con su funcionalidad:

Las Carreteras Primarias son vías que conectan los principales centros urbanos y económicos del país entre sí y a éstos con los puertos o puntos de frontera.

Las Carreteras Secundarias son aquéllas que conectan los principales centros urbanos y económicos (capitales de departamento) con los municipios del mismo departamento, o a las capitales con la red primaria de carreteras.

Las Carreteras Terciarias unen la cabecera municipal con las veredas o a éstas entre sí.

En la Ley 105 de 1993 se establece que la Nación será responsable de la red primaria de carreteras y de otras carreteras de interés especial, y las entidades territoriales se harán cargo de las vías de las redes secundaria y terciaria.

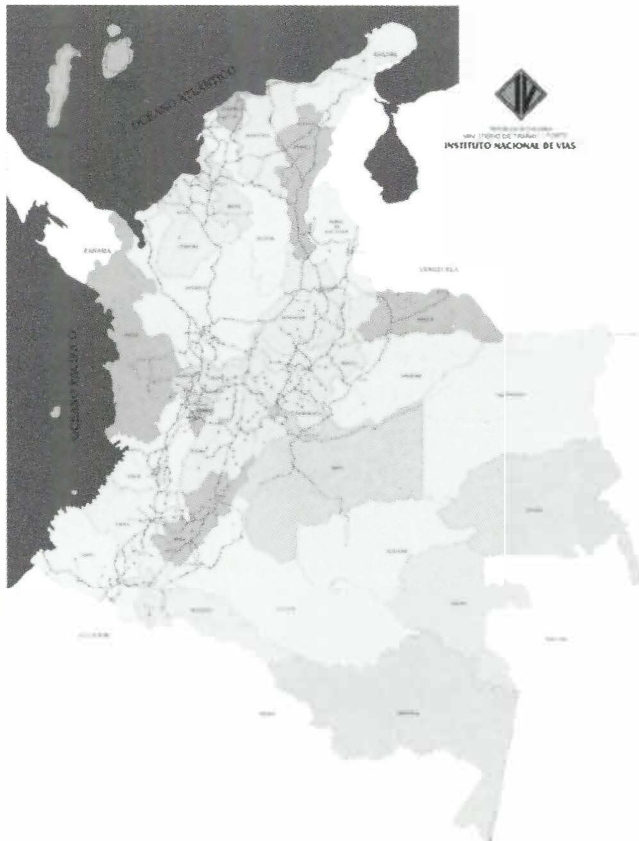


Figura 5. La red vial a cargo de INVIA dividida por territoriales



4.2 FUENTES DE FINANCIACIÓN

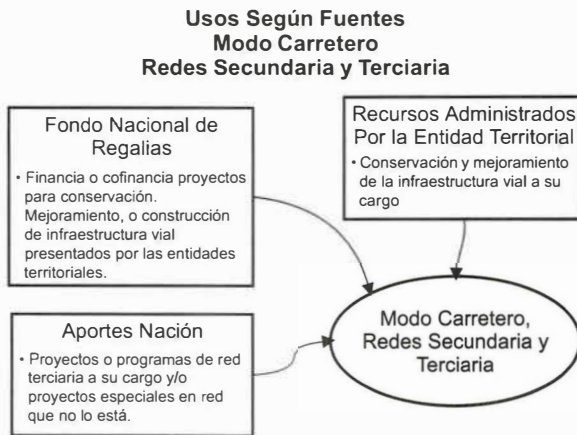
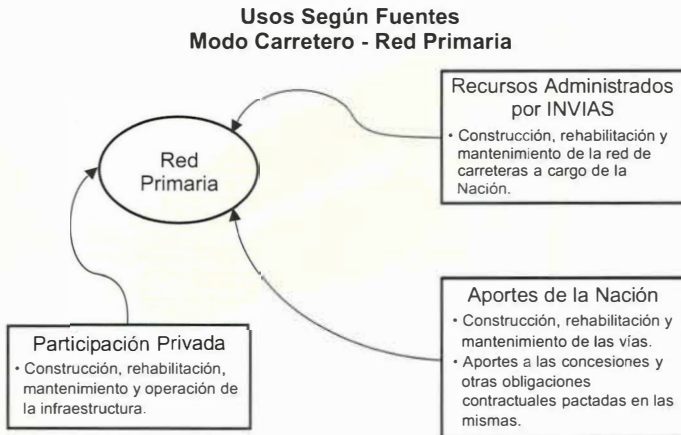


Figura 6. Esquema Financiación de Carreteras

Con respecto al esquema anterior, es importante anotar que, aunque la responsabilidad de conservar y mejorar estas redes es ahora de las entidades territoriales, la Nación ha dispuesto mecanismos técnicos y de financiación para asistirles en la realización de los trabajos. La Ley 488 de 1998 instituyó el cobro a nivel nacional del 20% de sobretasa a la gasolina. Estos dineros deberán distribuirse entre municipios, departamentos y Gobierno Nacional, y estarán destinados, entre otros, a la financiación de obras de infraestructura vial a cargo de las entidades territoriales. Así mismo, se creó una sobretasa al ACPM del 6%, de la cual la mitad se entrega a los departamentos para que mantengan la red a su cargo. En el esquema presentado, estos recursos se incluyen dentro de los que son administrados por la entidad territorial.

5. ADITIVOS

Los aditivos se usan para mejorar algunas de las propiedades de las mezclas asfálticas, tales como acelerar el proceso de curado, mejorar la adherencia, aumentar la resistencia y disminuir costos constructivos al permitir trabajar en frío y con agregados en condiciones de humedad. En el caso específico del aditivo EXOR-1[®], producto desarrollado por ECOPETROL ICP, que se utiliza en la preparación de mezclas de crudos pesados, se observan múltiples ventajas, entre las que se destacan:

- Disminuye hasta en un 30% los costos constructivos del pavimento de una vía (maquinaria y mano de obra).
- Mejora la adherencia entre el ligante y el material mineral, brindando mayor consistencia a la mezcla y aumentando su resistencia al deterioro en presencia de agua.
- Permite realizar las mezclas asfálticas con agregados pétreos que tengan una humedad mayor al 3%.
- Mejora la estabilidad de las carpetas asfálticas y disminuye la deformabilidad.
- Incorpora gran parte de los solventes al ligante asfáltico, disminuyendo el impacto ambiental por evaporación de estos volátiles.
- Aumenta la estabilidad y disminuye el flujo Marshall.

6. MEJORAMIENTO DE PROPIEDADES DE LOS CRUDOS PESADOS Y LOS ASFALTOS NATURALES

Los asfaltos en general poseen propiedades cuya evaluación permite predecir su comportamiento durante la vida útil como pavimento. Una de ellas es la adhesividad, que se define como la capacidad de un asfalto para quedar fijo en el agregado mineral de tal forma que no se separen debido al deslizamiento, ya sea en presencia de agua, tráfico ó variación extrema de la temperatura. Esta depende de varios factores, entre los que se cuentan:

- Composición química de los materiales.
- Textura de las partículas
- Limpieza y humedad de los agregados

La prueba de adherencia del asfalto con el material pétreo requerido para la preparación de la mezcla asfáltica indica si con el tiempo habrá una separación de fases y se observará asfalto fluyendo sobre la vía o piedras sueltas con algo de asfalto sobre su superficie.

Cuando los resultados de laboratorio muestren que la mezcla asfáltica no cumple con los requerimientos de adherencia, ésta se puede mejorar mediante diferentes métodos tales como mezcla física con otros materiales o modificación con reacción química (uso de aditivos), para lograr un material que técnica y económicamente cumpla con las normas para su aplicación en vías.

6.1 MEZCLAS FÍSICAS Y MODIFICACIÓN QUÍMICA

En el caso del mejoramiento de la adhesividad asfalto-mineral, la atracción polar es uno de los aspectos que controlan esta interacción. Si el valor de esta propiedad en los crudos pesados, asfalto natural o sus mezclas es menor al requerido, un camino inicial es la adición de



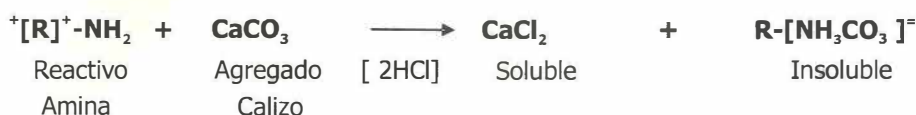
componentes polares tanto al material pétreo como al hidrocarburo.

Dentro de las técnicas comúnmente usadas está la mezcla física o la inclusión de grupos polares a las cadenas carbonadas mediante reacción química. Para el caso de la adición de estos grupos polares sobre el mineral, se requiere conocer sus características de superficie y composición.

La adhesividad para el presente caso se define como la capacidad de un asfalto para quedar fijo en el agregado mineral de tal forma que no se separen debido al deslizamiento ya sea en presencia de agua, tráfico y variación extrema de la temperatura. Por lo anterior, se argumenta que la adhesividad es función de la naturaleza química del árido o agregado mineral.

La primera condición para que exista adherencia entre estos dos materiales es su contacto directo para que el asfalto moje toda la superficie del agregado; la segunda condición se relaciona con la naturaleza de sus superficies.

La mayoría de técnicas disponibles se fundamentan en la modificación química de la superficie como se ilustra con la siguiente reacción:



Esta reacción muestra cómo al adicionar un aditivo con grupos polares cargados positivamente, en este caso una amina primaria, a un agregado mineral de naturaleza caliza, donde existen en su superficie iones carbonato producto de la disociación del carbonato de calcio en iones calcio y grupos carbonato, se tiene como efecto de esta atracción electrostática, un incremento considerable en las fuerzas atractivas de estos dos materiales.

Si se dispone, como sucede en nuestro país, agregado mineral de naturaleza silícea el mismo aditivo de base amina primaria reaccionaría de la siguiente forma:



Para este caso el átomo de silicio es tetravalente rodeado de grupos de átomos de oxígeno y

caciones metálicos, que en presencia de humedad se tornan aniónicos. El método más comúnmente utilizado para la adición de estos aditivos es en forma de emulsiones, que por su facilidad de dispersión sobre el agregado y economía lo hacen de amplia aplicación industrial.

7. EJEMPLOS DE EVALUACIÓN, MODIFICACIÓN Y PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO

Los estudios que se muestran a continuación sobre evaluación y caracterización de asfaltos y crudos pesados sirven de ejemplo para realizar estudios y diseños utilizando estos materiales u otros semejantes.

7.1 ASFALTOS NATURALES

A las asfaltitas (asfaltos naturales) se les determina el contenido de ligante y distribución de tamaños de agregados y, mediante comparación con las distribuciones definidas por el INVIAS para la producción de mezclas asfálticas, se hacen ajustes en ciertos tamaños para obtener

DESCRIPCIÓN	% LIGANTE		PESCA			SAN PEDRO		
	Pesca	San Pedro	% G	% A	% F	% G	% A	% F
Bajo contenido de ligante	5,62	4,8	2,88	87,32	9,80	38,05	56,44	5,51
Alto contenido de ligante	9,07	5,7	4,42	76,03	19,54	42,27	53,31	4,42
Producto Comercial	-	5,5	-	-	-	19,74	71,83	8,43

G: Gravas; % A: Arenas; %F: Finos

Tabla 2. Contenido de ligante y distribución de tamaños conglomerados asfálticos naturales

7.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

En las tablas 3, 4 y 5 se presentan los resultados de la caracterización físico-química de los asfaltos San Pedro, Caquetá y Pesca.

Ensayos		San Pedro	Caquetá	Pesca
Asfalto Original	Peso específico (g/cm ³)	1.0355	1.0082	0.9970
	Gravedad API	5.1	8.8	10.3
	Contenido de agua	-	0.0	0.042
	Penetración @ 25°C	> 400	154	N.R.
	Viscosidad @ 60°C	151.49	603.71	29.63
	Ductilidad	N.R.	> 100	N.R.
	Temperatura de agrietamiento (°C)	- 38	- 35	< -40
	Solubilidad en Tricloroetileno	96.09	98.54	99.0
	Punto de Chispa (°C)	160	175	185
	Punto de Ablandamiento (°C)	23	38.7	N.R.
Densidad de carga	+ 1.45	- 0.98	- 1.48	
Asfalto TFOT	Penetración @ 25°C	72	50	N.R.
	Viscosidad @ 60°C	1786.52	10725	96.84
	Punto de Ablandamiento (°C)	45	50.2	21.3

N.R. No se realizó debido a su bajo valor de viscosidad.

Tabla 3. Parámetros de caracterización asfaltos naturales



En este caso al único asfalto que pudo medírsele la ductilidad fue al de Caquetá. El de la mina San Pedro es el único que presenta una densidad de carga positiva (+) y el menor punto de chispa. El asfalto de Pesca es el menos consistente, ya que no se le pudo determinar penetración, ductilidad ni punto de ablandamiento.

Estos asfaltos se someten al ensayo de envejecimiento TFOT (ensayo de película delgada), para conocer como cambian sus propiedades .

ENSAYOS	SAN PEDRO	CAQUETÁ	PESCA	ESPECIF.
Pérdida de masa, % TFOT	8,72	3.41	7.53	Máx. 1,0
Penetración residual 25 °C, (%)	18	32.47	-	Min. 52,0
Incremento punto ablandamiento	22	11.5	-	Máx. 9,0
Viscosidad 60° C después de prueba	11,79	11.25	3.34	Máx. 5,0
Viscosidad 60° C antes de prueba				

Tabla 4. Parámetros evaluación asfalto residual envejecimiento TFOT

Se observa que ningún asfalto TFOT cumple con las especificaciones de pérdida de masa, penetración residual ni con el incremento del punto de ablandamiento. El índice de envejecimiento (relación de viscosidades) solo lo cumple el asfalto de Pesca.

La composición química de los ligantes asfálticos mediante el ensayo SARA (Saturados+Aromáticos+Resinas+Asfaltenos) y su variación en la medida en que ellos van envejeciendo (utilizando ensayo TFOT y PAV-envejecimiento acelerado a presión-). Son los siguientes:

FRACCIONES	SAN PEDRO			CAQUETÁ			PESCA		
	ORIG	TFOT	PAV	ORIG	TFOT	PAV	ORIG	TFOT	PAV
SATURADOS	16.92	21.65	10.37	13.44	12.84	12.61	14.08	13.85	12.24
AROMÁTICOS	33.27	38.58	28.6	42.56	36.11	33.7	40.9	35.2	35.65
RESINAS	34.10	27.35	49.87	29.33	35.78	36.95	36.82	42.49	43.46
ASFALTENOS	15.72	12.41	11.15	14.66	15.26	17.73	8.18	8.45	8.64
Ic	0.48	0.52	0.27	0.39	0.39	0.43	0.29	0.29	0.26

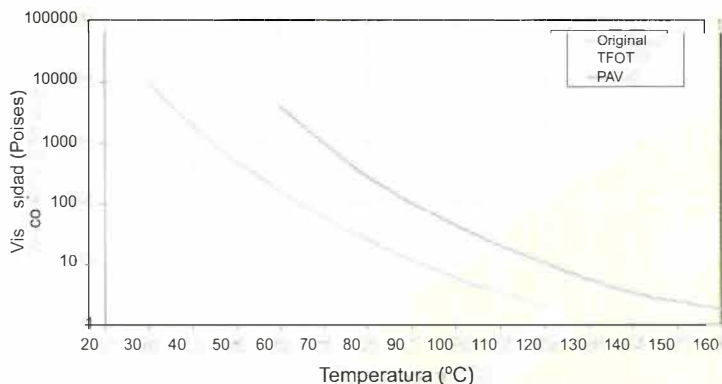
Tabla 5. Composición química asfaltos naturales

El asfalto de la mina San Pedro presenta alta formación de resinas. El asfalto de Caquetá aumenta sus resinas, pero, igualmente aumenta sus asfaltenos con el envejecimiento PAV.

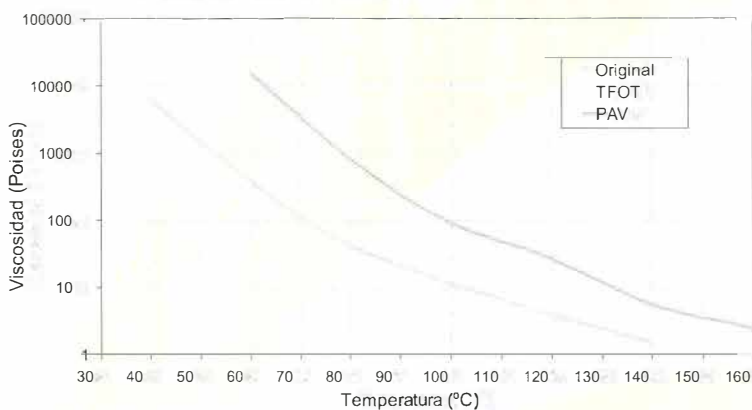
El asfalto de Pesca tiene un ligero incremento en las resinas y un aumento muy leve en los asfaltenos (aunque está dentro del rango de incertidumbre del ensayo), con el envejecimiento PAV.

7.1.2 CURVAS REOLÓGICAS

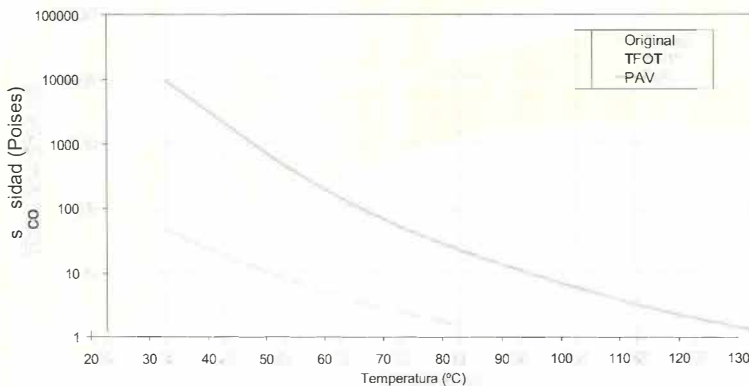
Las Gráficas 1 a 3 muestran las curvas reológicas de los asfaltos naturales evaluados.



Gráfica 1. Curvas reológicas asfalto mina San Pedro



Gráfica 2. Curvas reológicas asfalto Caquetá



Gráfica 3. Curvas reológicas asfalto Pesca

De acuerdo con las gráficas anteriores y los valores reportados en la tabla de las características del asfalto TFOT, el asfalto de Pesca es el que sufre los menores cambios reológicos en el envejecimiento TFOT.



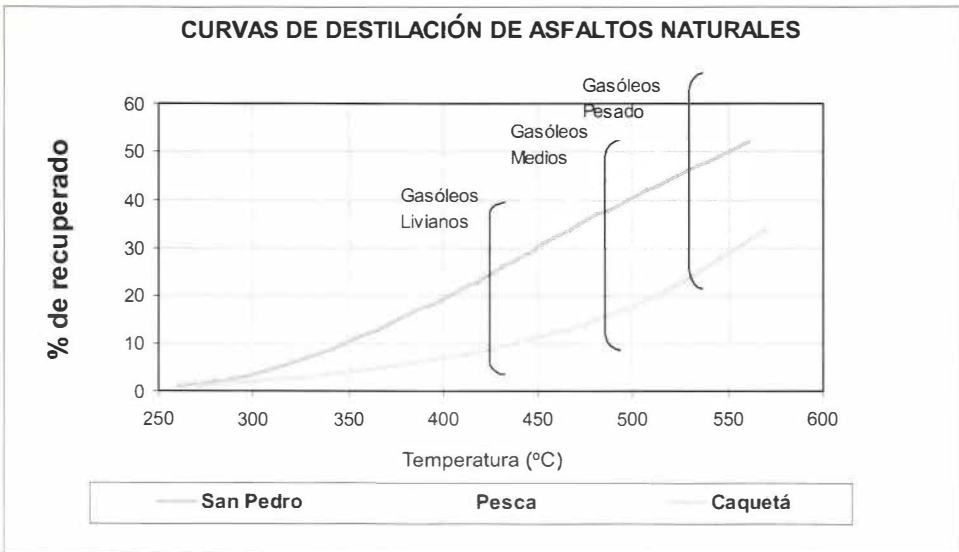
7.1.3 TEMPERATURAS ÓPTIMAS DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN

El aprovechamiento de los asfaltos naturales para producción de mezclas densas en caliente requiere la realización de mezclas a temperaturas que permitan el completo cubrimiento de los inertes por la masa asfáltica y un adecuado manejo en el momento de preparar la mezcla en laboratorio. Estos valores, conocidos como temperatura de mezclado y compactación, para cada uno de los asfaltos naturales evaluados se toman de la curva reológica para el intervalo de viscosidad comprendido entre 1,5 y 1,9 poises para el proceso de mezclado y 2,5 a 3,1 poises para el proceso de compactación. Los resultados son los siguientes:

Temperatura (°C)	San Pedro		Caquetá		Pesca	
	ORIG	TFOT	ORIG	TFOT	ORIG	TFOT
Mezclado	121-126	150-155	134 - 140	153-158	75 - 79	78-81
Compactación	111-115	139-144	124 - 128	142-147	66 - 69	73-75

Tabla 6. Temperaturas óptimas de mezclado y compactación en el laboratorio

7.1.4 DESTILACIÓN SIMULADA



Gráfica 4. Curva Destilación Simulada del ligante extraído de las Asfaltitas

De acuerdo con los resultados obtenidos se aprecia que las asfaltitas de la Mina San Pedro y de Caquetá tienen un comportamiento similar al de un asfalto líquido utilizado como ligante en la pavimentación de vías. La asfaltita de Pesca, tiene un bajo contenido de ligante asfáltico.

7.1.5 GRADO DE DESEMPEÑO (PG)

Con el fin de establecer el rango de temperaturas para las que el asfalto natural (según la metodología SHRP, método SUPERPAVE) se desempeña adecuadamente ante los efectos a los que será expuesto, se realizaron los ensayos que hacen parte del procedimiento para definir el grado de desempeño (PG) de un asfalto.

El grado de desempeño se determina mediante el empleo de los reómetros de corte dinámico (DSR) y de viga flexible (BBR). El primero se utiliza para determinar las propiedades viscoelásticas del ligante por medio del cálculo del módulo complejo G^* (cantidad de energía necesaria para deformar el asfalto) y el ángulo de fase δ (indicador de las proporciones de las deformaciones recuperable y no recuperable) cuando la muestra es sometida a tensiones de corte oscilante. El segundo se usa para obtener las propiedades de rigidez a la fluencia (Stiffness) y la velocidad con la cual cambia dicha rigidez (pendiente m) a temperaturas por debajo de 0°C . Los ensayos en el DSR se realizan sobre el ligante original, envejecido en película delgada (TFOT) y envejecido a presión (PAV), mientras el ensayo BBR se realiza únicamente sobre el ligante envejecido PAV.

Las especificaciones SUPERPAVE para ligantes asfálticos han sido desarrolladas en función del control de la deformación permanente, la fisuración por bajas temperaturas y la fisuración por fatiga del ligante asfáltico.

La especificación PG (Performance Grade) de un ligante asfáltico mide las propiedades físicas del material a través del rango de temperatura de trabajo que resiste. Los grados PG de los ligantes asfálticos están clasificados de acuerdo con las condiciones climáticas a que estarán sometidos en la vía. Un asfalto PG 64-22, por ejemplo, se comportará bien desde una temperatura alta del pavimento de 64°C hasta una temperatura baja de -22°C .

Deformación permanente: Esta forma de falla ocurre a temperaturas altas, donde son recomendables altos valores de G^* , para que el asfalto presente buena resistencia a la deformación permanente debida a cargas repetitivas. La especificación define y establece requisitos para un factor de ahuellamiento (rutting factor), $G^*/\text{Sen}\delta$, el cual debe ser como mínimo 1.00 kPa para el ligante asfáltico original y 2.20kPa como mínimo para el residuo TFOT.

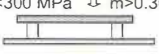
Fisuración por fatiga: Dado que la fatiga sucede a temperaturas del pavimento entre bajas y moderadas o temperatura ambiente luego de un lapso de servicio, la especificación utiliza los valores de G^* y $\text{Sen}\delta$ pero determinados sobre el residuo del ensayo PAV a temperaturas intermedias. Para el factor de agrietamiento por fatiga $G^* \times \text{Sen}\delta$, se establece como máximo un valor de 5000 kPa.

Fisuración por baja temperatura (debajo de 0°C): A bajas temperaturas los cementos asfálticos se comportan como sólidos elásticos. Si la rigidez a la fluencia (Stiffness) es muy alta, el asfalto tendrá un comportamiento frágil, y la probabilidad de agrietamiento será mayor; por lo tanto, un límite máximo de rigidez de 300 MPa se ha fijado para evitar este problema.

Por otro lado, es deseable que el asfalto cambie con relativa rapidez su rigidez al someterse a cargas, pues esto significa que tenderá a disipar tensiones que de otro modo se acumularían hasta un punto en el que el agrietamiento por bajas temperaturas tendría lugar. La especificación exige un mínimo de 0.300 para el valor de la pendiente m .

Los resultados para cada uno de los asfaltos naturales, se encuentran en las siguientes tablas:



ASFALTO ORIGINAL MINA SAN PEDRO			
 $\geq 1,00 \text{ kPa}$	<i>Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$</i>		
	40°C	46°C	52°C
	2.53	1.42	0.66
ENVEJECIDO EN PELÍCULA DELGADA (TFOT)			
 $\geq 2,20 \text{ kPa}$	<i>Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$</i>		
	52°C	58 C	64°C
	7.13	2.98	1.33
ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN (PAV)			
 $\leq 5000 \text{ kPa}$	<i>Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $G^* \times \text{seno}(\delta)$</i>		
	16°C	19°C	22°C
	5039.38	4105.09	2788.21
 $S < 300 \text{ MPa} \quad \downarrow \quad m > 0.300$	<i>Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), "S" rigidez y "m" valor</i>		
	- 16°C	- 22°C	- 28°C
	S = 36.4	S = 43.8	S = 349
	m = 0.554	m = 0.228	m = 0.331




PG = 46 16

Tabla 7. Grado de desempeño (PG) Asfalto mina San Pedro

ASFALTO ORIGINAL CAQUETA				
 $\geq 1,00 \text{ kPa}$	<i>Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$</i>			
	46°C	52°C	58°C	
	5.89	1.10	0.52	
ENVEJECIDO EN PELÍCULA DELGADA (TFOT)				
 $\geq 2,20 \text{ kPa}$	<i>Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$</i>			
	52°C	58°C	64°C	
	6.76	2.75	1.14	
ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN (PAV)				
 $\leq 5000 \text{ kPa}$	<i>Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $G^* \times \text{seno}(\delta)$</i>			
	19°C	22°C	25°C	
	6762 23	4743 72	3087 92	
 $S < 300 \text{ MPa} \quad \downarrow \quad m > 0.300$	<i>Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), "S" rigidez y "m" valor</i>			
	- 16°C	- 22°C	- 28°C	- 32°C
	S = 53.4	S = 113	S = 189	S = 379
	m = 0.406	m = 0.350	m = 0.339	m = 0.279

PG = 52-28

Tabla 8. Grado de desempeño (PG) Asfalto Natural Caquetá

ENVEJECIDO EN PELÍCULA DELGADA (TFOT)			
 $\geq 2.20 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$		
	40°C		
	1 26		
ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN (PAV)			
 $\leq 5000 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $G^* \times \text{seno}(\delta)$		
	7°C	10°C	13°C
	969.89	< 1000	< 1000
$S < 300 \text{ MPa}$ \downarrow $m > 0.300$ 	Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), "S" rigidez y "m" valor		
	- 16°C	- 28°C	- 34°C
	Muy blanda	Muy blanda	S = M =

PG = NO SE PUDO DETERMINAR

Tabla 9. Grado de desempeño (PG) asfalto natural de pesca

7.2 CRUDOS PESADOS

En este documento se muestran, como ejemplo, la caracterización y evaluación de los crudos pesados Castilla (Meta), Rubiales (Meta), La Gloria (Casanare), y Cedrales (Putumayo) a los cuales se les analiza la calidad del ligante (asfalto) que tiene cada uno de ellos, teniendo en cuenta que una vez las mezclas asfálticas están "curadas", el ligante se comporta en forma permanente como adhesivo de las mismas.

7.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

En las tablas 10 y 11 se presentan los resultados de la caracterización físico-química de los asfaltos provenientes de los crudos pesados mencionados en el numeral 7.2.

ENSAYOS		CASTILLA	LA GLORIA	CEDRAL	RUBIALES
Asfalto original	Peso específico (gr/cm ³)	0.978	1.0077	0.9904	1.0111
	Contenido de agua	0.6	0.4	0.629	2.31
	Gravedad API	12.8	8.92	11.3	8.4
	Número Neutralización	-	0.297	< 0.05	< 0.05
	Punto de Chispa (°C)	61	98	130	90

Tabla 10. Parámetros de caracterización de crudos pesados

FRACCIONES	CASTILLA	LA GLORIA	CEDRAL	RUBIALES
Saturados	42.249	47.482	28.282	32.257
Aromáticos	28.384	30.151	26.047	33.546
Resinas	12.026	16.008	21.215	18.111
Asfaltenos	17.340	6.358	24.456	16.087
Ic	1.47	1.17	1.12	0.94

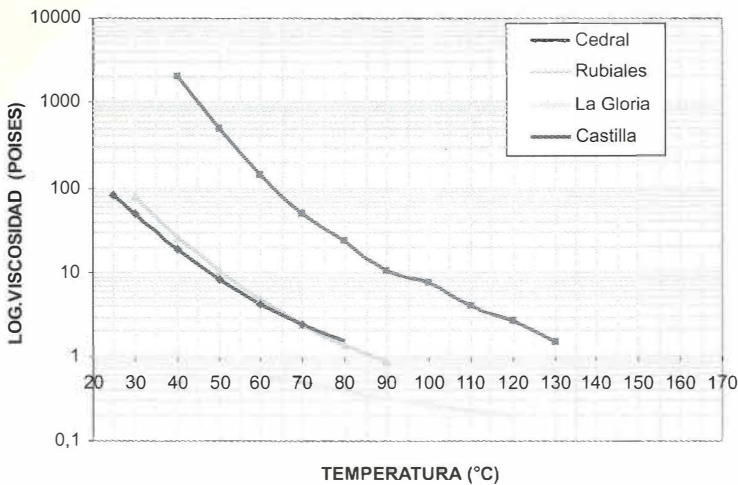
Tabla 11. Composición química de los crudos pesados



De acuerdo con la composición química y la gravedad API se puede concluir que:

- ✓ **Crudo Castilla** tiene bajo contenido de resinas lo cual hace prever que, a pesar de tener una buena consistencia, tiene menor capacidad de adherencia.
- ✓ **Crudo La Gloria** tiene alto contenido de saturados, regular contenido de resinas y bajo contenido de asfaltenos, lo cual demuestra que puede tener baja adherencia, pero con mayor cohesión que el Castilla y con una resistencia al envejecimiento alta.
- ✓ **Crudo Cedral** tiene un alto contenido de Asfaltenos y Resinas, normal contenido de Saturados, por lo cual, presenta alta consistencia, buena adherencia y cohesión.
- ✓ **Crudo Rubiales** tiene un alto contenido de Aromáticos y contenido normal de Saturados, Resinas y Asfaltenos por lo cual, se espera que tenga un comportamiento normal como ligante asfáltico.

7.2.2 CURVAS REOLÓGICAS



Gráfica 5. Curvas Reológicas de Crudos Pesados

De acuerdo con las curvas reológicas, el crudo La Gloria es el más consistente, seguido por el Cedral.

7.2.3 TEMPERATURAS ÓPTIMAS DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN

Al igual que en los asfaltos naturales, el aprovechamiento de los crudos pesados para producción de mezclas densas requiere la realización de mezclas a temperaturas que permitan el completo cubrimiento de los inertes por la masa asfáltica y un adecuado manejo en el momento de preparar la mezcla en laboratorio.

Las temperaturas de mezclado y compactación para cada uno de los crudos pesados evaluados se toman de la curva reológica para el intervalo de viscosidad comprendido entre 1,5 y 1,9 poises para el proceso de mezclado, y para compactación se maneja como una mezcla en frío, a

excepción del crudo la Gloria que toma el intervalo de viscosidad comprendido entre 2,5 y 3,1 poises.

Los valores de temperatura de mezcla para cada uno de los crudos evaluados se reportan en la tabla 12:

Temperatura (°C)	CASTILLA	CEDRAL	RUBIALES	LA GLORIA
Mezclado	75 – 81	126 – 130	74 – 78	39 – 43
Compactación	65-69	118-121	66-70	32 - 35

Tabla 12. Temperaturas de Mezclado y Compactación

7.2.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA ASFALTOS RESIDUALES DE LOS CRUDOS PESADOS

Para evaluar la calidad del ligante remanente en las mezclas asfálticas, después del curado de las mismas (volatilización de fracciones livianas) se evalúa el asfalto que se obtiene de cada uno de ellos. Este asfalto se obtiene mediante los ensayos de deshidratación, destilación atmosférica y destilación de alto vacío.

ASFALTO ORIGINAL					
PROPIEDADES	CRUDOS				
	CASTILLA	GAVAN	CEDRAL	LA GLORIA	RUBIALES
Penetración a 5°C (0.1mm)	16.25	12.22	N.D.	8.50	42
Penetración a 25°C (0.1mm)	67.63	88.33	67.70	66	--
Penetración a 40°C (0.1mm)	287.62	288.50	N.D.	298.00	90
Viscosidad a 60°C (Poises)	1533.00	2211.45	7737.16	1615.13	2828.92
Viscosidad a 135°C(Poises)	347.26	282.26	1085.44	197.63	--
Ductilidad	>150	>150	7.1	>150	>100
Temperatura vitrificación °C	- 39.5	- 40	-34.3	- 25.5	--
Punto de chispa °C	239	267	231	N.D.	278
Gravedad específica	1.0196	1.0159	1.0142	1.0148	1.0499
Punto de ablandamiento	49.30	N.D.	61.65	44.50	47.6

N. D. No determinado

Tabla 13. Parámetros de caracterización del asfalto de crudos pesados

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que los asfaltos procedentes de cada crudo tienen características muy particulares. Estas se ven reflejadas en la calidad de las mezclas asfálticas fabricadas con ellos.



ASFALTOS ENVEJECIDOS EN PELÍCULA DELGADA (TFOT)					
PROPIEDADES	CASTILLA	GAVAN	CEDRAL	LA GLORIA	RUBIALES
Variación de masa (%)	1.44	0.43	4.25	0.26	--
Penetración a 5°C (0.1mm)	11.75	4.3	N.D.	6.0	31
Penetración a 25°C (0.1mm)	42.83	47.54	41.36	41.5	--
Penetración a 40°C (0.1mm)	155.39	131.33	N.D.	73.33	59
Viscosidad a 60°C (Poisés)	5127	9550.73	150727.2	2170.99	13013.04
Viscosidad a 135°C(Poisés)	506.28	505.39	N.D.	257.51	--
Temperatura vitrificación °C	- 35.50	- 35.50	N.D.	- 24	--

N.D. No determinado

Tabla 14. Propiedades de asfaltos envejecidos

FRACCIÓN	CRUDOS				
	CASTILLA	GAVAN	CEDRAL	LA GLORIA	RUBIALES
Saturados	16.53	20.52	18.70	9.90	24.42
Aromáticos	35.11	36.45	30.60	45.05	35.87
Resina	27.91	24.84	21.20	27.90	17.41
Asfaltenos	20.45	18.19	29.60	17.25	22.30
Ic	0.58	0.63	0.93	0.37	0.88

Tabla 15. Composición química de los asfaltos de crudos pesados

7.2.5 GRADO DE DESEMPEÑO (PG)

La definición de esta clasificación puede verse en numeral 7.1.5. En las tablas 16 a 18 se muestran los resultados del análisis para determinar el PG de los crudos La Gloria, Cedral y Rubiales.

ASFALTO ORIGINAL CRUDO LA GLORIA			
 $\geq 1,00 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$		
	52°C	58°C	64°C
	4.44	1.77	0.77
ENVEJECIDO EN PELÍCULA DELGADA (TFOT)			
 $\geq 2,20 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$		
	52°C	58°C	64°C
	6.76	2.75	1.14
ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN (PAV)			
 $\leq 5000 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR) $G^* \times \text{seno}(\delta)$		
	28°C	25°C	22°C
	N.D.	N.D.	N.D.
 $S < 300 \text{ MPa}$ $m > 0.300$	Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), "S" rigidez y "m" valor		
	- 16°C	- 22°C	- 28°C
	S = m = N.D.	S = m = N.D.	S = m = N.D.

PG = 58-N.D.

N.D. No se pudo determinar

Tabla 16. Grado de desempeño (PG) del asfalto del crudo La Gloria

ASFALTO ORIGINAL CRUDO CEDRAL			
 $\geq 1,00 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR)		$\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$
	76°C	82°C	88°C
	5.05	2.75	1.54
ENVEJECIDO EN PELÍCULA DELGADA (TFOT)			
 $\geq 2,20 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR)		$\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$
	82°C	88°C	94°C
	16.09	9.54	5.75
ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN (PAV)			
 $\leq 5000 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR)		$G^* \times \text{seno}(\delta)$
	16°C	13°C	10°C
	3109	3755	4235
 $S < 300 \text{ MPa}$ $m > 0.300$	Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), "S" rigidez y "m" valor		
	- 16°C	- 24°C	- 38°C
	S = 25.84 m = 0.27	S = 116.2 m = 0.25	S = 139.8 m = 0.24

PG = 88°C - N.D.

N.D. No se pudo determinar

Tabla 17. Grado de desempeño (PG) del asfalto del crudo Cedral

ASFALTO ORIGINAL CRUDO RUBIALES			
 $\geq 1,00 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR)		$\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$
	58°C	64°C	70°C
	3.486	1.549	0.732
ENVEJECIDO EN PELÍCULA DELGADA (TFOT)			
 $\geq 2,20 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR)		$\frac{G^*}{\text{seno}(\delta)}$
	64°C	70°C	76°C
	5.672	2.684	1.284
ENVEJECIMIENTO A PRESION (PAV)			
 $\leq 5000 \text{ kPa}$	Reómetro de Corte Dinámico (DSR)		$G^* \times \text{seno}(\delta)$
	22°C	19°C	16°C
	2806.07	3795.18	5071.26
 $S < 300 \text{ MPa}$ $m > 0.300$	Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), "S" rigidez y "m" valor		
	- 22°C	- 28°C	- 34°C
	S = 29.1 m = 0.365	S = 70.9 m = 0.361	S = 88.9 m = 0.140

PG = 64°C - 28°C

Tabla 18. Grado de desempeño (PG) del asfalto del crudo Rubiales



7.2.6 GRADO DE DESEMPEÑO DE LOS ASFALTOS DE LOS CRUDOS PESADOS

Crudo	La Gloria	Cedral	Rubiales
PG	58-N.D.	88-N.D.	64-28

Tabla 19. Grado de desempeño (PG) del asfalto de los crudos

Los resultados muestran que el crudo Cedral presenta un asfalto con características de modificado para el caso de altas temperaturas.

7.2.7 MODIFICACIÓN DE CRUDOS PESADOS CON ADITIVOS

Para analizar la variación en la viscosidad del crudo modificado, debido a que esta propiedad es una de las más importantes desde el punto de vista ingenieril, pues determina la variación en la consistencia de los crudos con la temperatura, es decir, la susceptibilidad térmica del crudo, se utilizan aditivos modificadores de viscosidad. En la tabla 20 se encuentran los datos obtenidos en este ensayo con el Crudo La Gloria y el aditivo EXOR-1 en dos (2) porcentajes diferentes.

	CRUDO ORIGINAL	CRUDO ACONDICIONADO*	CRUDO + EXOR-1 (1)	CRUDO + EXOR-1 (2)
Temperatura, C	25	25	25	26
Viscosidad, CP	495,5	1497	2587	3000
Diferencia, %	>33.1	Referencia	<72,8	<100

* Modificación sin aditivo EXOR.

(1) Concentración de Exor-1 0.5%

(2) Concentración de Exor-1 1.0%

Tabla 20. Resultados viscosidad crudo la Gloria modificado

8. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Para los diseños de mezclas de Asfaltitas y de Crudos Pesados , se realizan ensayos de inmersión-compresión con el fin de determinar el contenido óptimo de ligante; además se evalúa la pérdida de resistencia que se produce por la acción del agua sobre las mezclas bituminosas compactadas.

En los ensayos de inmersión-compresión se obtiene un índice numérico de la pérdida de estabilidad (índice de resistencia conservada), al comparar la resistencia a la compresión simple de las probetas curadas secas con la resistencia a la compresión simple de las probetas sometidas a la acción del agua.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en muestras de Asfalto natural provenientes de la Mina San Pedro y Pesca y de los crudos pesados Rubiales y Cedral.

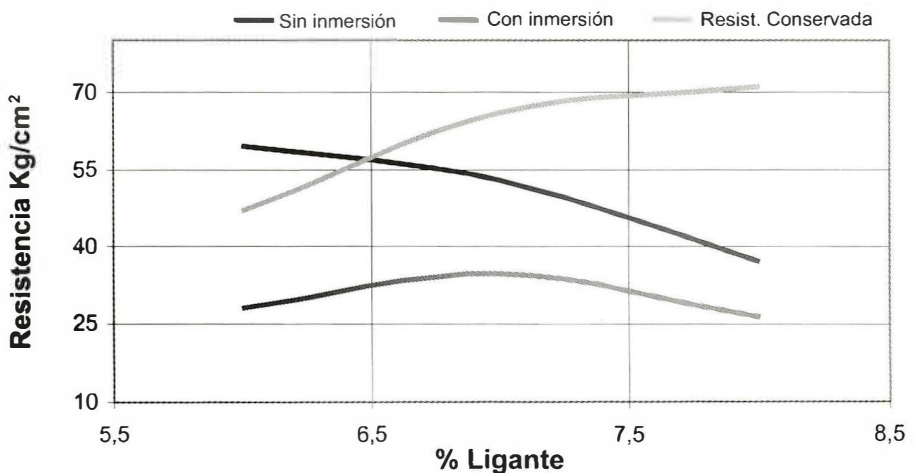
8.1 ASFALTITA SAN PEDRO

El material de la Mina San Pedro contiene asfaltitas con alto y bajo contenido de ligante. Para las mezclas de este caso, se utilizó la asfaltita de bajo contenido de ligante y se le adicionó emulsión asfáltica en diferentes proporciones hasta obtener contenidos de ligante de 6%, 7% y 8%. Los resultados de resistencia con y sin inmersión se encuentran en la siguiente tabla:

% LIGANTE	RESISTENCIA SIN INMERSIÓN Kg/cm ²	RESISTENCIA 7 DÍAS DE INMERSIÓN Kg/cm ²	ÍNDICE RESISTENCIA CONSERVADA %
6,0	3,4	1,6	47
7,0	4,1	1,7	42
8,0	2,8	1,8	63

Tabla 21. Inmersión compresión Asfaltita San Pedro

Se encontró que el contenido óptimo de ligante es del 6%, porque los valores de resistencia con y sin inmersión obtenidos para este porcentaje fueron los de medio o alto desempeño. A su vez, el material granular presente en la gradación obtenida después de la extracción, influye en que las mezclas presenten alta resistencia al agua y buena cohesión. Sin embargo, el valor obtenido es inferior al mínimo (75%), por lo cual es recomendable mejorar la gradación del material, hasta obtener la aproximación a una mezcla densa.



Gráfica 6. Curva resistencia asfaltita San Pedro



8.2 ASFALTITA PESCA

Para estas mezclas, se utilizó la asfaltita de alto contenido de ligante y se le adicionó arena hasta obtener diferentes porcentajes de ligante y se evaluó la resistencia a la acción del agua.

Los resultados se encuentran en la siguiente tabla:

% LIGANTE	RESISTENCIA SIN INMERSIÓN Kg/cm ²	RESISTENCIA 7 DÍAS DE INMERSIÓN Kg/cm ²	ÍNDICE RESISTENCIA CONSERVADA %
6,0	3,4	1,6	47
7,0	4,1	1,7	42
8,0	2,8	1,8	63

Tabla 22. Inmersión compresión Asfaltita Pesca

Se determinó que el contenido óptimo de ligante corresponde al 7%, porque los valores de resistencia con y sin inmersión obtenidos para este porcentaje fueron los más altos o intermedios. Las bajas resistencias obtenidas del ensayo de inmersión compresión para la asfaltita de Pesca, en comparación con las obtenidas para la Asfaltita San Pedro, se deben a que la gradación del material extraído corresponde a una arena, indicando una alta susceptibilidad de la mezcla a la acción del agua. Para aumentar el índice de resistencia conservada, se recomienda adicionar material granular y ajustar su tamaño incorporándole agregado grueso, de tal modo que se logre una gradación similar a una mezcla densa y adicionar emulsión para mejorar la impermeabilización de la mezcla.

8.3 CRUDO RUBIALES

Las mezclas se prepararon utilizando diferentes porcentajes de ligante, determinándose el contenido óptimo de este mediante el ensayo de inmersión- compresión y una verificación de las características mecánicas de la mezcla obtenida mediante el procedimiento Marshall para condiciones de uso como capa de rodadura. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

% LIGANTE	RESISTENCIA SIN INMERSIÓN Kg/cm ²	RESISTENCIA 7 DÍAS DE INMERSIÓN Kg/cm ²	ÍNDICE RESISTENCIA CONSERVADA %
6,0	10,6	3,9	36,8
6,5	8,5	4,9	57,8
7,0	8,0	4,6	57,1

Tabla 23. Inmersión compresión Crudo Rubiales

El contenido óptimo de ligante corresponde al 6.5% porque los valores de resistencia con y sin inmersión obtenidos para este porcentaje fueron los más altos o intermedios. Para aumentar el índice de resistencia conservada, se recomienda trabajar con material de una gradación similar a una mezcla densa.

Los resultados del ensayo Marshall con el contenido óptimo de ligante muestran la estabilidad y el flujo de la mezcla, como se aprecia en la tabla siguiente:

PROPIEDAD	VALOR
Densidad máxima, lb/pie ³	147.2
Estabilidad máxima, lb	3150
Vacíos con aire, %	3.3
Vacíos en agregado, %	13.2
Flujo, 1/100 pulg	15

Tabla 24. Resultados ensayo Marshall

La estabilidad y flujo se ajustan a los valores mínimos para carreteras de tránsito bajo (600 Kg y 2 a 4 mm). Por lo tanto, se espera que el comportamiento del Crudo Rubiales como capa de rodadura sea satisfactorio.

8.4 CRUDO CEDRAL

Como en el caso anterior, para las mezclas, se trabajó con diferentes porcentajes de ligante, y se evaluó la resistencia a la acción del agua. Los resultados se encuentran en la siguiente tabla:

% LIGANTE	RESISTENCIA SIN INMERSIÓN Kg/cm ²	RESISTENCIA 7 DÍAS DE INMERSIÓN Kg/cm ²	ÍNDICE RESISTENCIA CONSERVADA %
7,0	28,4	21,9	77,3
7,5	24,9	20,2	81,0
8,0	23,6	9,4	39,8

Tabla 25. Inmersión compresión crudo Cedral

El contenido óptimo de ligante corresponde al 7.5% porque los valores de resistencia con y sin inmersión obtenidos para este porcentaje fueron los más altos. Los valores del índice de resistencia conservada, cumplen con el valor mínimo de las especificaciones (75%).

Los resultados del ensayo Marshall con el contenido óptimo de ligante muestran la estabilidad y el flujo de la mezcla como se aprecia en la siguiente tabla:

PROPIEDAD	VALOR
Densidad máxima, lb/pie ³	144.4
Estabilidad máxima, lb	4030
Vacíos con aire, %	4.4
Vacíos en agregado, %	14.7
Flujo, 1/100 Pulg.	18.2

Tabla 26. Resultados Ensayo Marshall Crudo Cedral

Los valores obtenidos de estabilidad y flujo se ajustan a los de carreteras de tránsito bajo (600 Kg y 2 a 4 mm). Por lo tanto, se espera que el comportamiento del Crudo Cedral como capa de rodadura sea satisfactorio.



9. PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN

9.1 CRUDOS PESADOS

El proceso constructivo es similar al utilizado con un asfalto líquido industrial o una emulsión asfáltica y comprende las siguientes etapas:

1. Mantenimiento y construcción del sistema de drenaje
2. Preparación de la superficie de apoyo
3. Definición de la necesidad de un riego de imprimación
4. Proceso de mezclado de los materiales.
5. Proceso de curado de la mezcla
6. Procesos de extendido y compactación de la mezcla.
7. Puesta en servicio.

En la Figura 7 se muestra un diagrama genérico del proceso de diseño y construcción de un proyecto de pavimentación con crudos pesados

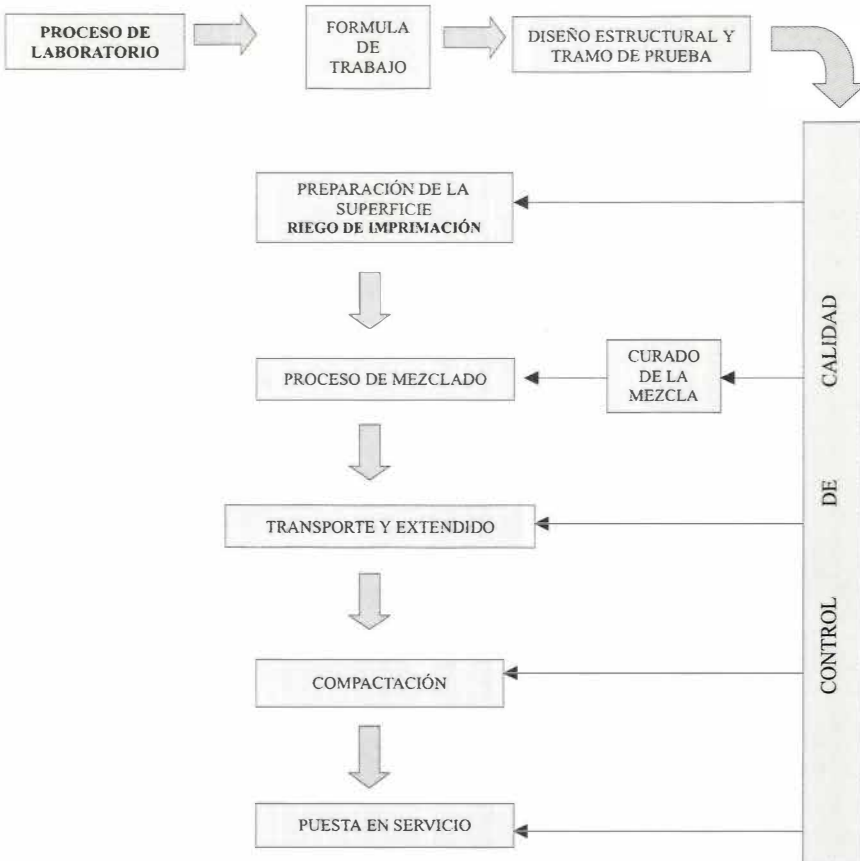


Figura 7. Diagrama del proceso de diseño, construcción y control de calidad en un proyecto de pavimentación con crudos pesados

9.1.1 MANTENIMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE

Es importante garantizar la durabilidad de esta y otras estructuras mediante el mantenimiento o mejoramiento del sistema de drenaje superficial existente y la construcción de obras complementarias.

9.1.2 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE APOYO

- Antes de iniciar la elaboración de la mezcla se debe comprobar que la superficie que va a servir de apoyo se encuentre limpia, tenga la compactación, lisura y cotas apropiadas. En algunos casos será necesario retirar todo material blando o inestable que impida una buena compactación de la capa estructural. La superficie se debe uniformizar y adecuar con las pendientes longitudinal y transversal requeridas, considerando un bombeo entre el 2% y el 4%.

- En caso de que la mezcla se vaya a elaborar en vía utilizando parte del material de afirmado existente, se debe proceder a su escarificación en todo el ancho de la capa que se va a mezclar, hasta una profundidad tal que una vez compactada la mezcla alcance el espesor indicado. Antes de proceder al mezclado se debe garantizar la homogeneidad del material granular existente, en caso contrario será necesario realizar las correcciones pertinentes a la fórmula de trabajo.

- Si es necesario adicionar un nuevo material pétreo con el fin de mejorar el existente, se deberá garantizar que la mezcla sea uniforme antes de iniciar la aplicación del ligante. El Artículo 340.4.3 de las Especificaciones de construcción del Instituto Nacional de Vías contempla algunas recomendaciones generales sobre este particular.

9.1.3 RIEGO DE IMPRIMACIÓN

Si la estabilización o la elaboración de la mezcla asfáltica con un crudo pesado se va a elaborar directamente sobre la vía, no se requerirá de la aplicación de un riego de imprimación. Pero si la mezcla se elabora en planta y se va a colocar sobre una capa granular es conveniente la aplicación homogénea de un riego de imprimación en cantidades que varían entre 0.10 y 0.30 Gal/m² después de realizar la limpieza con escoba mecánica o con chorro de aire a presión. Como ligante se puede utilizar el mismo crudo o una emulsión asfáltica de rompimiento lento. Los crudos pesados como elemento imprimante se deben aplicar con un carrotanque irrigador que permita al ligante alcanzar una viscosidad de 70 centistokes. Se recomienda que durante este proceso la temperatura ambiente y a la sombra sea mayor a los 10° C.

El riego de imprimación se debe dejar curar hasta que se endurezca superficialmente, lo cual obliga a cerrar la vía al tránsito durante el tiempo que dure el curado. Este tiempo depende de las condiciones climáticas de la región y del tipo de crudo utilizado.



9.1.4 PROCESO DE MEZCLADO DE LOS MATERIALES

Para la elaboración de la mezcla de los agregados y el crudo existen dos alternativas diferentes que deben evaluarse de manera técnica y económica en función de los requerimientos particulares del proyecto. Estas alternativas son las siguientes:

9.1.4.1 MEZCLADO EN VÍA O EN PATIO

Es el sistema que tradicionalmente se utiliza en la mayoría de los casos para la estabilización de afirmados directamente in situ, utilizando una motoniveladora. El empleo de la motoniveladora para el mezclado y el carrotanque irrigador para la dosificación requiere tramos de no más de 100 metros de longitud para controlar el proceso, durante el cual se hace necesario controlar el volumen de agregado y los sucesivos riegos de Crudo. El proceso consta de dos etapas básicas: el extendido del agregado y el mezclado propiamente dicho:

- El extendido del agregado.

El agregado con una humedad máxima del 3% (o más si se emplea EXOR-1), se extiende en una capa de ancho y espesor uniformes de tal manera que la capa luego de mezclada y compactada cumpla con las secciones requeridas. El espesor de la capa estructural con crudo y compactadas varía entre 0.05 y 0.13 m como máximo, lo cual permite realizar el proceso en una sola capa.

- El Proceso de mezclado.

El Crudo se aplica por medio de un carrotanque irrigador con la dosificación y temperatura determinadas previamente, garantizando una viscosidad entre 170 ± 20 centistokes. Una vez aplicado el crudo se procede a la mezcla utilizando la motoniveladora, hasta lograr un cubrimiento homogéneo de las partículas con crudo, color uniforme y evitando el exceso de ligante.

9.1.4.2 MEZCLA EN PLANTA

Existen dos modalidades para la elaboración de la mezcla: la planta fija y la planta móvil. La planta fija puede ser de tipo continuo o discontinuo, provista de los dispositivos adecuados que permitan dosificar por separado el crudo y el agregado, con el fin de tener un mejor control de la temperatura del crudo a adicionar y de secado de los agregados. Estas plantas permiten obtener una mezcla más uniforme y un mejor control durante todo el proceso de la fórmula de trabajo.

En la planta móvil, los materiales por estabilizar, se colocan en la tolva receptora de la planta, la cual esta provista de dispositivos dosificadores similares a los de las plantas fijas continuas, para obtener las proporciones deseadas de crudo y agregados, materiales conducidos a una mezcladora continua que verterá la mezcla directamente sobre la vía.

MEZCLA EN VÍA CON MOTONIVELADORA	MEZCLA EN PLANTA
Es imposible garantizar una mezcla homogénea	Se garantiza la homogeneidad de la mezcla
No es posible trabajar con agregados secos	Mediante el secador de agregados se controla la humedad
Mediante carrotanque se garantiza la viscosidad óptima del ligante para el mezclado	Se garantiza la viscosidad óptima del ligante
Requiere de mayores recursos para el control de calidad	Se garantiza la calidad del producto con un mínimo de control de calidad
Se presentan altas pérdidas de materiales: agregados y crudo	No existen pérdidas de materiales
Sólo es posible calentar un material, lo cual disminuye el grado de cubrimiento de las partículas	Se pueden calentar ambos materiales garantizando un mejor cubrimiento de las partículas
Se obtienen mezclas más económicas pero menos durables	Se obtienen mezclas entre un 10% y 20% más costosas pero mucho más durables
No se puede trabajar en época de lluvias	Se puede producir mezcla en todo momento

Tabla 27. Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de elaboración de mezclas con crudos

9.1.5 EL PROCESO DE CURADO

Durante todo el proceso de mezclado con los agregados, el crudo pierde parte de sus solventes, permitiendo que la mezcla asfáltica adquiera la resistencia mínima para soportar las cargas inducidas durante la compactación y la acción del tránsito. Con el tiempo la mezcla irá incrementando su resistencia traducida en una menor deformabilidad y una mayor resistencia.

Para controlar la pérdida de solventes se puede separar en bandejas una cantidad determinada de mezcla, que se expone a las mismas condiciones del acopio y por pesadas periódicas se determina la pérdida en peso debido a la volatilización de los solventes.

Este procedimiento no se recomienda para proyectos que se desarrollen en climas muy húmedos ya que se puede presentar un incremento en el peso debido a la humedad higroscópica que atrapa la mezcla. Otra forma más racional de controlar el proceso de curado de la mezcla es evaluar la velocidad con que se incrementa la resistencia con el tiempo.



La pérdida de solventes del crudo se verá beneficiada por temperaturas altas, alto grado de aireación y por la cantidad de crudo aplicado, entre otros factores. El proceso de curado puede optimizarse permitiendo la aireación del material mediante procedimientos de mezcla y extendido sucesivos durante el día.

Si la mezcla se dispone en cordones o en depósitos para el proceso de curado, estos se deben proteger de la lluvia por medio de plásticos.

9.1.6 PROCESO DE EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA

Una vez que la mezcla ha perdido la cantidad de solventes deseada, se procede a su extendido en los espesores y anchos recomendados en el proyecto, utilizando una motoniveladora o una terminadora de pavimentos (Finisher), obteniendo mejores condiciones de extendido con esta última.

La edad de la mezcla para extenderla depende del clima que se registre en el proyecto. En buen clima, sin amenaza de lluvia y temperaturas superiores a 10 °C, la mezcla se puede extender inmediatamente después de elaborada o en otras circunstancias se puede acopiar (protegiéndola con plásticos o bajo cubierta) y airearla hasta que pierda los solventes necesarios. El acabado final dependerá de la gradación y de la buena operación del equipo para evitar problemas de segregación.

Las mezclas asfálticas con crudo se compactan siguiendo el mismo procedimiento que para sus afines mezclas en frío y en caliente. Son mezclas fácilmente compactables por lo que una vez alcanzado el curado respectivo se procede a su extensión y a su compactación utilizando inicialmente un compactador tipo neumático y finalizando el proceso con rodillos lisos, hasta alcanzar una densidad mayor o igual a la especificada según las condiciones particulares definidas durante la etapa de diseño.

Este proceso se puede hacer diariamente para cerrar paulatinamente los vacíos y la textura cuando la mezcla haya sido extendida sin curado o puede llegar a la densidad final dada en cada proyecto cuando la mezcla haya perdido los solventes necesarios que garanticen una adecuada estabilidad.

9.1.7 PUESTA EN SERVICIO

En este tipo de mezclas es conveniente restringir la circulación de todo tipo de tránsito hasta que se haya completado la compactación. Sin embargo, si no es posible la interrupción completa del tránsito este deberá circular sobre la capa en forma distribuida de tal manera que no se concentren las huellas de circulación sobre la superficie. No se debe olvidar que las mezclas irán ganando resistencia a medida que transcurra el tiempo, por lo que si el grado de compactación inicial es muy diferente al que tendrá lugar bajo la acción del tránsito es muy posible que se presenten ahuellamientos localizados en las huellas de circulación. Por lo cual un buen proceso de curado y compactación serán primordiales en el comportamiento futuro de la mezcla asfáltica.

9.1.8 CONTROL DE CALIDAD

El éxito de cualquier obra de ingeniería dependerá del grado de control de calidad de todos y cada uno de los procesos realizados y necesarios para llevar a un buen término la misma. En cuanto a un proyecto de pavimentación o estabilización con crudo, el control de calidad debe ser permanente y ajustado a las especificaciones particulares del proyecto, pues es de conocimiento común que no existen especificaciones de construcción de índole general sino particular que dependerán del alcance de cada proyecto y tipo de crudo que se vaya a utilizar.

Por lo tanto, durante su ejecución se debe contar con los equipos adecuados y el personal técnico capacitado, que permitan la realización de un control de calidad permanente durante las actividades de mejoramiento y pavimentación de las carreteras.

La calidad y homogeneidad de los materiales merecen una constante supervisión. La dosificación de las mezclas y el cubrimiento de los agregados, deben ser garantizados mediante ensayos acordes al resultado esperado. El proceso de curado debe ser estudiado y controlado para cada proyecto, al igual que los procesos de extendido y compactación deben ser vigilados para garantizar los espesores requeridos y el acabado final de la superficie construida.

9.1.9 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

En la tabla 28 se muestran los costos promedio para la construcción de un tramo experimental utilizando crudos pesados como ligante asfáltico (Año 2004).

Longitud: 1 kilómetro		Ancho: 6 metros	Espesor: 0.10 m
Descripción	Unidad	Costo, Col\$/km	
Ligante	Global	42.000.000	
Aditivo	Global	4.500.000	
Material granular	Global	25.000.000	
Plástico	Global	1.000.000	
Motoniveladora	Global	6.400.000	
Carrotanque aditivo	Global	600.000	
Carrotanque crudo	Global	1.500.000	
Vibrocompactador	Global	1.400.000	
Alquiler tanque almacenamiento	Global	1.500.000	
Mano de obra	Global	2.500.000	
Estudio de suelo, control de calidad y ensayos de seguimiento	Global	8.119.000	
TOTAL		94.519.000	

Tabla 28. Costos de construcción utilizando crudos pesados



9.2 ASFALTOS NATURALES

9.2.1 PROCEDIMIENTO

El procedimiento de construcción es similar al de los crudos pesados. Adicionalmente, deben seguirse los pasos siguientes para la construcción de capas de rodadura con conglomerados asfálticos:

- 1- Se excava material de las caras expuestas de la cantera y se tritura en el mismo sitio.
- 2- Debido a que los conglomerados asfálticos tienen un contenido variable de asfalto natural, se debe agregar otro producto asfáltico y controlar su cantidad en función del contenido de agregados
- 3- Para determinar el contenido de asfalto natural y calcular el asfalto adicional que se debe añadir, se debe homogeneizar el material antes de las pruebas de extracción.
- 4- La mezcla puede efectuarse en vía ó en planta. En planta se obtiene una mejor homogeneidad y rendimiento.
- 5- La mezcla se pueden almacenar en pilas ó cordones, cubriéndola con plástico para evitar que la lluvia afecte el líquido que se ha agregado.
- 6- Se prepara la base de la carretera y se extiende el material a mano ó con rastrillo .Cuando el material está reseco se debe humedecer para facilitar su manejabilidad.
- 7- Finalmente se perfila con una motoniveladora y se compacta con rodillo liso, rodillo vibratorio ó compactador neumático. La operación de extendido también puede realizarse con una terminadora de pavimentos.
- 8- La compactación se efectúa hasta alcanzar entre el 90 y 95 % de la densidad máxima teórica de la mezcla, es decir la relación entre el peso de los materiales y su volumen neto.

9.2.2 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

En la tabla 29 se muestran los costos promedio para la construcción de un tramo experimental utilizando asfaltos naturales (Año 2004).

Longitud: 1 kilómetro		Ancho: 6 metros	Espesor: 0.10 m
Descripción	Unidad	Costo, Col\$/km	
Ligante	Global	14.000.000	
Asfalto natural	Global	40.000.000	
Aditivo	Global	4.500.000	
Material granular	Global	16.000.000	
Plástico	Global	1.000.000	
Motoniveladora	Global	3.500.000	
Carrotanque aditivo	Global	600.000	
Carrotanque crudo	Global	750.000	
Vibrocompactador	Global	1.400.000	
Alquiler tanque almacenamiento	Global	1.000.000	
Mano de obra	Global	2.460.000	
Estudio de suelo, control de calidad y ensayos de seguimiento	Global	8.119.000	
TOTAL		93.329.000	

Tabla 29. Costos construcción tramo experimental utilizando asfaltos naturales

10. TRAMOS EXPERIMENTALES

Los tramos experimentales se construyen con el objeto de comprobar, evaluar y hacer seguimiento al comportamiento de una mezcla asfáltica aplicada como pavimento, en este caso, utilizando asfalto proveniente de crudos pesados y asfaltita de asfaltos naturales.

Los tramos escogidos como ejemplo son Armero Guayabal 1060 m (Departamento del Tolima) y vías urbanas del municipio de San Agustín 600 m (Departamento del Huila), aunque también se construyo un tramo experimental en la vía Pesca-Toca 3400 m (Departamento de Boyacá).

10.1 PROCEDIMIENTO

Para los tramos experimentales se tiene el siguiente procedimiento:

- 1- Visita al sitio donde se construirá el tramo experimental, para caracterizar los materiales de la subrasante de la vía y hacer las recomendaciones necesarias para el mejoramiento de los sectores que reporten características deficientes.
- 2- Diseño de la vía de acuerdo con su clasificación (primaria, secundaria o terciaria) y con las características de la mezcla asfáltica evaluada en laboratorio.
- 3- Seguimiento durante la construcción. Análisis de laboratorio
- 4- Seguimiento posterior y toma de muestras para verificar su comportamiento.
- 5- Recomendaciones finales.

10.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Para efectos de aplicación en la construcción de vías, los suelos se clasifican de acuerdo con su composición. Los símbolos empleados para esta clasificación están estandarizados por el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), cuyo significado puede apreciarse en la siguiente tabla:

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN GENERAL
CL	Arcillas inorgánicas de baja a Media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas o arcillas pobres
CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad
OH	Arcilla orgánica de plasticidad alta
ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos
OL	Limos orgánicos de baja plasticidad
SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
SM	Arenas limosas, cuya fracción fina es poco plástica
GM	Grava limosa de plasticidad nula

Tabla 30. Sistema de clasificación unificado de Suelos



10.3 TRAMO 1: ARMERO GUAYABAL

Tiene una longitud de 1060 metros, un ancho de calzada variable entre 6.5 m y 8.7 m y un espesor de capa de base asfáltica con asfalto natural San Pedro de 0.20 m.

Las diferentes actividades realizadas se muestran a continuación:

10.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA DE FUNDACIÓN O SUBRASANTE

Los resultados de la caracterización fueron los siguientes:

PARÁMETRO	RESULTADO
Deflexión Benkelman Característica para 87.5% de confiabilidad	2.98 mm
Módulo de Subrasante según Penetración Dinámica de Cono	Comprendido entre 400 y 900 Kg/cm ²
Relación de Soporte de subrasante según C.B.R. para 95% de γ_d máx.	Comprendido entre 1 y 12%

Tabla 31. Caracterización de la subrasante

Abscisa	Hum. Nat. %	γ_d máx. gr/cm ³	LI %	IP %	Pasa No. 4 %	Pasa No. 200 %	SUCS
K0+030	16.56	1.70	43	22	100	48.91	CL
K0+180	15.32	1.82	31	13	85.85	50.31	CL
K0+280	5.53	1.81	27	7	85.82	40.27	ML
K0+360	5.71	2.05	31	11	61.93	20.33	CL
K0+480	20.95	1.75	40	15	99.02	70.67	CL
K0+840	14.86	1.97	28	9	73.13	23.45	CL
K1+090	11.01	1.89	NP	NP	61.21	28.93	SC

Tabla 32. Resultados de laboratorio para muestras de subrasante

10.3.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Para definir la estructura de pavimento a construir se adelanta el siguiente proceso:

- Análisis de la variable tránsito: Para el análisis de la variable tránsito, se debe estimar el número de ejes equivalentes de 8.2 Ton, para un periodo de análisis de 10 años. En este caso fue de 250.000 (reportado por Mina San Pedro).
- Propuesta estructural: Con base en los resultados de resistencia obtenidos para la subrasante y atendiendo a las exigencias de tránsito, se propone la siguiente estructura:

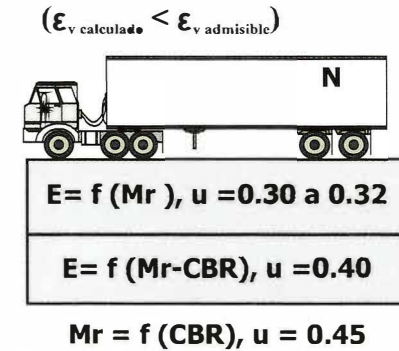


Figura 8. Modelo estructural propuesto



Figura 9. Propuesta estructural tramo Armero Guayabal

10.3.3 SEGUIMIENTO DE LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN

Las actividades de construcción consisten en:

- Preparación de sitio y conformación de obras de arte: Preliminar al inicio de colocación de material asfáltico hacer limpieza de la vía, conformación de cunetas, descoles y bombeo para garantizar un adecuado drenaje de aguas superficiales.



Fotografía 3. Preparación de sitio



- **Transporte de material:** Supervisar la explotación y transporte del material desde la mina a la vía.

Las siguientes fotografías muestran el proceso:



Fotografía 4 y 5. Aspecto general de la mina y equipo clasificador

- **Extendido y compactación final de la mezcla asfáltica:** Una vez extendido el material, la compactación se realiza con base en las siguientes actividades:
 - Obtener los niveles topográficos en la vía, de tal forma que se logre mantener el bombeo, definido previamente.
 - Extender la mezcla preparada, con la motoniveladora.
 - Compactar empleando vibrocompactador, inicialmente dos pasadas sin vibración, tres pasadas con vibración y finalmente dos pasadas sin vibración.
 - Es importante mencionar que el ajuste del modelo debe realizarse compactando un tramo de prueba de longitud 10 m, en el cual se controle el porcentaje de compactación para el número de pasadas y verificar que la capa que se construya adquiera la densidad y espesor propuesto.
 - La densidad de compactación de estimó en el 95% de la densidad máxima obtenida mediante la prueba de verificación Marshall.

En la fotografía siguiente se muestra el proceso de compactación.



Fotografía 6. Compactación con vibrocompactador

- **Control de calidad:** Se debe controlar el porcentaje de compactación de la capa. Para este caso los parámetros de control corresponden a una densidad de 2.24 gr/cm^3 , y el porcentaje de compactación debe ser del 100%.
- De la auscultación y caracterización de la base o capa de asfalto natural de 0.20 metros, colocada sobre la subrasante, se obtuvieron los siguientes resultados:

PARÁMETRO	RESULTADO
Deflexión Benkelman Característica para 87.5% de Confiabilidad	1.37 mm
Módulo de Subrasante según Penetración Dinámica de Cono	700 Kg/cm^2

Tabla 33. Caracterización de la estructura

- Posteriormente se recomienda mejorar sectores aislados que presenten leve grado de deterioro mediante retiro del material, sustitución y recompactación.
- Las siguientes fotografías muestran el estado de la vía en construcción y las labores de campo adelantadas.



Fotografías 7 y 8. Deflexiones benkelman y densidades con densímetro nuclear

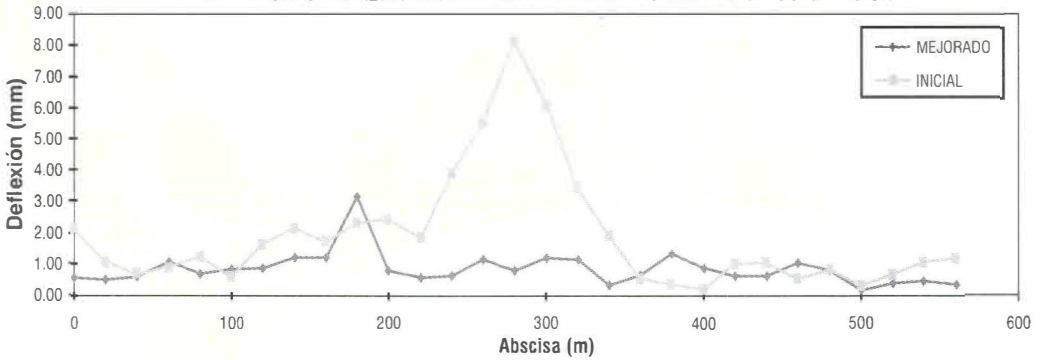


Fotografía 9 Aspecto final de base construida

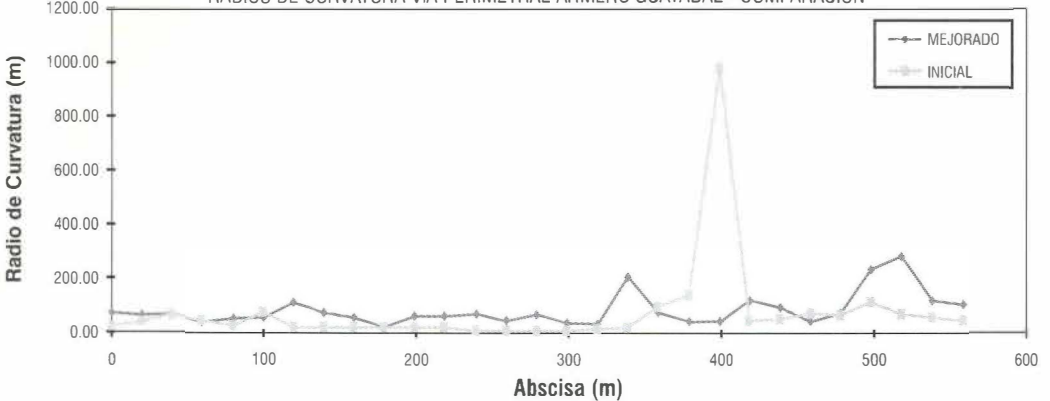


Las condiciones iniciales y posteriores a la colocación de la base preparada con asfaltita San Pedro se muestran en las siguientes gráficas. En estas se puede observar la solución estructural aportada, mediante disminución general de las deflexiones.

DEFLEXIONES BENKELMAN VIA PERIMETRAL ARMERO GUAYABAL - COMPRACIÓN



RADIOS DE CURVATURA VIA PERIMETRAL ARMERO GUAYABAL - COMPARACION



Graficas 7 y 8. Comparación de deflexiones antes y después de colocada la base construida con asfaltita San Pedro

También existe la posibilidad de adicionar ligante para obtener una mezcla óptima, mediante un proceso de homogenización en planta, tal como se muestra en la fotografía 11.



Fotografía 10.
Planta de adición de productos

10.3.4 SEGUIMIENTO POSTERIOR Y VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VÍA

Se recomienda inspeccionar el comportamiento de la capa de base asfáltica, preferiblemente, al año de haberse construido. En el caso del tramo Armero Guayabal, las siguientes fotografías permiten observar dicho comportamiento.



Fotografías 11 y 12. Aspecto general de la vía y afloramientos producto del material



Fotografías 13 y 14. Aspecto de la vía k0+500 y características superficiales de capa construída a la fecha 14-05-04

10.4 TRAMO 2: SAN AGUSTÍN

Tiene una longitud de 600 metros, un ancho de calzada variable entre 6.0 m y 7.3 m y un espesor de capa de rodadura con Crudo pesado Rubiales variable entre 0.10 m y 0.13 m.



Fotografías 15 y 16. Aspecto inicial de vías urbanas del municipio



10.4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA DE FUNDACIÓN O SUBRASANTE

Los resultados de la caracterización fueron los siguientes:

Parámetro	Resultado
Deflexión Benkelman Característica para 87.5% de confiabilidad	1.624 mm
Módulo de Subrasante según Penetración Dinámica de Cono	Comprendido entre 400 y 600 Kg/cm ²
Relación de Soporte de subrasante según C.B.R. para 95% de γ_d máx	Comprendido entre 1 y 10%

Tabla 34. Caracterización de la subrasante

Apique	Hum. Nat. %	γ_d máx gr/cm ³	Li %	Ip %	Pasa No. 4 %	Pasa No. 200 %	Clasificación
1	9,5	1,5	50	25	18,3	57,5	CL
2	19,9	1,4	47	13	15,4	82	OH
3	1,8	2,2	-	-	34,1	15,5	GM
4	18,7	1,5	54	22	23,4	76,6	OH
5	45,9	1,4	59	31	6,3	93,4	CH
6	23,2	1,5	46	25	14,9	53,3	CH
7	33,5	1,6	45	14	19	76	CL
8	28,6	1,3	74	34	6,5	93,4	OH
9 – 17	26,2	2,0	48	25	7,4	86,7	CL
10	33,7	1,6	49	21	12,5	86	CL
11	19,2	1,45	46	21	28,1	64,5	CL
12	39,3	1,23	72	23	13	82,2	OH
13	33,8	1,5	49	16	13,2	86,6	OL
14 – 20	22,5	1,4	59	23	7,4	88,7	CL
15	25,2	1,67	38	16	18,1	81,1	CL
16 – 18	31,3	1,34	52	15	13,2	85,7	OH
19	33,6	1,21	58	38	13,9	84,7	OH

Tabla 35. Resultados de laboratorio muestras de subrasante

10.4.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Para definir la estructura de pavimento a construir se adelanta el siguiente proceso:

- **Análisis de la variable tránsito:** Con el fin de estimar el número de ejes equivalentes de 8.2 Ton que actuarán sobre la estructura de mejoramiento se realizan conteos manuales en las vías en estudio, durante una semana y se realiza una proyección para los próximos diez (10) años. Para este caso, el número de ejes equivalentes que circularán durante el período de diseño estimado (10 años) corresponde a 337.800.

- Propuesta estructural:** Con base en los resultados de resistencia obtenidos para la subrasante y atendiendo a las exigencias de tránsito de la zona, se propone la siguiente estructura:

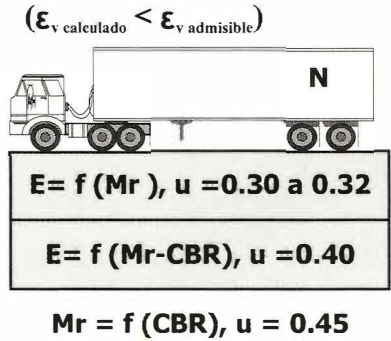
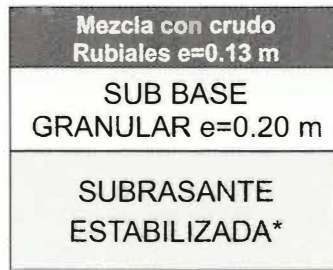
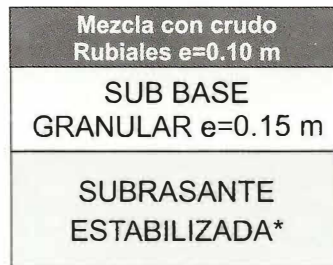


Figura 10. Modelo estructural propuesto



**Figura 11. Propuesta estructural vías con tránsito vehicular medio.
 Tramo calle 2 San Agustín.**



**Figura 12. Propuesta estructural vías con tránsito vehicular mínimo.
 Tramo carrera 16 San Agustín**

* Se estabilizan 20 cm del material de subrasante adicionando un producto químico y se mezcla con material granular hasta obtener el espesor de capa (0.30 m).



10.4.3 SEGUIMIENTO DE LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN

Las actividades de construcción consisten en:

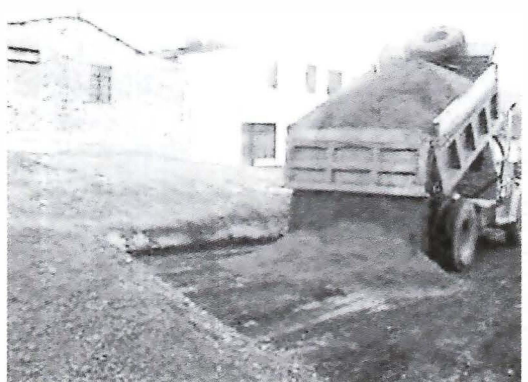
- **Preparación de sitio y conformación de cunetas:** Antes de iniciar la colocación de material asfáltico se debe realizar la limpieza de las vías, conformar cunetas y bombeo para garantizar un adecuado drenaje de aguas superficiales.

Las siguientes fotografías muestran el proceso:



Fotografía 17. Preparación de sitio y conformación de cunetas

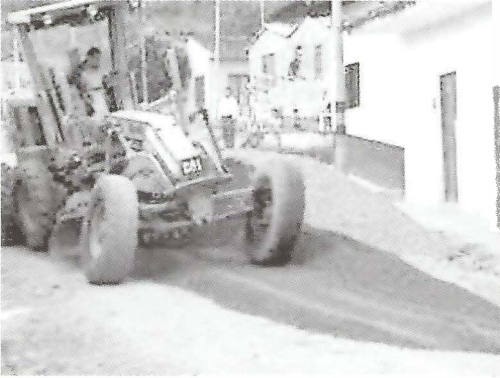
- **Transporte de agregado pétreo:** Inspeccionar el material en el sitio de acopio, teniendo en cuenta la conveniencia de realizar la mezcla en vía, ya que se genera una imprimación preliminar implícita en el proceso de preparación de la mezcla asfáltica. Las siguientes fotografías muestran el proceso:



Fotografías 18 y 19. Cargue y transporte de material

- **Extendido de material y adición aditivo Exor-1:** Una de las etapas más importantes durante la preparación de la mezcla, corresponde a la adición del aditivo Exor-1 sobre el agregado pétreo extendido. En este caso, la dosificación empleada es de 20 lt/m³ en una concentración 1:500, teniendo en cuenta investigaciones realizadas previamente en laboratorios de CORASFALTOS.

Las siguientes fotografías muestran el proceso:



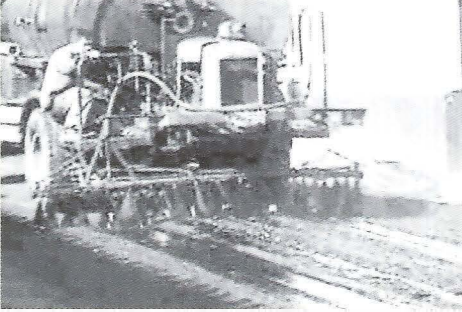
Fotografías 20 y 21. Extendido de material y preparación de aditivo



Fotografías 22 y 23. Aplicación de aditivo y homogenización de la masa

- **Adición de crudo Rubiales:** Transcurridos 20 min., de la aplicación total del aditivo sobre el agregado, se adiciona el crudo pesado, en este caso el crudo Rubiales, en el porcentaje óptimo recomendado por los estudios de laboratorio.
Para la adición del ligante asfáltico se procede de la siguiente manera:
 - Se carga el crudo pesado en un carrotanque irrigador y se calienta hasta 70 °C.
 - Se aplica sobre el agregado, en varias pasadas.
 - Se homogeneiza el material con motoniveladora hasta observar cubrimiento total de las partículas minerales. (aproximadamente 20 min. de homogeneización con maquinaria).

Las siguientes fotografías muestran el desarrollo de las actividades:



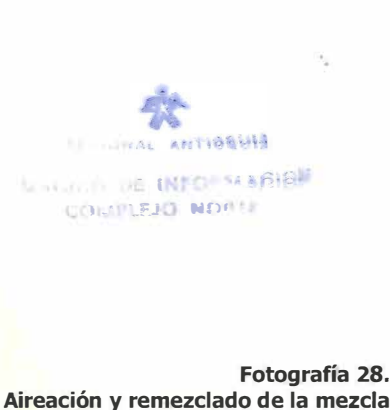
Fotografías 24 y 25. Aplicación de crudo y mezclado para homogeneización

- Proceso de curado:** Se lleva a cabo mediante aireación y mezclado de la mezcla preparada, hasta cuando el crudo pesado pierda el 25% de las fracciones livianas, con el fin de obtener su punto óptimo de respuesta mecánica al hacer parte de una mezcla asfáltica. El proceso de curado se hace mediante extendido y "volteado" del material con motoniveladora durante dos días continuos. Terminadas las actividades diarias, la mezcla se acordona y protege con plásticos, que la protegen de fenómenos climáticos como la lluvia.

Las siguientes fotografías muestran el proceso adelantado:



Fotografías 26 y 27. Aspecto general de mezcla y protección ante el clima adverso



Fotografía 28.

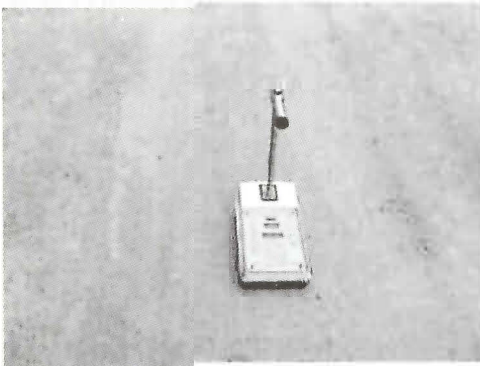
Aireación y remezclado de la mezcla

- **Extendido y compactación final de la mezcla asfáltica:** Una vez culminado el proceso de curado, la compactación se realiza con base en las siguientes actividades:
 - Obtener los niveles topográficos en la vía, de tal forma que se logre mantener el bombeo, definido previamente.
 - Extender la mezcla preparada y curada, con la motoniveladora.
 - Compactar empleando vibrocompactador, inicialmente dos pasadas sin vibración, tres pasadas con vibración y finalmente dos pasadas sin vibración. Es importante mencionar que el ajuste del modelo debe realizarse compactando un tramo de prueba de longitud 10 m, en el cual se controle el porcentaje de compactación para el número de pasadas y verificar que la capa que se construya adquiera la densidad y espesor propuesto.
 - La densidad de compactación se estima en el 95% de la densidad máxima obtenida mediante la prueba de verificación Marshall.

Las siguientes fotografías muestran el proceso:



Fotografías 29 y 30. Definición de niveles y extendido de mezcla



Fotografías 31 y 32. Control del porcentaje de compactación.



- **Control de calidad:** Se debe controlar el porcentaje de compactación de la capa y tomar una muestra para comparar las características obtenidas con los parámetros de control. La siguiente tabla presenta los resultados de una muestra analizada:

ENSAYO	RESULTADO
% Ligante	5.3
% Finos	50
% Triturados	50
Densidad Bulk (gr/cm ³)	2.28
Densidad Rice	2.484
% Vacíos	8.2
Estabilidad (kg)	566
Flujo (mm)	4.14
Resistencia Conservada (%)	72

Tabla 36. Evaluación de material tomado en vía

Con base en los resultados anteriores, se concluye que la mezcla asfáltica tiene un buen comportamiento, el valor de resistencia conservada se encuentra cercano al mínimo exigido por las especificaciones INVÍAS (75%) y los valores de estabilidad y flujo se acercan a los exigidos por las mismas normas, aplicadas a tráfico liviano en mezclas en caliente (600Kg de estabilidad y flujo entre 2 y 4mm.)

La variación en el contenido de ligante, comparativamente, entre el diseño de mezcla en laboratorio y su preparación en obra, es del 0.2%, valor que es aceptable. Los resultados pueden observarse en las siguientes fotografías:



Fotografías 33 y 34. Aspecto superficial de las estructuras construidas.

10.4.4 SEGUIMIENTO POSTERIOR Y VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA VÍA.

Se recomienda inspeccionar el comportamiento de la capa de base asfáltica, preferiblemente, al año de haberse construido. En el caso del tramo San Agustín, las siguientes fotografías ilustran el comportamiento que ha tenido este tramo experimental.



Fotografías 35 y 36. Aspecto general de vías concluidas



Fotografías 37 y 38. Vista de las calles a la fecha 17-05-04

10.5 RECOMENDACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE TRAMOS EXPERIMENTALES

Las recomendaciones generales a tener en cuenta en el mejoramiento de vías construidas con asfaltos naturales o crudos pesados como ligante, son:

1. Desalojar el agua que se empoce.
2. Conformar adecuadamente las cunetas para desalojar aguas lluvias y construir estructuras de evacuación de caudal transportado por las cunetas.
3. Descopar los árboles que se encuentran a cada lado de la vía.
4. Retirar el material con características orgánicas que afecten el desempeño de la estructura que se construya.
5. Escarificar las superficies moderadamente compactadas y recompactar con una densidad correspondiente al 95% del próctor modificado.



6. De forma general compactar toda la vía al 95% del próctor modificado.
7. Mantener niveles de la vía.
8. Controlar la humedad de compactación.
9. Conocer las características del suelo mediante las pruebas de laboratorio.

11. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORAMIENTO VIAL

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la evaluación económica de dos estrategias de mejoramiento para dos vías secundarias localizadas en: Armero Guayabal (Tolima) y en San Agustín (Huila), aunque se realizó igualmente para Pesca-Toca (Boyacá).

Estas alternativas o políticas de conservación proponen la utilización de una base estabilizada con productos bituminosos naturales y el material de afirmado existente, empleando para ello como herramienta computacional el modelo matemático de simulación para administración de carreteras HDM (Highway Design and Maintenance Standards Model) con el propósito de poder determinar al final de un período de análisis, y con base en parámetros específicos para cada alternativa como lo son: la condición de la vía, el tránsito y la estrategia o política de mantenimiento a utilizar, cuál es la más viable económicamente desde el punto de vista de beneficios económicos netos que produce la propuesta, costos de operación vehicular, costos en tiempos de viajes, consumo de combustible, incrementos de velocidades de tránsito, etc.

11.1 DEFINICIÓN GENERAL DE HDM

El modelo HDM (Highway Design and Maintenance Standards Model) es un modelo computacional que permite evaluar técnica y económicamente las políticas de inversión, conservación y operación de vías, a través de la simulación del comportamiento de los vehículos y del deterioro de la estructura del camino. Fue desarrollado por el Banco Mundial y se viene usando hace más de dos décadas, para combinar la evaluación técnica y económica de proyectos, preparar políticas de inversión y analizar estrategias y alternativas de redes de carreteras.

La estructura del modelo HDM-4 permite la utilización de cualquiera de los módulos de análisis que incluye el programa, como son: la planeación estratégica, la programación táctica de trabajos en el mediano plazo y el análisis, seguimiento y control de proyectos. Dicha estructura cuenta con la existencia de cuatro grandes módulos de manejo de datos que fundamentalmente alimentan las variables y ecuaciones de los distintos modelos de simulación que posee la herramienta.

Las tres herramientas de análisis (Estrategia, Programa y Proyecto) operan sobre datos definidos en cuatro gestores de datos:

- a. Red de Carreteras
Define las características físicas de los tramos de carreteras en la red o subred por estudiar, incluye además los factores de ajuste para los modelos de deterioro.
- b. Parque vehicular
Define las características físicas y operativas, así como el precio unitario de los consumos de recursos de la flota vehicular que opera en la red de carreteras o conjunto de caminos a

estudiar, incluye además los factores de ajuste de los modelos de costo.

- c. Trabajos de conservación
Define los estándares de conservación y mejora, junto con los costos unitarios que serán aplicados a los distintos tramos de la carretera.
- d. Con Graficación del HDM
Define fundamentalmente los datos predeterminados que se usarán en las aplicaciones. La herramienta suministra una serie de valores por defecto como sugerencia y para facilitar así la mejor disposición de los datos que caracterizarán y definirán el entorno y las circunstancias locales.

El modelo simula, para cada tramo de carretera, año a año, las condiciones de la misma y los recursos utilizados para la conservación para cada estrategia, así como las velocidades de operación y los recursos físicos consumidos por la operación de vehículos. Estimadas las cantidades físicas necesarias para construcción, las obras y operación de los vehículos, se aplican los costos y precios unitarios especificados por los usuarios para estimar los costos económicos y financieros. Luego se hace el cálculo de los beneficios relativos de las diferentes alternativas, seguido del cálculo del valor actual y de la tasa de rentabilidad.

11.2 ALTERNATIVAS DE LOS TRAMOS EXPERIMENTALES

Los parámetros técnicos de entrada al modelo HDM se encuentran en las tablas del capítulo 7, relacionados con las especificaciones de las mezclas asfálticas, y en capítulo 10 relacionado con el diseño de los tramos experimentales. A continuación se describen las alternativas de construcción para cada tramo.

11.2.1 TRAMO ARMERO GUAYABAL (TOLIMA)

- Alternativa Base. Tramo en afirmado con un mantenimiento periódico de recarga puntual (arreglo de cada bache con material de recebo). Para la frecuencia de mantenimiento se tomó como referencia una huella de 5 cm para generar la necesidad de cada arreglo.
- Alternativa realizada en el proyecto. Mejoramiento del tramo mediante adecuación del material de subrasante natural y compactación de una rodadura utilizando una mezcla asfáltica natural de la Mina San Pedro con un espesor de 20 cm.

11.2.2 TRAMO SAN AGUSTÍN (HUILA)

- Alternativa Base. Tramo en afirmado con un mantenimiento periódico de recarga puntual (arreglo de cada bache con material de recebo). La frecuencia de mantenimiento depende de la magnitud de la huella; se toma como referencia una huella de 5 cm para generar la necesidad de cada arreglo.
- Alternativa escogida en el proyecto. Estabilización físico-química de 30 cm del material de subrasante, tratado con aditivo base Ion calcio en una dosificación de 1.5% en peso; sobre esta se colocó una capa de gravilla de 10 cm de espesor, terminando con una capa de rodadura trabajada como mezcla en frío. Esta rodadura está compuesta por agregado pétreo con una gradación tipo BEE-2 y Crudo Rubiales en un porcentaje óptimo de 5.8%.

11.3 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y DATOS DE ENTRADA

En la tabla 37 se pueden observar los costos de los diferentes materiales y actividades utilizadas



en el análisis de las alternativas evaluadas.

	Costos totales (\$) / m3	
	ARMERO GUAYABAL	SAN AGUSTÍN
Colocación Afirmado	32.000	35.000
Colocación Capa Granular (subbase)	45.000	52.000
Colocación Capa Asfáltica (mezcla densa en frío)	100.000 (asfalto natural)	130.000 (Crudo, agregado)

Tabla 37. Costos de construcción por tramo evaluado

11.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Estos resultados son el producto de evaluar con el programa HDM las dos alternativas de mejoramiento para las vías de bajo tráfico vehicular, en un período de análisis de 15 años.

11.4.1 COMPARACIÓN ECONÓMICA GENERAL DE ALTERNATIVAS - TRAMO ARMERO GUAYABAL (TOLIMA)

AHORROS EN COSTOS DE OPERACIÓN (VOC)	AHORROS EN TM COSTOS TIEMPO DE VIAJE	BENEFICIOS ECONÓMICOS NETOS (VAN)
\$ 420'000.000	\$80'000.000	\$470.000.000

Tabla 38. Evaluación económica: estabilización con asfaltos naturales vs mejoramiento con afirmado

Tasa Interna de Retorno Económica (TIRE) = 70.1%

La tabla 39 muestra los principales ahorros porcentuales obtenidos en una vía estabilizada con **asfaltos naturales** respecto a la misma vía en afirmado.

CONCEPTO	PORCENTAJE
Disminución Costos de Operación vehicular	6 %
Disminución Costos por menor Tiempo de Viaje	12 %
Disminución Costos por menor Consumo de Combustible	19%
Incremento Velocidades medias de Tránsito	16 %

Tabla 39. Ahorros en Costos: Estabilización con asfaltos naturales vs mejoramiento con afirmado

13. BIBLIOGRAFÍA

Agnusdei, Jorge Omar. Estudio de ligantes bituminosos modificados con "Rafaelita" en mezclas empleadas en pavimentación. Buenos Aires

Argoty Burbano, Jorge Luis y Quiñones Sinisterra, Ferney. Caracterización física, química y reológica de los crudos pesados y asfaltos naturales de la zona sur-occidental y fronteriza del departamento del Putumayo, para el mejoramiento de vías secundarias y terciarias del sur de Colombia. Universidad del Cauca. Diciembre de 2001

American Gilsonite Company. Resina Gilsonita para modificador de asfalto.

Agnusdei. J. O. Método de mezclado de Gilsonita con asfalto caliente recomendado para laboratorio y campo.

Agnusdei. J. O. Gilsonite to stop rutting and shoving on ADT U.S. 30 Instituto Nacional de Vías. La asfaltita como modificador de los asfaltos Colombianos. Modificación de asfalto de la refinería de Cartagena con asfaltita del Cesar. Santafé de Bogotá Enero de 1997

Arenas Hugo León; Peña Jorge Javier, "El crudo Castilla un ligante asfáltico apto para pavimentos". ECOPEPETROL 1993

Arenas Hugo León, LOS CRUDOS PESADOS: Nueva tecnología y económica alternativa para el mantenimiento de la red vial y pistas de aterrizaje. UNICAUCA 2004

Arenas Hugo León; Peña Jorge Javier, MEZCLAS EN FRÍO, pavimentación con crudos pesados, aplicación del crudo Castilla. UNICAUCA 1999.

Ariza Ariza, Leonardo y González Pinzón, Luis Eleazar. Caracterización y control de construcción de tramos para la selección del asfalto óptimo en las vías de climas cálidos. Universidad industrial de Santander. 1996

Corasfaltos. Evaluación Técnica y Económica de la producción de diferentes clases de asfaltos mejorados a partir del crudo Castilla y su comercialización. Julio de 1997

Escobar Noriega, Fernando Enrique y Concha Sánchez, Javier Ernesto. Asfaltos naturales de la mina "San Pedro" en Armero, Tolima. Universidad industrial de Santander. 1998

ICP. Caracterización y evaluación del asfalto natural las Pavas. Septiembre de 1995

ICP-Corasfaltos. Estudio de Caracterización y evaluación del Asfalto natural "La Emilia". Octubre de 1996



ICP-Corasfaltos. Diseño de Base Estabilizada crudo Castilla-Agregado del Distrito de Producción El Centro. Mayo de 1997

ICP- Corasfaltos. Estudio de Caracterización y evaluación del asfalto natural "San Pedro". Enero de 1997 y Abril de 1997.

ICP-Corasfaltos. Diseño de mezcla con crudo Castilla y Agregado de Villavicencio Método Marshall. Enero de 1998

ICP-Corasfaltos. Caracterización del crudo Vinita como ligante para mezcla asfáltica. Enero de 1998.

Peñuela R, Gustavo A. Estado del arte en la utilización del crudo Castilla en pavimentos. Corasfaltos. Septiembre de 1998.

Restrepo y Uribe Ltda. Asfaltitas cantera San Pedro Tolima. Bogotá Mayo de 1983

Retamoso Llamas, Claudia Patricia y Villabona Rosales, Hugo Enrique. Estudio para el mejoramiento de capas de pavimento con asfalto natural de pesca (Boyacá). Universidad Industrial de Santander. 1997

Rodriguez Blanco, Yomar y Sánchez Pico, Maria Isabel. Diseño de un pavimento utilizando Crudo Castilla. Universidad industrial de Santander. 1993

Rodriguez Salah, Luz Angela. Caracterización dinámica de mezclas asfálticas elaboradas con crudo Castilla. Universidad industrial de Santander. 1995

ENTIDADES PARTICIPANTES:



CORASFALTOS



INVIAS



**CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO EN ASFALTOS EN EL SECTOR
TRANSPORTE E INDUSTRIAL**

CORASFALTOS

Km. 2 Vía al Refugio, Guatiguará. Telefax: (57) (7) 6550806 - 6551399
Piedecuesta - Colombia Internet: www.corasfaltos.com E-mail: info@corasfaltos.com