



Universidad de los Andes



Instituto de Desarrollo Urbano

---

**ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA D.C.  
INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO**



**CONTRATO  
IDU – 306 - 003**

**OBJETO:** SEGUNDA FASE DEL ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS – PISTA DE PRUEBA.

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**



**INFORME FINAL  
ORIGINAL**

BOGOTA, D.C. DICIEMBRE DE 2005




---

## TABLA DE CONTENIDO

<b><u>1.</u></b>	<b><u>ANTECEDENTES</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b><u>2.</u></b>	<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b>	<b><u>11</u></b>
<b><u>3.</u></b>	<b><u>RESUMEN EJECUTIVO</u></b>	<b><u>13</u></b>
3.1.	OBJETO DEL CONTRATO.	14
3.2.	LOCALIZACIÓN DE LA PISTA DE PRUEBA.	14
3.3.	PLAZO EJECUCIÓN.	14
3.4.	FECHA DE INICIACIÓN	14
3.5.	FECHA DE TERMINACIÓN.	14
3.6.	ACTIVIDADES DEL PROYECTO.	14
<b><u>4.</u></b>	<b><u>CONCEPTOS RELEVANTES SOBRE LA UTILIZACIÓN DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO EN LOS PAVIMENTOS</u></b>	<b><u>15</u></b>
4.1.	ASPECTOS GENERALES	15
4.1.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LAS LLANTAS.	15
4.1.2.	LAS LLANTAS DESECHADAS. .	17
4.1.3.	APLICACIÓN DEL GCR EN LOS PAVIMENTOS.	21
4.2.	PROCESO POR VÍA SECA	29
4.2.1.	TECNOLOGÍAS.	29
4.2.2.	PLUSRIDE.	29
4.2.3.	GENÉRICA.	30
4.2.4.	Convencional.	30
4.2.5.	APLICACIONES.	30
4.3.	PROCESO POR VÍA HÚMEDA	31
<b><u>5.</u></b>	<b><u>LIGANTES</u></b>	<b><u>39</u></b>
5.1.	REOLOGÍA DEL LIGANTE DE BARRANCA	40
5.1.1.	REOLOGÍA ANTES DE LA MODIFICACIÓN.	42
5.2.	DISEÑO DEL LIGANTE POR VÍA HÚMEDA	45
5.2.1	MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON EL GRANO DE CAUCHO RECICLADO PROCEDENTE DE LLANTAS RECICLADAS PROCESO VÍA HÚMEDA.	45
5.2.1.1.	Metodología	46
5.2.2.	GRANULOMETRÍA DEL CAUCHO UTILIZADO	46
5.2.3.	INCORPORACIÓN DEL CAUCHO Y PROCESO DE MEZCLADO	47
5.2.4.	Pruebas Físicas	49
5.2.5.	PRUEBAS REOLÓGICAS	53
5.2.5.2.	Influencia del tiempo de mezclado en el comportamiento reológico	59



5.4.1. ENVEJECIMIENTO EN HORNO DE PRESIÓN PAV	76
-----------------------------------------------	----

## **6. DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS** **79**

### **6.1. AGREGADOS** **79**

6.1.1. GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS	80
6.1.1.1. Arena de guamo	80
6.1.1.2. Arena de trituración Vista Hermosa	80
6.1.1.3. Grava de ½” de Vista Hermosa	81
6.1.1.4. Grava de 3/8” de Vista Hermosa	82
6.1.1.5. Pesos específicos y absorción.	83

### **6.2. LIGANTES** **83**

**LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS LIGANTES UTILIZADOS SE MUESTRA EN LA TABLA** **83**

### **6.3. METODOLOGÍA PARA LOS DISEÑOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS** **84**

6.3.1. CONTENIDO DE LIGANTE	85
6.3.2. GRANULOMETRÍA	87
6.3.3. DISEÑO DE MEZCLA PROCESO VÍA SECA	89

### **6.4. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS DISEÑOS DE MEZCLAS** **92**

6.4.1. CONTENIDO ÓPTIMO DE LIGANTE(SIGUIENTE PÁGINA)	94
6.4.1.1. Mezcla asfáltica con ligante Barranca 70/90	95
6.4.1.2. Mezcla asfáltica con ligante Barranca 70/90 modificado por proceso vía húmeda	96
6.4.1.3. Mezcla asfáltica con ligante Barranca 80/100	97
6.4.1.5. Mezcla asfáltica con ligante Barranca 80/100 modificado por proceso vía seca	99
6.4.1.6. Mezcla asfáltica con ligante Apiay 60/70 modificado por proceso vía húmeda	100
6.4.1.7. Mezcla asfáltica con ligante comercial modificado con polímero SBS	101
6.4.1.8. Mezcla asfáltica con ligante comercial modificado con polímero SBR	102
6.4.2. EVALUACIÓN DE DISEÑOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	103
6.4.2.1. MÓDULOS DINÁMICOS	104
6.4.2.1.2. COMPARATIVO DE MÓDULOS DINÁMICOS BARRIDO DE FRECUENCIAS A TRES TEMPERATURAS	109
6.4.2.2. Ahuellamiento	113
6.4.2.3. PRUEBAS DE FATIGA	117
6.4.2.4. INMERSIÓN COMPRESIÓN	119

## **7. PISTA DE PRUEBA** **121**

### **7.1. LOCALIZACIÓN** **121**

### **7.2. CARACTERIZACIÓN DE LA SUBRASANTE Y LAS CAPAS GRANULARES** **123**

7.2.1. APIQUE #1	124
7.2.2. APIQUE #2	125
7.2.3. APIQUE #3	126
7.2.4. APIQUE #4	127
7.2.5. RESUMEN DE RESULTADOS DE LABORATORIO	128



## **8. PRODUCCIÓN DE ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO EN PLANTA PILOTO** **129**

<b>8.1. MEZCLA SELECCIONADA</b>	<b>129</b>
<b>8.2. PLANTA PILOTO DE MODIFICACIÓN DE ASFALTOS</b>	<b>129</b>
<b>8.3. PLANTA PILOTO</b>	<b>132</b>
<b>8.4. OPERACIÓN PLANTA PILOTO DE MODIFICACIÓN DE ASFALTOS</b>	<b>139</b>
8.4.1. PRELIMINARES	139
8.4.2. CALIBRACIÓN EQUIPOS	139
8.4.2.1. Dosificación de Caucho	139
8.4.2.2. Dosificación del Asfalto	139
8.4.2.3. Sensor Nivel	140
8.4.2.4. Control por tiempo	140
8.4.2.5. Acople de planta piloto a la planta de producción de mezclas asfáltica. Instalación de Tuberías	140
<b>8.5. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD Y OPERABILIDAD</b>	<b>141</b>
8.5.1. CONDICIONES PARA TENER UN PROCESO SEGURO	141
8.5.2. IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD DEL PERSONAL	142
<b>8.6. METODOLOGÍA DE ARRANQUE Y OPERACIÓN</b>	<b>142</b>
8.6.1. ARRANQUE DE PLANTA PILOTO DE MODIFICACIÓN DE ASFALTOS	142
8.6.1.1. Calentamiento de la línea de alimentación del asfalto	142
8.6.1.2. Cerrado de válvula de salida del reactor.	142
8.6.1.3. Programación el panel de control de la temperatura de operación del reactor a 160°C	142
8.6.1.4. Calentamiento de las válvulas de tanque de almacenamiento (Tanque No. 2).	142
8.6.2. INCORPORACIÓN ASFALTO	142
8.6.2.2. Comprobación manual del nivel alcanzado en el tanque por el método de la barra.	142
8.6.3. INCORPORACIÓN DE CAUCHO	143
8.6.4. PROCESO DE REACCIÓN	143
8.6.5. SALIDA DE BACH Y ALMACENAMIENTO DEL MATERIAL	143
8.6.5.1. Apertura válvula de salida del reactor	143
8.6.5.2. Apertura válvula de la tubería que va del tanque reactor a la bomba	143
8.6.5.3. Encendido de la bomba	143
8.6.5.4. Apertura de válvula del tanque de almacenamiento asfalto – caucho. Tanque No 1.	143
8.6.5.5. Succión del asfalto del reactor y almacenamiento del material.	143
8.6.6. TIEMPOS DE ARRANQUE Y OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE MODIFICACIÓN DE ASFALTOS	144
<b>8.7. PRIMERAS PRUEBAS DE MODIFICACIÓN</b>	<b>144</b>
8.7.1. EVALUACIÓN REOLÓGICA DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS	145
8.7.1.1. Ajustes de Dosificación y condiciones de proceso	148

## **9. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA PISTA DE PRUEBA** **149**

<b>9.1. ACTIVIDADES PREELIMINARES</b>	<b>150</b>
<b>9.2. FASES DE CONSTRUCCIÓN</b>	<b>151</b>
9.2.1. FRESADO	151
9.2.2. EXTENSIÓN, SERIADO Y COMPACTACION	151



<b>9.3. MEDICIÓN DE DEFLEXIONES ANTES DE COLOCACIÓN DE MEZCLAS</b>	<b>152</b>
9.3.1. COLOCACION DE MEZCLA CONVENCIONAL	154
9.3.2. COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA PROCESO VIA SECA	155
9.3.3. COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA CON POLÍMERO SBS	156
9.3.4. COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA PROCESO VIA HUMEDA	156
9.3.5. COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA CON POLIMERO SBR	157
<b>10. AUSCULTACIÓN DE LA PISTA DE PRUEBA</b>	<b>158</b>
<b>10.1. MEDICIÓN DE TPD</b>	<b>158</b>
10.1.1. MEDICIÓN FEBRERO DE 2005	158
10.1.2. MEDICIÓN 9 DE JUNIO 2005	160
10.1.3. MEDICIÓN 1 DE SEPTIEMBRE 2005	161
10.1.4. . MEDICIÓN 1 DE NOVIEMBRE 2005	163
<b>10.2. MEDICIÓN DE ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL IRI</b>	<b>166</b>
<b>10.3. PERFILES LONGITUDINALES</b>	<b>176</b>
<b>10.3.1 SECCIONES TRANSVERSALES</b>	<b>181</b>
10.3.1.1. SUBTRAMO MEZCLA CON ASFALTO CONVENCIONAL BARRANCA 80-100.	181
10.3.1.2. Subtramo mezcla con asfalto convencional modificada por proceso vía seca.	185
10.3.2. SUBTRAMO CON MEZCLA POLÍMERO MODIFICADO CON SBS	187
10.3.3. SUBTRAMO CON MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO POR PROCESO VÍA HÚMEDA.	189
10.3.4. SUBTRAMO CON MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO SBR.	192
<b>10.4. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE ASFALTOS RECUPERADOS PISTA DE PRUEBA</b>	<b>195</b>
10.4.2. ASFALTO RECUPERADO TRAMO CON ASFALTO CONVENCIONAL.	195
10.4.3. ASFALTO RECUPERADO TRAMO DE MEZCLA MODIFICADA CON CAUCHO PROCESO VÍA SECA.	196
10.4.4. ASFALTO RECUPERADO TRAMO DE MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO SBS.	197
10.4.5. ASFALTO RECUPERADO TRAMO DE MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO PROCESO VÍA HÚMEDA.	198
10.4.6. ASFALTO RECUPERADO TRAMO DE MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO SBR.	199
<b>10.5. INVENTARIO DE FALLAS</b>	<b>201</b>
10.5.2. INVENTARIO JUNIO	201
10.5.3. INVENTARIO SEPTIEMBRE DE 2005	205
FIGURA 10.61. CUADRO COMPARATIVO DE DENSIDADES DE FISURACIÓN POR SUBTRAMO. 10.5.4.	
INVENTARIO NOVIEMBRE DE 2005	211
10.5.4. INVENTARIO NOVIEMBRE DE 2005	212
10.5.3. EVALUACIÓN DEL DETERIORO SUPERFICIAL	216
<b>10.6. DEFLEXIONES MÁXIMAS PISTA DE PRUEBA BARRIO LOS ÁLAMOS</b>	<b>221</b>
<b>11. CONCLUSIONES</b>	<b>226</b>
<b>11.2. ESPECÍFICAS</b>	<b>227</b>
11.2.1. RESPECTO AL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON CAUCHO	227
11.2.2. RESPECTO A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEJORADAS CON CAUCHO	229



---

11.2.2. RESPECTO A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO Y COLOCADAS EN EL TRAMO DE PRUEBA DE LOS ÁLAMOS. 230

**12. RECOMENDACIONES** 232

**13. BIBLIOGRAFÍA** 234



---

## ANTECEDENTES

Este proyecto debe su origen a un estudio realizado por el Distrito Capital sobre el aspecto ambiental de los desechos sólidos, donde el manejo de las llantas usadas generadas por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá recibió especial atención. Una de las conclusiones del estudio en mención es el despiece y trituración de llantas usadas y su incorporación en las mezclas asfálticas.

Fruto de esta preocupación, y como parte del Proyecto de Transporte Urbano para Santa Fe de Bogotá (BIRF 4021-CO), el Instituto de Desarrollo Urbano, IDU, contrató a la Universidad de los Andes para adelantar el Estudio de las Mejoras Mecánicas de Mezclas Asfálticas con Desechos de Llantas mediante el contrato 366/01 como parte de un programa de investigación para mejorar el comportamiento de las mezclas bituminosas que se colocan en la ciudad de Bogotá.

Actualmente existen dos procesos usados en la elaboración de concreto asfáltico en los que se incorpora desecho de llantas usadas, denominados como proceso húmedo y proceso seco. Estudios previos realizados con caucho natural y sintético en algunos países como Estados Unidos, España, Sudáfrica, entre otros, demostraron que el caucho sintético es el más apropiado para este uso particular. Este caucho es obtenido de forma económicamente viable empleando llantas de desechos que deben ser molidas hasta obtener tamaños de partícula apropiados. El caucho molido de esta forma recibe el nombre de grano de caucho reciclado ó GCR.

El estudio tuvo como objetivo principal establecer de manera confiable la metodología a seguir para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas con caucho producto del desecho de llantas usadas. Esta posibilidad además contribuye con la solución del problema ambiental que generan las llantas al finalizar su vida útil ya que estas constituyen un residuo difícil de eliminar.



Esta primera fase abarcó una búsqueda exhaustiva de información relacionada con métodos modernos para el diseño y construcción de vías haciendo uso de asfaltos modificados, considerando especialmente la alternativa de utilización de mezclas asfálticas mejoradas con caucho. Igualmente se recopiló información existente relacionada con nuevas tecnologías orientadas al proceso del caucho proveniente de llantas usadas y sus aplicaciones en las mezclas asfálticas. Mucha de esta información se obtuvo de asociaciones internacionales como Rubber Pavement Association, International Society for Asphalt Pavements, e información contenida en las memorias del Congreso Internacional Asphalt Rubber 2000 realizado en Vilamoura, Portugal, en Noviembre del año 2000, entre otros documentos.

En el proceso de mejoramiento del cemento asfáltico se estudiaron las condiciones de incorporación por vía húmeda del GCR a dos cementos asfálticos nacionales. Mediante este proceso se pretendía modificar el ligante para fabricar posteriormente mezclas asfálticas en caliente. Para el proceso de mejoramiento de las mezclas asfálticas por vía seca se estudió la incorporación del GCR como un agregado fino manteniendo los husos granulométricos convencionales. Estas mezclas asfálticas se analizaron bajo una perspectiva mecánica y volumétrica.

Seguido al proceso de recopilación de información se continuó con la etapa de laboratorio en la cual se evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho, y el efecto en la vida útil que esta aporta al pavimento. Posteriormente con base en las mejores condiciones logradas se decidió probar a escala real los resultados obtenidos en laboratorio mediante el empleo del carrusel de fatiga.

Para esto se construyeron dos tramos de prueba de igual estructura con el fin de comparar el comportamiento de una mezcla asfáltica convencional y una mejorada con caucho. A partir de los dos tramos construidos (en el carrusel de fatiga) se realizó un completo seguimiento



---

y auscultación del cual se obtuvieron datos sobre densidad de fisuración, perfiles transversales, deflexiones estáticas, deformación permanente, medición de temperatura.

Como resultado de todo el proceso se elaboraron las especificaciones técnicas generales para el empleo del GCR en la elaboración de mezclas asfálticas, se establecieron conclusiones y recomendaciones.

Dentro de las conclusiones generales más importantes podemos citar las siguientes:

El grano de caucho reciclado (GCR) obtenido de llantas usadas puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un agregado (proceso seco) ó como un modificador del ligante (proceso húmedo).

El GCR utilizado tanto por el proceso húmedo como por el proceso seco mejora la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas, sin embargo hace que los módulos disminuyan y la deformación plástica aumente con relación a la mezcla convencional, pero permaneciendo los valores obtenidos dentro de los admisibles especificados para este tipo de material.

El empleo del GCR incrementa la vida útil de un pavimento. Para el proceso por vía seca, en el diseño MDC-2 con una probabilidad de falla del 50% la vida útil se incrementó en 58% para contenidos de GCR de 1%, y 232% con 2% de GCR haciendo uso de la vía seca. La vida útil que se logra en un pavimento haciendo uso del proceso húmedo es superior a la obtenida mediante el proceso por vía seca.

Los costos de una mezcla asfáltica mejorada con GCR son mayores que los de una mezcla asfáltica convencional, aproximadamente un 26% cuando se utiliza 1% de GCR, y 42% cuando se utiliza el 2% por la vía seca.



---

La relación beneficio-costos se incrementa al utilizar GCR en mezclas asfálticas. El costo por eje en un pavimento puede disminuirse hasta un 20% cuando se emplea 1% de GCR, y hasta un 57% utilizando 2% de caucho por la vía seca. Sin embargo, un registro de su comportamiento mediante ensayos de laboratorio es limitado para justificar plenamente esta tendencia, establecer procedimientos y especificaciones confiables. Por esta razón es necesario extender su estudio al trabajo de campo, con tramos de estudio representativos en cuanto a longitud y cargas de tráfico reales para determinar con mayor precisión el beneficio que aporta la incorporación del GCR, y poder establecer las respectivas especificaciones de diseño.

Es por esto que el Instituto de Desarrollo Urbano a través del préstamo BIRF 7162-CO del Banco Mundial para la implementación y desarrollo del Proyecto de Servicios Urbanos para Bogotá, contrató a la Universidad de los Andes mediante el contrato 306 de 2003 para que lleve a cabo la “Segunda Fase del estudio de las Mejoras Mecánicas de Mezclas Asfálticas con Desechos de Llantas – Pista de Prueba”.

Los objetivos principales de este estudio son: Asesorar al Instituto de Desarrollo Urbano en las técnicas de fabricación en planta y control en laboratorio de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho, caracterización de la estructura granular existente y de la subrasante donde se colocarán las mezclas asfálticas, diseño de la estructura del pavimento y construcción de pista de prueba .

Durante la vida útil de la pista se realizó un seguimiento completo mediante auscultación de las mezclas asfálticas colocadas durante un periodo de un año. Además se tomaron muestras de asfalto para medir su envejecimiento, se midió la densidad de fisuración de la capa de rodadura, todo esto acompañado de un inventario completo del tipo y número de vehículos que circularán la pista de prueba.



## 1. INTRODUCCIÓN

Tres de los problemas más comunes que se presentan en los pavimentos asfálticos son el fisuramiento por fatiga, el ahuellamiento, y los que corresponden a la adherencia agregado-ligante, situación que disminuye la vida útil del pavimento e incrementa los costos de mantenimiento y operación vehicular.

Como respuesta a la necesidad de incrementar la competitividad de los pavimentos, y tratando de minimizar los factores que inciden en él, es necesario mejorar las características del cemento asfáltico mediante la utilización racional y técnica de modificadores. Este procedimiento representa un cambio en la filosofía tradicional de diseñar mezclas asfálticas que se ajusten al ligante, ya que por el contrario se diseña un ligante bituminoso para que satisfaga una necesidad y que representa una solución a un problema específico. Esta modificación podrá incluir mejoras en una disminución en la susceptibilidad térmica del ligante por la incorporación de grupos polares más estables, los cuales lo protegen de la oxidación y mejoran el comportamiento de la mezcla asfáltica ante la acción del agua, asunto este que además depende de las características del material pétreo.

Este trabajo de investigación se enfoca en el empleo del GCR como modificador del ligante y como mejorador de la mezcla asfáltica para su uso en la construcción de pavimentos flexibles. Los beneficios que éste aporta a los pavimentos, y a los cuales se espera llegar con esta investigación, podrán verse reflejados en una disminución de espesores en las capas asfálticas con respecto a pavimentos asfálticos con materiales convencionales para una misma vida útil establecida. Esto se debe a que el caucho bien dosificado en las mezclas asfálticas mejora la resistencia al fisuramiento por fatiga y evita el ahuellamiento del pavimento a altas temperaturas, aumentando la vida útil del mismo y disminuyendo los costos de mantenimiento. Por otro lado mejora el agarre de los neumáticos de los vehículos al pavimento, reduce el envejecimiento por oxidación del ligante, ayuda a la preservación



---

del medio ambiente, y a disminuir el ruido generado por el tráfico al contacto con el pavimento.

Entre las desventajas se encuentran, para la vía húmeda, un mayor costo inicial por las modificaciones necesarias a los equipos o plantas asfálticas y un aumento en la temperatura de mezclado, y para la vía seca un mayor tiempo de compactación en obra. Además existen otras desventajas como la falta de especificaciones y los problemas potenciales para reciclar estos productos, asunto que debe ser objeto de un programa de investigación.

El presente estudio presenta el desarrollo metodológico utilizado para modificar asfalto convencional a nivel de planta piloto mediante el proceso conocido como vía húmeda. El estudio además de abarcar un completo análisis de la modificación del ligante y su desempeño reológico, evalúa el desempeño de las mezclas obtenidas con el ligante modificado con GCR (caucho), y la mezcla obtenida al adicionar el GCR como una porción de los agregados finos (proceso vía seca). El desempeño mecánico de las mezclas en laboratorio se llevó a cabo a través de ensayos dinámicos (módulos), ensayos de fatiga, pruebas de ahuellamiento en pista de laboratorio y pruebas de adherencia en presencia de agua. Pero el alcance del proyecto no se limitó al análisis de mezclas en laboratorio, sino que todos los diseños evaluados se llevaron a la práctica en un tramo de prueba con cargas reales, y expuesto a la influencia climática de cualquier pavimento en servicio en la ciudad de Bogotá. Para esto un corredor vial de 300 m de longitud fue escogido, teniendo en cuenta su volumen de tráfico, que el flujo vehicular fuera uniforme y que estuviera en mal estado.

El corredor escogido por el IDU para llevar a cabo el proyecto se encuentra ubicado sobre la carrera 96, comprendido entre la calle 67A y la calle 63 más conocida como Avenida José Celestino Mutis. Como para toda obra vial, sobre el corredor escogido se llevó a cabo una completa caracterización de la subrasante y de las capa granulares existentes. Sobre el corredor fueron colocadas cinco (5) tipos de mezclas con ligantes diferentes pero de igual granulometría, entre las mezclas colocadas se incluyeron dos tipos de mezclas con ligantes



---

comerciales modificados con polímeros para que sirvieran de comparativo con las mezclas objeto del estudio. Terminada la construcción de la pista de prueba, se dio inicio a un año de auscultación y seguimiento de los tramos construidos. El presente documento describe en detalle la metodología, procedimiento y resultados obtenidos de la experiencia adquirida en el manejo de mezclas asfalto-caucho con las correspondientes conclusiones y recomendaciones.

## **2. RESUMEN EJECUTIVO**



---

### **2.1. OBJETO DEL CONTRATO.**

Segunda fase del estudio de las Mejoras Mecánicas de Mezclas Asfálticas con Desechos de Llantas –Pista de prueba.

### **2.2. LOCALIZACIÓN DE LA PISTA DE PRUEBA.**

Calle 96 desde carrera 67 hasta avenida José Celestino Mutis, Barrio los Álamos, Bogotá D.C.

### **3.3. PLAZO EJECUCIÓN.**

Veintitrés (22) meses.

### **3.4. FECHA DE INICIACIÓN**

26 de enero de 2004.

### **3.5. FECHA DE TERMINACIÓN.**

25 de noviembre de 2005.

### **3.6. ACTIVIDADES DEL PROYECTO.**

1. Recopilación Información:
2. Ensayos Asfalto-Caucho (ensayos de laboratorio):
3. Ensayos Mezclas Asfálticas. (Ensayos de laboratorio):
4. Caracterización de la Estructura Existente (Apiques, ensayos de laboratorio):
5. Diseño de la Estructura del Pavimento:
6. Auscultación del pavimento existente:
7. Diseño de Mezclas asfálticas:
8. Planta Piloto (Selección de equipos, calibración, operación):
9. Construcción de pista de Prueba:
10. Control de Pista de Prueba:



## **4. CONCEPTOS RELEVANTES SOBRE LA UTILIZACIÓN DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO EN LOS PAVIMENTOS**

### **4.1. ASPECTOS GENERALES**

Ingenieros de vías alrededor del mundo han experimentado incorporando GCR en pavimentos asfálticos desde la década de los cincuenta. Algunos de estos primeros experimentos involucraron la adición de caucho natural con el objetivo de aprovechar su flexibilidad en una superficie de pavimento eficiente y duradera. La labor fue difícil arrojando resultados iniciales que proporcionaban pequeños o nulos beneficios; el resultado fue un pavimento asfáltico modificado con un mayor costo y una vida de servicio más corta que la de uno convencional. Sólo hasta la década de los sesenta se encontró una formulación que resultó ser satisfactoria.

En países de los cinco continentes el empleo de GCR ha dado buenos resultados, y su uso se ha venido incrementando con el tiempo gracias al apoyo e interés de entidades públicas y centros de investigación.

**4.1.1. Características fisicoquímicas de las llantas.** Las principales materias primas utilizadas en la fabricación de llantas son cauchos naturales y sintéticos (SBS, SBR), acero, textiles y aditivos, entre los que se destacan el negro de humo, aceites, óxido de zinc activado con cadmio, dióxido de titanio, sulfuro, sílica, resinas fenólicas y ácidos grasos.

La materia base del caucho natural es el látex que se da en la Hevea mas conocido como árbol del caucho. Las cualidades que el caucho natural aporta a las llantas son: la maleabilidad, gran resistencia mecánica y adherencia de estas sobre cualquier tipo de superficie, cualidades que hacen que todavía hoy siga siendo un elemento indispensable para la industria de las mismas, donde se consume aproximadamente el 70% de la



---

producción mundial. En el ligante modificado con GCR el aporte del látex de las llantas se traduce en un mejor comportamiento elástico.

El caucho sintético fue desarrollado durante la segunda guerra mundial a través del programa americano GRS (Government Rubber Stock) para contrarrestar la falta del caucho natural, los cauchos sintéticos ofrecen cada día mayores posibilidades de formulación. Estos elastómeros derivados del petróleo han permitido mejorar las características de las llantas, en particular prolongar su vida útil y aumentar su nivel de adherencia. Cuando se incorporan en los ligantes asfálticos mejoran la susceptibilidad térmica y en general sus características reológicas proporcionando un cemento asfáltico no tan fluido a elevadas temperaturas ni tan viscoso a bajas.

El negro de humo es obtenido por combustión o descomposición térmica parcial de gases naturales o hidrocarburos pesados. Este elemento en las llantas permite conseguir unas mezclas más resistentes a la rotura y a la abrasión, dándoles el característico color negro. En el ligante actúa como un agente inhibidor del envejecimiento, lo que prolonga la capacidad cohesiva del mismo en el tiempo.

La sílice es obtenida de la arena que al ser asociada con un elastómero sintético específico, gracias a un agente de enlace y a un proceso especial de mezclado, da como resultado mezclas que permiten elaborar unas llantas que presentan baja resistencia al rodamiento y buena adherencia en superficies frías, sin perder los niveles de resistencia al desgaste del negro de humo.

Dentro de los procesos de fabricación de llantas se encuentra el vulcanizado, el cual consiste en ligar las cadenas de elastómeros entre sí por reacción con el azufre bajo la acción del calor. Durante este proceso la mezcla de elastómeros pasa de un estado plástico a uno elástico.



**4.1.2. Las llantas desechadas.** Cada año millones de llantas son desechadas en todo el mundo. Las llantas viejas son visualmente contaminantes, atentan contra la salud pública y generan peligro por ser generadoras de incendios; por otro lado se presenta inconvenientes con su disposición final, ya que por ser considerada un desecho sólido deben ser enterradas, almacenadas, o destruidas por incineración.



**Figura 4.1. Aspecto de un botadero de llantas desechadas.** Tomado de: <http://www.ces.clemson.edu/arts/>.

La quema directa provoca graves problemas medioambientales ya que produce emisión de gases que contienen partículas nocivas para el entorno. El almacenamiento ocupa un espacio considerable causando pérdida de recursos y desperdicio de energía. En los rellenos sanitarios imposibilitan la compactación y ocasionan problemas de estabilidad por la degradación química parcial que sufren, generando inseguridad en los mismos. En las montañas de llantas la proliferan roedores, insectos y otros animales dañinos, y la



---

reproducción de mosquitos, que transmiten por picadura fiebres y encefalitis, llega a ser 4.000 veces mayor en el agua estancada de una llanta que en la naturaleza.

En la actualidad se utilizan diversos métodos para recuperar algunos de los materiales presentes en las llantas desechadas, y para destruir sus componentes peligrosos, estos son algunos:

**Termólisis:** se trata de un sistema en el que se somete a los materiales de residuos de llantas a un calentamiento en un medio en el que no existe oxígeno. Las altas temperaturas y la ausencia de oxígeno tienen como efecto destruir los enlaces químicos.

**Pirólisis:** este proceso, que se encuentra aún en fase de investigación, presenta problemas técnicos en la separación de la gran cantidad de compuestos carbonados que se producen en su desarrollo, resultando muy costoso.

**Incineración:** proceso mediante el cual se produce la combustión de los materiales orgánicos de las llantas a altas temperaturas en hornos con materiales refractarios de alta calidad. Es un proceso costoso que presenta inconvenientes en las diferentes velocidades de combustión de los componentes y la necesidad de depuración de los residuos, por lo que es difícil de controlar, resultando contaminante. Genera calor que puede ser usado como energía, ya que se trata de un proceso exotérmico. Con este método, los productos contaminantes que se producen en la combustión son perjudiciales para la salud humana, entre ellos el monóxido de carbono, hollín de xileno, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, óxidos de zinc, benceno, fenoles, dióxido de azufre, óxidos de plomo, tolueno, entre otros. El hollín contiene cantidades importantes de hidrocarburos aromáticos policíclicos altamente cancerígenos. El zinc es particularmente tóxico para la fauna acuática. Muchos de estos compuestos son solubles en el agua, por lo que pueden pasar a la cadena trófica y de ahí a los seres humanos.



**Trituración criogénica:** este método requiere instalaciones muy complejas que lo hace poco rentable. De igual manera el mantenimiento de la maquinaria y del proceso resultan difíciles. La baja calidad de los productos obtenidos y la dificultad física y económica para filtrar y separar el caucho del metal y los textiles que forman la llanta provoca que este sistema sea poco recomendable.

**Trituración mecánica:** por ser un proceso puramente mecánico los productos resultantes son de alta calidad y limpios de todo tipo de impurezas, facilitando la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones. La trituración con sistemas mecánicos generalmente es el paso previo en los diferentes métodos de recuperación y rentabilización de los residuos de llantas.

Según el DAMA<sup>1</sup>, el mayor volumen de llantas usadas generadas por el parque automotor en Bogotá se utiliza para aprovechamiento energético, fundamentalmente como combustible en los hornos de producción de panela en el noroccidente de Cundinamarca. Un menor volumen se lleva a labores de reencauche, y una cantidad mínima es usada en actividades de regrabado, uso artesanal, entre otros. En la Figura 4. se ilustra la tendencia del uso de llantas desechadas en Bogotá, de acuerdo al estudio realizado por OCADE para el DAMA.

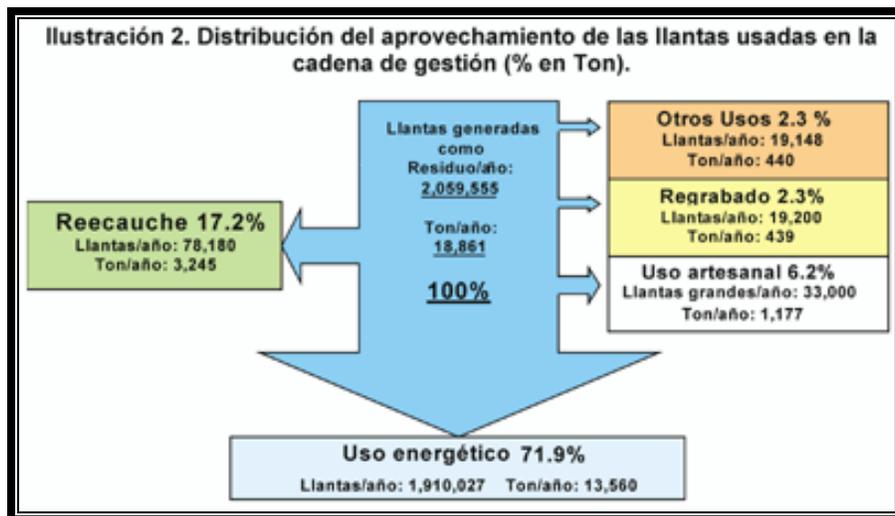
Este estudio concluye con cuatro alternativas ambientales que mejor se acomodan a nuestro medio para el uso de llantas desechadas, siendo de mayor viabilidad las dos últimas ya que las dos primeras generan emisión de compuestos orgánicos volátiles por la incineración de las mismas, estas alternativas son:

---

<sup>1</sup> COLOMBIA, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usadas generadas por el parque automotor de Bogotá. En Gestión de residuos en Bogotá. Bogotá D.C. : DAMA, 2000. p. 51-69



- 1 Aprovechamiento energético y materia prima para hornos en la industria cementera, como fundamento en el uso de llantas usadas como combustible alterno al carbón en función de su potencial calorífico.
- 2 Aprovechamiento energético en termoeléctricas, utilizando el poder calorífico de llantas usadas para generar energía eléctrica.
- 3 Su utilización como materia prima para la producción de pavimento asfáltico, con base en la adición de caucho pulverizado durante la fabricación del mismo.
- 4 Suministro de materia prima para productos de caucho, entre los cuales están los moldeados, las alfombras, entre otros.



**Figura 4.2. Porcentaje en toneladas de la distribución del aprovechamiento de llantas usadas en la cadena de gestión.** Tomado de: Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usadas generadas por el parque automotor de Bogotá.

Con base en una priorización de las alternativas entre las cuales se consideraron los aspectos económicos, tecnológicos, sociales y ambientales, la Unión Temporal OCADE Ltda estableció la alternativa de suministro de materias primas como la mejor opción, dentro de la cual cabe la opción de su utilización en la construcción de pavimentos asfálticos.



**+4.1.3. Aplicación del GCR en los pavimentos.** El caucho de llantas usadas puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados como proceso húmedo y proceso seco. En el proceso húmedo, el caucho actúa modificando el cemento asfáltico, mientras que en el proceso seco, el caucho es usado como una porción del agregado fino. Cada proceso es utilizado dependiendo del producto que se quiera obtener, existiendo para cada uno diferentes tecnologías, como se muestra a continuación.

**Tabla 4.1. Terminología asociada con el uso del GCR en mezclas asfálticas.**

MATERIAL	PROCESO	TECNOLOGÍA	PRODUCTO
GCR	Húmedo	Bachadas	Asfalto modificado con caucho ó Asfalto-caucho
		Continua	
		Terminal	
	Seco	PlusRide	Mezcla asfáltica mejoradas con caucho
		Genérica	
		Convencional	

El caucho para ser utilizado como materia prima en la elaboración de mezclas asfálticas es reciclado de las llantas desechadas y disminuido en tamaño por trituración mecánica. El GCR debe ser de contextura fina en tamaños menores a 6.3 mm (1/4”). Los métodos para la producción del GCR imparten diferentes características en cuanto a la forma y textura del grano de caucho. Las técnicas de molienda más comunes son el proceso ambiental y criogénico.

Una de las principales características que presenta el cemento asfáltico modificado con GCR es el aumento en la viscosidad de la mezcla resultante; esto hace que la mezcla asfalto-caucho sea más flexible a bajas temperaturas mientras que a altas temperaturas logra que sea menos plástica. Entre los principales beneficios logrados en los pavimentos se encuentran las mejoras en la deformación permanente, la fatiga, y la resistencia al fisuramiento a bajas temperaturas.



Países como Estados Unidos se dieron a la tarea de buscar una solución a la disposición final de las llantas desechadas. En este país algunos Estados han reglamentado el uso del GCR como material para mejorar los pavimentos asfálticos; es así como un determinado porcentaje de GCR se viene usando en las mezclas asfálticas colocadas desde 1994, iniciando ese año con un 5 por ciento y llegando hasta un 20 por ciento en 1997. California, Florida y Arizona lideraron esta campaña cuyo objetivo inicial se fundamentó en aspectos ambientales, pero que poco a poco al evaluar las propiedades y beneficios que se adquirirían en los pavimentos con estudios de laboratorio y campo, se propusieron incentivar a los contratistas de vías mediante un mandato que otorgaba beneficios económicos a aquellos que utilizaran el GCR en la elaboración de mezclas asfálticas, por el contrario, si no se cumplía con el mandato, eran penalizados con la pérdida del porcentaje equivalente a la ayuda federal. Este mandato se puso en marcha gracias a la información suministrada por el Ministerio de transporte estadounidense USDOT y la Agencia de protección del medio ambiente EPA en un informe al Congreso estadounidense en el que se indicaba la factibilidad del empleo de GCR en mezclas asfálticas.

Mezclas asfálticas y sellantes modificados con caucho fueron usados por primera vez en la República de Sudáfrica en 1983. En los últimos 15 años se han colocado más de 150.000 Ton de asfalto modificado con caucho en este país. Muchos estudios de campo y laboratorio se han adelantado en Sudáfrica haciendo uso de la experiencia adquirida por el estado de California en los Estados Unidos.

Dependiendo del proceso utilizado, el costo de usar GCR en las mezclas asfálticas puede llegar a superar al de las elaboradas con materiales convencionales. El proceso por vía seca demanda mas cantidad de ligante, requiere un procedimiento especial para la adición del GCR, y un mayor tiempo de compactación en obra. El proceso por vía húmeda requiere nuevos equipos en planta, como la unidad de mezclado y almacenamiento del asfalto-



---

caucho, cambio de bombas y tuberías, y energía adicional para calentar la mezcla a mayores temperaturas con tiempos de reacción prolongados.

El caucho sintético se ha convertido en un recurso muy popular y económico en la elaboración de mezclas asfálticas gracias al creciente aumento de llantas desechadas en áreas metropolitanas. Algunas de las ventajas y desventajas en el uso del GCR sintético para mejorar mezclas asfálticas se presentan a continuación.

Entre las ventajas están:

1. El caucho molido al ser vulcanizado para resistir calor y sobrecalentamiento elimina los problemas encontrados con el polímero virgen.
2. No presenta solubilidad, a diferencia del caucho natural este no cambia dentro del cemento asfáltico al ser sobrecalentado.
3. Al ser mezclado con el cemento asfáltico a altas temperaturas atrae componentes livianos de este último hasta producir una partícula hinchada que se enlaza dentro de la matriz del ligante, generando un manto asfalto-caucho más resistente al fisuramiento.
4. El GCR posee valiosos componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto. Algunos de estos son:

**Negro de humo:** este componente se destaca por su acción específica contra el desgaste de las llantas al contacto con la superficie, permitiendo quintuplicar la duración de la llanta. Considerado como un antioxidante, este componente reduce el desgaste de la llanta al incrementar la durabilidad del caucho. En la mezcla asfáltica ha demostrado aumentar las propiedades de refuerzo del ligante y ayudar a disminuir su envejecimiento.



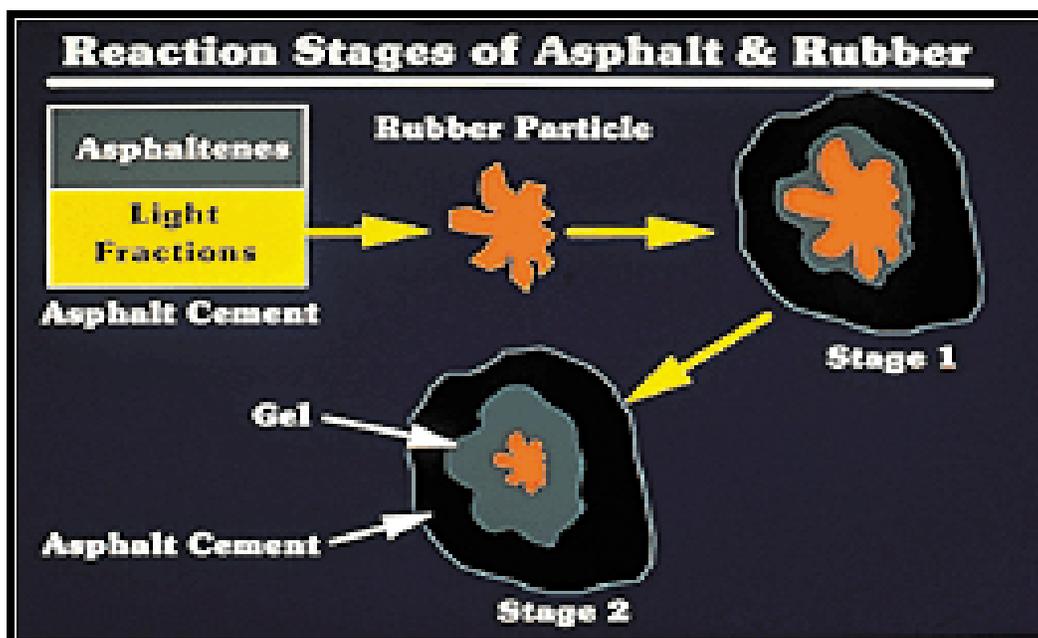
**Antioxidantes:** compuestos que retardan el deterioro del caucho natural causado por la oxidación. Algunas de las sustancias usadas son los estabilizadores del caucho sintético, principalmente de los polímeros de butadieno, en el momento de la preparación, y cuando se usan de este modo se denominan estabilizadores. el GCR contiene más del 20 por ciento de este compuesto.

**Aminas:** son adicionadas durante el proceso de vulcanizado y están estrechamente relacionadas con los compuestos de antiadherencia. Las aminas aromáticas evitan el endurecimiento progresivo del caucho, el aumento de su fragilidad y la pérdida de la elasticidad.

**Aceites aromáticos:** estos son similares a los agentes rejuvenecedores los cuales prolongan la vida del asfalto-caucho.

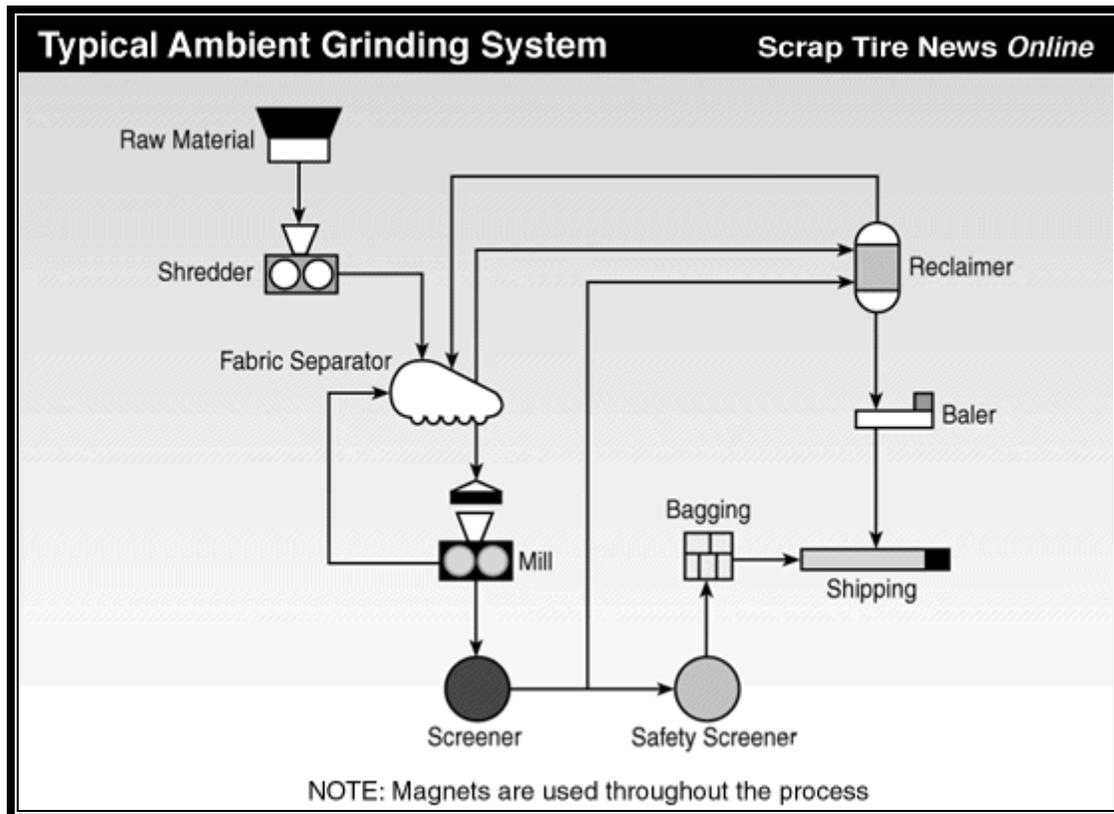
Las desventajas encontradas son:

1. La captación de aceites del cemento asfáltico por parte de las partículas de caucho afecta adversamente las propiedades de cohesividad y adhesividad del ligante, haciendo que disminuya la propiedad de la mezcla a unirse con las superficies de la estructura del pavimento o con los agregados. Este problema se puede solucionar usando ligantes mas blandos ricos en aceites, sin embargo, la mezcla resultante podría ser muy blanda y delicada.
2. Al modificar el ligante con GCR la mezcla resultante experimenta un incremento en la viscosidad haciéndola no apta para ser usada en ciertas aplicaciones que requieren que este ligante sea bien fluido. Este problema se puede solucionar ablandando la mezcla asfalto-caucho con el uso de kerosén.



**Figura 4.3. Interacción entre las partículas de Caucho y el cemento asfáltico.** Tomado de: <http://www.asphalt.com/emulsions/rubber.html>.

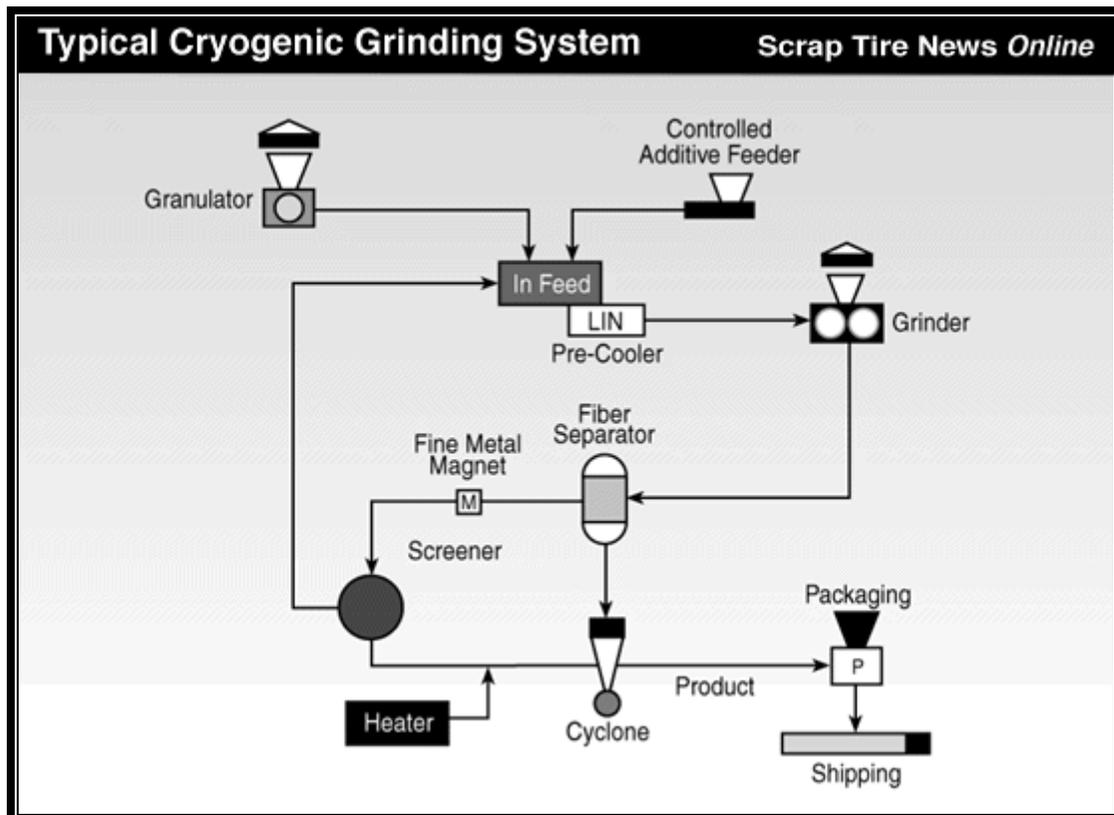
**4.1.3.1. Proceso ambiental.** La molienda ambiental puede ser lograda de dos modos: por granulación y por molienda. El proceso ambiental describe la temperatura del caucho o del trozo de llanta para ser reducida de tamaño. Normalmente el material entra en el molino o granulador a temperatura ambiente aumentando considerablemente durante el proceso debido a la fricción generada al ser desgarrado. Los granuladores reducen el tamaño del caucho mediante corte por la acción de cuchillas. El tamaño de producto es controlado por tamices ubicados dentro de la máquina, los cuales pueden ser cambiadas para variar el tamaño de producto final.



**Figura 4.4. Esquema del proceso Ambiental para la molienda de llantas.** Tomado de: <http://www.scrap tirenews.com/areas/crumb/process.html>

Tanto los molinos primarios, secundarios y finales son muy similares, y su forma de operación tiene básicamente el mismo principio, estos usan dos rodillos grandes de giro con dentaduras que cortan el material, ubicadas en uno o ambos rodillos. La diferencia de los rodillos está en la configuración que se les da; estos funcionan cara a cara muy juntos y con velocidades diferentes. El tamaño de producto es controlado por el espacio libre entre los rodillos. El caucho por lo general es pasado por 2 y 3 molinos para alcanzar varias reducciones del tamaño del grano, y así poder separarlo de los otros componentes como fibras y acero que se encuentran en las llantas. Las partículas de caucho producidas en molinos tienen formas típicas alargadas, angostas, y con una alta superficie de área.

**4.1.1.4. Proceso criogénico.** Este proceso se refiere al empleo de nitrógeno líquido u otros materiales ó métodos para congelar trozos de llanta o granos de caucho antes de la reducción de tamaño, haciéndolo quebradizo como un cristal a temperaturas por debajo de  $-80^{\circ}\text{F}$  ( $-62^{\circ}\text{C}$ ).



**Figura 4.5. Esquema del proceso Criogénico para la molienda de llantas.** Tomado de: <http://www.scraptirenews.com/areas/crumb/process.html>

El acero es separado mediante el empleo de imanes, y la fibra es por medio de aspiración y selección. El material resultante presenta aspecto brillante y limpio, con superficies fracturadas y poco contenido de acero y fibra, debido a que la fragmentación ocurre por las uniones entre la fibra, el acero, y el caucho.



El empleo de temperaturas criogénicas puede ser aplicado en cualquier etapa para la reducción en tamaño de los trozos de llanta. Normalmente el tamaño del material a ser triturado es un nominal de 2 pulgadas, el cual es congelado en una cámara o sumergido en un baño de nitrógeno líquido para reducir la temperatura y posteriormente ser triturado en una unidad de reducción por medio de impacto en un molino de martillo. Este proceso reduce el caucho a partículas entre tamaños de ¼” a mínimo tamiz número 30.

**4.1.1.1. Otros procesos.** Adicional a las técnicas de molienda convencionales, ambiental y criogénica, se han desarrollado otros procesos como el de molienda-húmeda el cual hoy en día es muy empleado para producir tamaños de grano finos (tamices 40 a 60) y muy finos (tamiz 60) requiriendo de una segunda etapa de alta intensidad de molienda.

También llamado micromolienda, es un proceso de molienda patentado en el que las partículas diminutas de caucho son reducidas a un menor tamaño por molienda entre dos ruedas muy juntas en un medio líquido, el cual generalmente es agua.

**4.1.1.1.1 Caucho molido utilizado.** El GCR que se utilizó en esta investigación fue un grano de caucho desechado producto del reencauche de llantas usadas de camión suministrado por la firma Renovadora de Llantas Ltda. En el proceso de reencauche, la superficie de las llantas usadas es raspada con cuchillas que giran en sentido contrario al movimiento de rotación normal de la llanta, obteniéndose partículas que van desde tamaños de 2.38 mm a 74 µm, libre de fibras y metales. Las partículas superiores a 2 mm son de forma alargada, lo que requiere de un proceso adicional de molienda para lograr un grano de caucho de menor tamaño con formas redondeadas. Los procesos anteriormente mencionados para obtener el GCR permiten que el caucho conserve el vulcanizado.



Este desecho, conocido como ripio, es vendido a empresas que continúan con el proceso de molienda hasta lograr tamaños adecuados. El producto final es usado en la industria de molduras en caucho, tapetes, suelas, entre otros productos.

## **4.2. PROCESO POR VÍA SECA**

El proceso seco es cualquier método donde el GCR es adicionado directamente a la mezcla asfáltica caliente, siendo usualmente mezclado con los agregados antes de adicionar el cemento asfáltico. Este proceso se lleva a cabo cuando se quiere usar el GCR como un agregado en la mezcla asfáltica, por lo general, como un sustituto de una pequeña parte del agregado fino, el cual puede estar entre el uno y tres por ciento del peso total de los agregados en la mezcla. A diferencia del proceso húmedo, este proceso no requiere un equipo especial, sólo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de GCR y que sea suministrada en el momento indicado para que se mezcle con los agregados cuando estos alcancen cierta temperatura y antes de que el ligante sea adicionado.

**4.2.1. Tecnologías.** Las dos tecnologías más comunes en Estados Unidos para el uso del GCR por la vía seca son la tecnología PlusRide y la tecnología Genérica ó sistema TAK, otra tecnología muy popular es la que emplea granulometrías convencionales, la cual fue desarrollada en España y es actualmente usada en muchos países.

**4.2.2. PlusRide.** Esta tecnología fue originalmente desarrollada en Suecia a finales de los años 1960, y registrada en los Estados Unidos bajo el nombre comercial PlusRide por la firma EnviroTire. El GCR es agregado a la mezcla asfáltica en proporciones que van de 1 a 3 por ciento del peso total de los agregados. El GCR son partículas que van desde 4.2 mm (1/4") a 2.0 mm (tamiz No 10). El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe



---

estar entre 2 y 4 por ciento, y por lo general son obtenidos con contenidos de ligante entre 7.5 a 9 por ciento.

**4.2.3. Genérica.** Esta tecnología fue desarrollada por el Dr. Barry Takallou a finales de los años 1980 y a principio de los años 1990 para producir mezclas asfálticas en calientes con granulometría densa. Este concepto emplea tanto el GCR grueso como fino para emparejar la granulometría de los agregados obteniendo una mezcla asfáltica mejorada. En este proceso la granulometría del GCR es ajustada para acomodar la granulometría de los agregados. A diferencia de las mezclas PlusRide, la granulometría del GCR se divide en dos fracciones en la que la parte fina se encarga de interactuar con el cemento asfáltico mientras la parte gruesa entra a comportarse como una agregado elástico en la mezcla asfáltica.

El GCR puede llegar a necesitar una pre-reacción o pre-tratamiento con un catalizador para alcanzar un óptimo hinchazón de la partícula. En este sistema, el contenido de GCR no debe exceder el 2 por ciento del peso total de la mezcla para capas de rodadura.

**4.2.4. Convencional.** Esta tecnología fue desarrollada en España para usar el GCR en la mejora de mezclas asfálticas empleando granulometrías convencionales que no implican consumos elevados de cemento asfáltico, pero que aportan menos cantidad de caucho, aproximadamente un dos por ciento del peso total de los agregados. Estas mezclas asfálticas han sido evaluadas dinámicamente en el laboratorio y colocadas en la vía con buenos resultados.

**4.2.5. Aplicaciones.** El proceso seco puede ser usado para mezclas asfálticas en caliente en granulometrías densas, abiertas o discontinuas. No puede ser usado en otro tipo de aplicaciones como mezclas en frío, sellos, o tratamientos superficiales por ser un proceso en el que no se modifica el ligante.



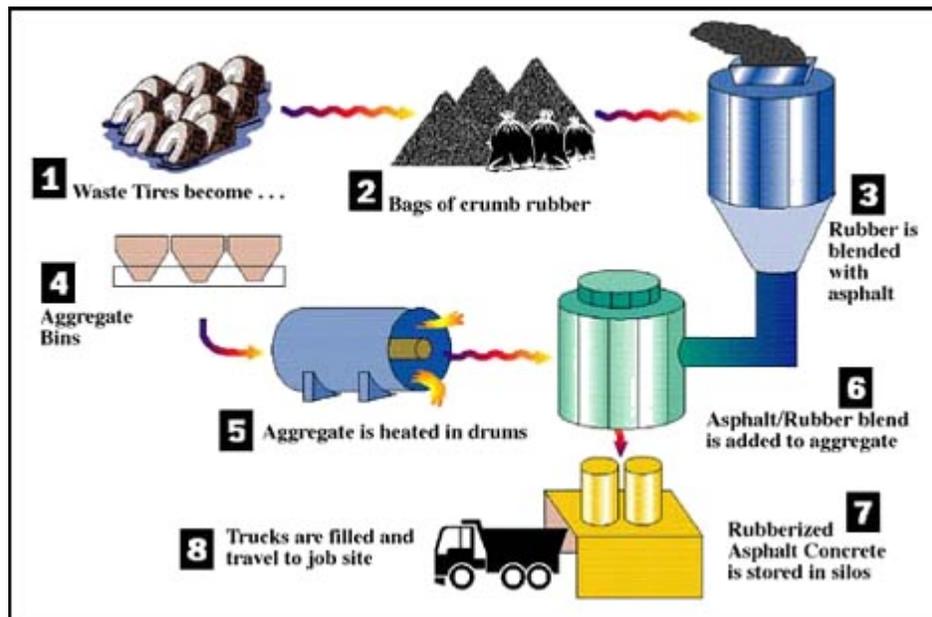
---

**4.2.5.1. Mezclas asfálticas en caliente.** Cuando se usa una mezcla tipo discontinua con GCR la discontinuidad en los tamaños de los agregados produce una textura en la mezcla asfáltica relativamente gruesa que disminuye potencialmente el ahuellamiento y la facilidad de deslizamiento de los vehículos sobre el pavimento. Con propiedades similares al asfalto-caucho, las mejoras en el ligante proporciona características de elasticidad y adhesividad a la mezcla asfáltica, lo que puede incrementar la resistencia al fisuramiento inducido por las capas granulares si las deformaciones no son muy grandes.

Las partículas gruesas del GCR actúan como un agregado en la mezcla asfáltica que puede mejorar el desempeño de la misma. Las partículas de GCR que quedan expuestas en la superficie del pavimento tienen una función importante al impedir que las llantas de los vehículos se deslicen sobre el pavimento ofreciendo un mejor agarre, y las que quedan dentro del cuerpo de la mezcla asfáltica ayudan a retardar el fisuramiento inducido por las capas granulares por absorción de los esfuerzos obstaculizando la propagación de la fisura.

### **4.3. PROCESO POR VÍA HÚMEDA**

En el proceso húmedo, el GCR es mezclado con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada asfalto-caucho que es usada de la misma manera que un ligante modificado.



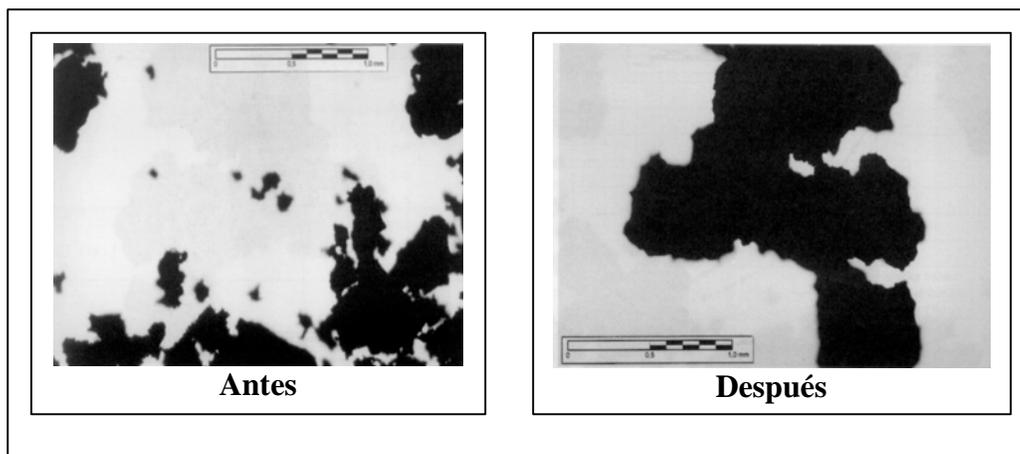
**Figura 4.6. Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por la vía húmeda.** Tomado de: <http://www.rubberizedasphalt.org/how.htm>.

El cemento asfáltico que ha sido modificado con GCR es llamado asfalto-caucho y es el resultado de la interacción del GCR con el ligante, donde la reacción que ocurre entre los dos no es una reacción de tipo química. Cuando el cemento asfáltico y GCR son mezclados, el GCR reacciona con el cemento asfáltico hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos. El grado de modificación del ligante depende de muchos factores entre los cuales se encuentran el tamaño, textura y proporción del GCR, tipo del cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla, el componente aromático del cemento de asfáltico, y el uso de otros aditivos.

**4.3.1. Modificación del ligante.** La reacción entre el cemento asfáltico y el GCR implica, como ya se ha dicho, la absorción de aceites aromáticos del cemento asfáltico por el GCR



en las cadenas de polímero, las cuales comprenden los componentes principales de la estructura del caucho natural y sintético.



**Figura 4.7. Partícula de caucho antes y después de ser mezclada con cemento asfáltico.** Tomado de: Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference.

La reacción entre GCR y el cemento asfáltico puede ser aumentada ampliando el área superficial del GCR, la temperatura de mezclado y el tiempo de agitación. La viscosidad de la mezcla es el principal parámetro usado para supervisar la reacción. Para una reacción especificada, por razones económicas, el tiempo escogido deberá ser el mínimo a una temperatura seleccionada.

Entre las tecnologías usadas en el proceso húmedo están: el mezclado por batchadas ó tecnología McDonald, mezclado continuo, y mezclado terminal.

**4.3.1.1. Tecnología por batchadas.** Esta metodología consiste en una producción de mezclado de asfalto y caucho por batchadas. Las primeras aplicaciones en el proceso húmedo fueron batchadas y se basaron en la tecnología McDonald, que fue



desarrollada a comienzos de los años 1960 por Charles McDonald, y patentada en los años 1970 por la Arizona Refining Company (ARCO). Hoy en día existen numerosas patentes relacionadas con la tecnología McDonald, muchas de las cuales ya han expirado y otras cuantas todavía se encuentran vigentes.

**4.3.1.2.Tecnología continua.** Este proceso consiste en un sistema de producción de mezclado de asfalto y caucho de manera continua. La tecnología de mezclado continua fue desarrollada en Florida a finales de los años 1980 y es conocida como Florida Wet Process. En este proceso, un tamaño fino 0.18 mm (tamiz No. 80) de GCR es mezclado con el cemento asfáltico en un proceso continuo. La tecnología de Florida se diferencia del proceso McDonald en varios aspectos: emplea bajos porcentajes de GCR, entre 8 y 10 por ciento, el tamaño de la partícula de caucho requerida es más pequeña, disminuye la temperatura de mezclando, y acorta el tiempo de reacción. El proceso húmedo de Florida aún no ha sido patentado.

**4.3.1.3.Tecnología terminal.** La tecnología de mezclado Terminal es un proceso húmedo que brinda la capacidad de mezclar o combinar el cemento asfáltico con el GCR y conservar el producto durante amplios períodos de tiempo. Este producto asfalto-caucho tiene una amplia duración de almacenamiento y puede ser mezclado en la refinería donde se produce el cemento asfáltico por cualquiera de las dos tecnologías, continua o por batchadas.



**4.3.1.4. Aplicaciones.** El cemento asfáltico modificado con GCR mediante el proceso húmedo ha sido usado ampliamente como ligante en la reparación de grietas y sello de juntas, tratamientos superficiales, membranas retardantes de fisuras, y en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.<sup>2</sup>

**4.3.1.5. Sellantes.** El ligante modificado como material sellante tiene un excelente desempeño y es una buena alternativa en cuanto a su costo efectivo. Entre las propiedades ingenieriles que este aporta están la mejora en la susceptibilidad térmica, reduce el envejecimiento, y mejora la durabilidad ante el ataque de agentes agresores como el agua, el clima y la radiación ultravioleta. Las cadenas del polímero mejoran la viscosidad del ligante a altas temperaturas sin alterar de manera significativa la viscosidad a bajas temperaturas, aumentando la capacidad elástica del ligante aportándole flexibilidad.

La escogencia de un sellante para un trabajo cualquiera se debe hacer de acuerdo al tipo de pavimento, forma, tamaño y tipo de la grieta o junta, tiempo previsto para una próxima rehabilitación, volumen del tráfico, magnitud de los esfuerzos en el pavimento, temperaturas máximas y mínima, eficacia de equipos y operarios, y control del tráfico.

En muchos países estos ligantes modificados con GCR son premezclados y empacados para luego ser utilizados en obra calentándolos a 175°C, debiendo ser usados durante las 12 horas siguientes a su calentamiento. Aún a la temperatura de aplicación este ligante modificado es muy viscoso y no se auto nivelará después de ser aplicado. Para obtener una óptima adhesión entre el pavimento y el sellante, la temperatura del pavimento debe estar por encima de 5°C.

---

<sup>2</sup> ESTADOS UNIDOS. Federal Highway Administration. State of the practice – Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. Washington : FHWA, 1992. p. 28. ISBN FHWA-92-022



**4.3.1.6. Tratamientos superficiales.** El asfalto-caucho puede ser usado como ligante en un tratamiento superficial. La susceptibilidad térmica y la elasticidad del ligante modificado con GCR ayudan a que la mezcla resista los esfuerzos inducidos por el clima y el tráfico.

El contenido de negro de humo en el caucho ayuda a que el proceso de envejecimiento de la mezcla disminuya, factor importante en la duración del tratamiento superficial. Finalmente, la capacidad del ligante para retener y cubrir los agregados es mejorada por las características de adhesión que aporta el nuevo ligante. A pesar de los beneficios aportados por el cemento asfáltico modificado con GCR su costo es significativamente alto comparado con un tratamiento superficial convencional.



**Figura 4.8. Aplicación de asfalto-caucho en un tratamiento superficial. Tomado de:**

**<http://www.allstatesasphalt.com/nf-sv-6.htm>.**



Para el diseño de un tratamiento superficial con este ligante se debe tener en cuenta la mezcla asfalto-caucho y los agregados a cubrir. La consistencia del asfalto-caucho puede ser reducida con un diluyente para mejorar el flujo en el sistema de irrigación. El diluyente es normalmente un producto más ligero que el petróleo, normalmente se usa kerosén, el cual es adicionado a la mezcla asfalto-caucho justo antes de ser aplicado a la superficie del pavimento. La dosis de aplicación del diluyente es aproximadamente 5 a 7 por ciento del peso del asfalto-caucho. Como el diluyente escogido puede afectar el tiempo de curado, inmediatamente después de la construcción se puede colocar una pequeña capa de arena para minimizar el desprendimiento de partículas y de asfalto-caucho en el proceso de curado.

Los agregados a cubrir son otro factor importante en el diseño de la mezcla asfalto-caucho, donde una apropiada selección de la granulometría y forma del agregado son importantes en el buen desarrollo del tratamiento superficial. Los agregados deben estar relativamente limpios para obtener un óptima adhesión con la mezcla. La compatibilidad de la mezcla y los agregados también es un factor determinante del diseño, por lo tanto es necesario realizar un ensayo de adherencia.

Seguido a la escogencia de los materiales el ingeniero de vías debe determinar la velocidad apropiada de aplicación del riego con el irrigador y la extensión de los agregados para lograr un apropiado cubrimiento y embebido.

**4.3.1.7. Mezclas asfálticas en caliente.** El uso del GCR en las mezclas asfálticas en caliente tiene una mayor variabilidad y potencial que en las aplicaciones anteriormente discutidas. Este tipo de ligante modificado con GCR es apto para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente de tipo densas, abiertas y discontinuas. El proceso de elaboración de las mezclas asfálticas con asfalto-caucho es igual al de un ligante modificado.

Entre los principales beneficios que se obtienen usando asfalto-caucho en mezclas asfálticas en caliente está la reducción de la susceptibilidad térmica, con lo que las



---

características de resistencia a la fatiga en la mezcla asfáltica pueden llegar a ser mas uniformes durante las temperaturas de operación del pavimento. Esta reducción puede incrementar también la resistencia al ahuellamiento a altas temperaturas y la resistencia al fisuramiento térmico a bajas; adicionalmente reduce la oxidación y envejecimiento de la mezcla asfáltica por el contenido de negro de humo que el GCR aporta y por una gruesa capa de ligante que se forma sobre los agregados debido a la alta viscosidad del asfalto-caucho. Esta gruesa capa de ligante sobre los agregados ayuda así mismo a reducir el desprendimiento de los agregados del pavimento. El aumento de la elasticidad del ligante puede incrementar la resistencia al fisuramiento inducido por las capas granulares.

El nivel de mejoramiento depende de muchos factores. Por ejemplo, si se presentan problemas de ahuellamiento, el principal factor en la estabilidad de la mezcla está en el contacto entre los agregados, donde cualquier mejora que se le haga al ligante no corregirá la situación a no ser que se corrija la granulometría de los mismos. El grado de mejora está reflejado en la importancia del ligante para una determinada mezcla.



## 5. LIGANTES

Durante la investigación se estudió la modificación de ligantes nacionales por incorporación de grano de caucho reciclado – GCR, el cual proviene de la molienda o pulverización de llantas desechadas. En principio se analizó el asfalto de Barranca con penetración 70-90, pero durante el transcurso de la investigación la producción de dicho ligante fue cambiada por ligante con penetración 80-100. Hecho que obligó a estudiar el ligante con la nueva penetración. Complementariamente se estudió la modificación con el cemento asfáltico producido en la refinería de Apiay con penetración 60-70. Sin embargo la investigación se concentró principalmente sobre la aplicación del GCR dentro del asfalto de la refinería de Barranca. Adicionalmente los resultados obtenidos de la caracterización reológica del asfalto-caucho con cemento Barranca fueron comparados con asfaltos comerciales modificados con polímeros tales como Stireno Butadieno Rubber – SBR, y Stireno Butadieno Stireno – SBS. De forma análoga fueron comparadas las mezclas elaboradas con asfaltos convencionales, con asfalto-caucho y con ligantes modificados con polímeros.

A continuación se presentan las características de los asfaltos producidos en el país. Los asfaltos estudiados de acuerdo con ECOPETROL poseen las siguientes características:

**Tabla 5.1. ASFALTO BARRANCA 80-100**

Características	Unidades	Métodos	Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	cm	D 113	100	
Penetración a 25°C, 100 g 5s	mm/10	D 5	80	100
Punto de ablandamiento	° C	D 36	42	53
Punto de Inflamación	° C	D 92	232	
Solubilidad en tricloroetileno	g/100g	D 2042	99	
Pérdida de masa	g/100	D 2872		1

Fuente : <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/catalogo05/asfaltos.htm>

**Tabla 5.2. ASFALTO APIAY 60-70**

Características	Unidades	Métodos	Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	cm	D 113	100	
Penetración a 25°C, 100 g 5s	mm/10	D 5	60	70
Punto de ablandamiento	° C	D 36	45	55
Punto de Inflamación	° C	D 92	232	
Solubilidad en tricloroetileno	g/100g	D 2042	99	
Pérdida de masa	g/100	D 2872		1

Fuente : <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/catalogo05/asfaltos.htm>

De acuerdo a las especificaciones del INVIAS en el Artículo 400-96, el cual trata “Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación y liga, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas densas y abiertas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos” en el aparte 400.2.2 de Cemento asfáltico, las especificaciones para el cemento asfáltico son las siguientes:

“El cemento asfáltico a emplear en los riegos de liga y en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente será de penetración 60-70 u 80-100, según las características climáticas de la región y las condiciones de operación de la vía. Tal como lo indica la Tabla 400.2”.

**Tabla 5.3. Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente.**

Tránsito de diseño 10 <sup>6</sup> ejes de 80 kN	Temperatura media anual de la región		
	24 °C +	15-24 °C	15 °C
5 +	60-70	60-70	80-100
0.5 a 5	60-70	60-70 u 80-100	80-100
0.5 -	60-70	60-70 u 80-100	80-100

Fuente: Tabla 400.2, Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS.

**Tabla 5.4. Especificaciones del cemento asfáltico.**

CARACTERÍSTICA		Norma de ensayo INV	60-70		80-100	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724	-1	+1	-1	+1
Pérdida por calentamiento en película delgada (163 °C, 5h)	%	E-721	-	1.0	-	1.0
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	E-702	100	-	100	-
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento en película delgada, % de la penetración original	%		52	-	48	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2

Fuente: Tabla 400.3, Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS.

“Los requisitos de calidad del cemento asfáltico son los que establece la tabla 400.3. El cemento asfáltico podrá modificarse mediante la adición de activantes, rejuvenecedores, polímeros, asfaltos naturales o cualquier otro producto sancionado por la experiencia. En tales casos, las especificaciones particulares establecerán el tipo de adición y las especificaciones que deberán cumplir tanto el ligante modificado como las mezclas asfálticas resultantes. La dosificación y dispersión homogénea del producto de adición deberán tener la aprobación del Interventor”.

Como parte de la metodología propuesta, sobre los asfaltos estudiados se realizó una completa caracterización física antes de iniciar con la etapa de modificación. Posterior a la caracterización física los ligantes fueron envejecidos en horno rotatorio de lámina delgada – RTFOT, y en la cámara de envejecimiento a presión - PAV. El RTFOT sirve para simular el proceso de envejecimiento durante la fabricación, colocación y compactación de la mezcla. A su vez el PAV simula el envejecimiento del ligante a lo largo de la vida útil del pavimento. Finalmente muestras de ligantes en estado virgen, envejecidos en RTFOT y PAV fueron caracterizadas reológicamente con un Reómetro de Corte Dinámico- DSR.



modelo Autogap CSL 2100 de *TA instruments*. La caracterización reológica brinda información sobre el desempeño del ligante bajo esfuerzos de corte cíclicos, y determina el módulo de corte complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de desfase ( $\delta$ ) para una frecuencia y deformación preestablecida.

Los ensayos realizados para la caracterización física y reológica del ligante se muestran a continuación:

- Penetración
- Punto de Ablandamiento (anillo y bola)
- Ductilidad
- Viscosidad de Brookfield (Barrido de temperaturas).
- Estabilidad al almacenamiento
- Envejecimiento de horno rotatorio de película delgada (RTFO), y cálculo de pérdida de masa.
- Envejecimiento de cámara de presión (PAV).
- Reología de los ligantes en DSR, para caracterización viscoelástica..

Los resultados obtenidos de la caracterización física del asfalto de Barranca se muestran en la tabla 5.5.

**Tabla 5.5. Propiedades Físicas asfalto de Barranca (80-100).**

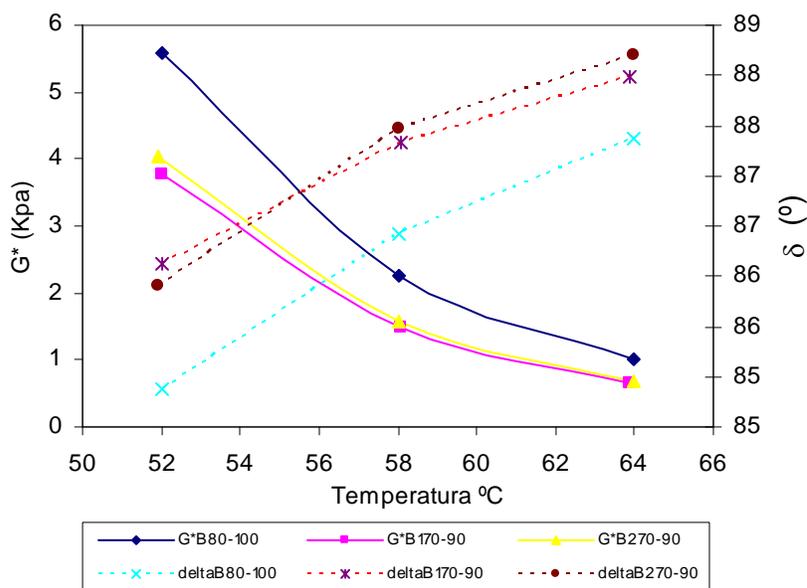
PRUEBA	Barranca 80-100
Viscosidad a 135°C(cP)	683
Penetracion Original(dmm)	92
Ductilidad(cm)	150
Estabilidad al almacenamiento	SI
Punto Ablandamiento(°C)	50
Penetracion del Residuo(dmm)	33
Pérdida de Masa (%)	0,08

## 5.1. Reología del ligante de Barranca

### 5.1.1. Reología antes de la modificación.

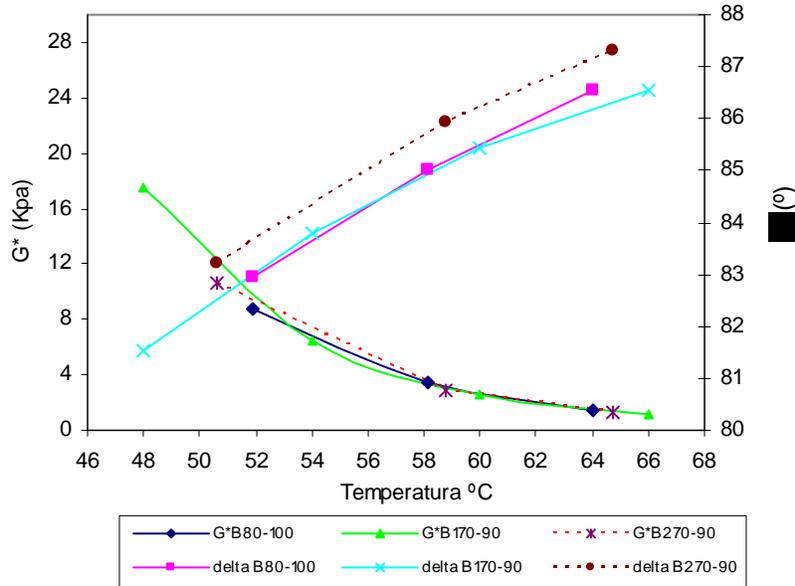


Como se comentó anteriormente la caracterización reológica se llevó a cabo en un DSR. Se caracterizaron los ligantes de Barranca 70-90 y Barranca 80-100 en estado virgen u original. Sobre el ligante de Barranca 70-90 se realizó un ensayo, y una replica (B170-90, B270-90), posteriormente con el cambio de producción de ECOPETROL de Barranca 70-90 a Barranca 80-100, se llevó a cabo la caracterización del ligante con la nueva penetración.



**Figura 5.1. Caracterización reológica de asfalto Barranca en el DSR. Barrido de temperatura con frecuencia de 10 rad/s.**

La Figura 5.1 muestra la caracterización visco-elástica de los ligantes en estado original, se observa como a mayor temperatura los ligantes presentan un menor módulo de corte y un ángulo de desfase en aumento tendiendo a 90°, es decir hacia el comportamiento viscoso.



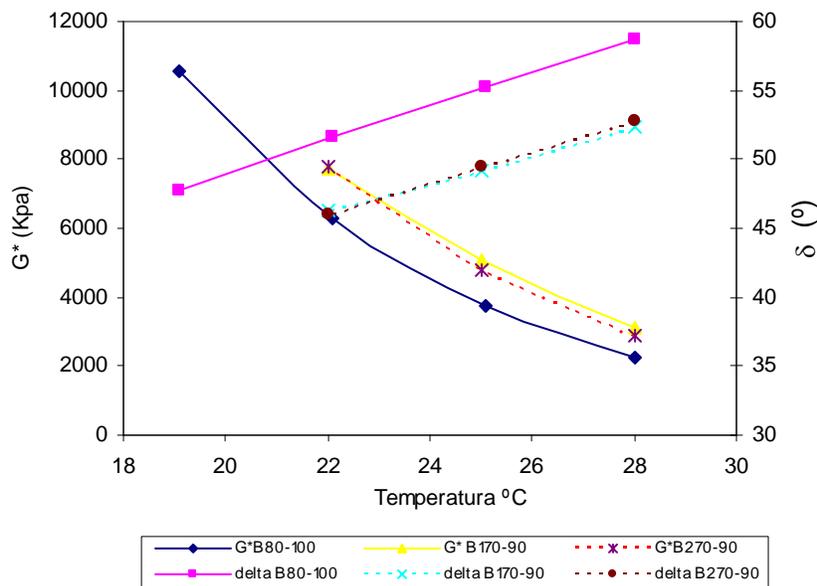
**Figura 5.2. Caracterización reológica en DSR al residuo RTFOT del asfalto de Barranca 70-90 y 80-100. Barrido de temperatura con frecuencia de 10 rad/s.**

Cuando el asfalto de Barranca fue sometido al envejecimiento RTFOT, como era de esperarse presentó un incremento en el módulo de corte y una disminución en los ángulos de desfase cercana a 1° (Figura 5.2). A pesar que el asfalto de B80-100 presentó una mayor rigidez en estado original, su incremento en rigidez fue menor que el experimentado por los de penetración de 70-90, incrementos que sobrepasa de dos a tres veces el módulo en el estado original.

La Figura 5.3, muestra los resultados obtenidos en la prueba de envejecimiento a presión PAV (Pressure Aging Vessel), la cual según la literatura simula un envejecimiento de manera acelerada en laboratorio, análogo al envejecimiento de la mezcla en campo entre 5 y 10 años de servicio. Como se muestra en la figura 1.9, el asfalto de B80-100 presenta una menor rigidez que los asfalto con penetración de 70-90, la diferencia entre ambos asfaltos es superior a los 1500 Kpa, lo cual representa una diferencia considerable. Sin embargo es



entendible la diferencia, teniendo en cuenta que el asfalto de 70-90 como lo indica la nomenclatura es menos blando que el de 80-100.



**Figura 5.3. Caracterización reológica en DSR al residuo PAV del asfalto de Barranca 70-90 y 80-100. Barrido de temperatura con frecuencia de 10 rad/s.**

## 5.2. DISEÑO DEL LIGANTE POR VÍA HÚMEDA

### 5.2.1 Modificación del asfalto con el grano de caucho reciclado proveniente de llantas recicladas Proceso vía húmeda.

La modificación del asfalto con caucho surge como una nueva alternativa para mejorar las propiedades del asfalto por medio de un material económico como lo es el caucho reciclado de llantas. Simultáneamente con esta propuesta se está ayudando a encontrar solución a una problemática ambiental como el manejo de los depósitos de llantas que han terminado su vida útil en ese oficio.

A continuación se presentará el procedimiento utilizado para la modificación del asfalto de la refinería de Barranca, los materiales, y condiciones bajo estudio. Posteriormente se



presentan los resultados obtenidos a los diferentes porcentajes de cacho incorporado y caracterización del material resultante.

#### 5.2.1.1. Metodología

La metodología utilizada para el diseño del ligante contempló el análisis del ligante de la refinera de Barrancabermeja. El proceso de modificación del ligante fue adelantado entorno a dos variables:

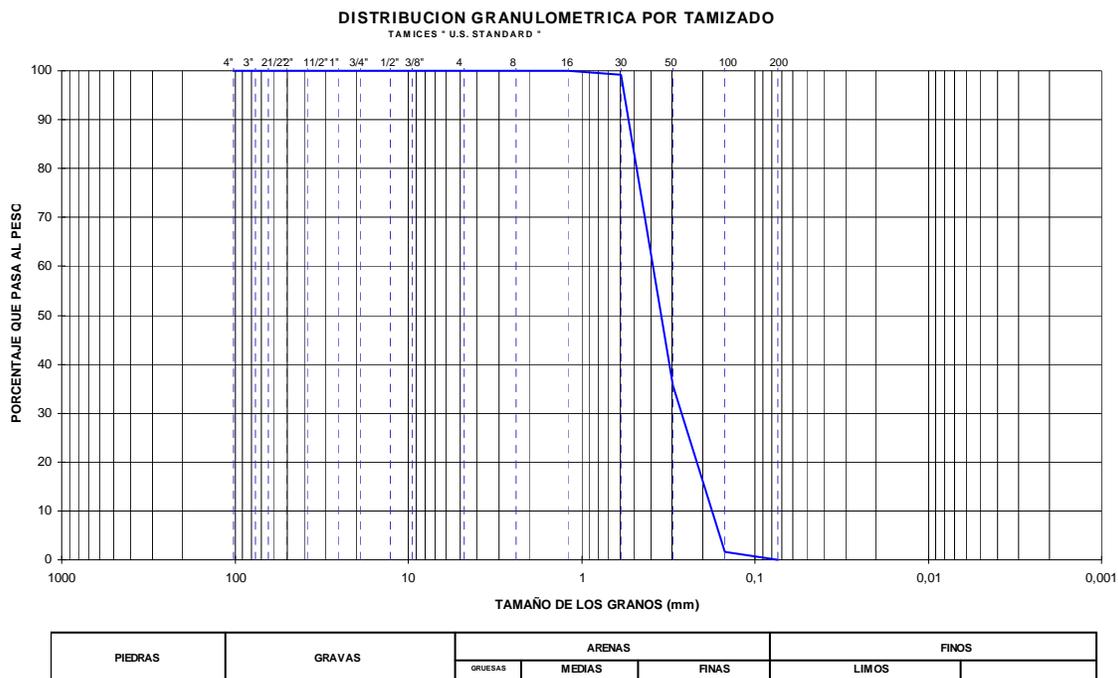
- a.) Tiempo de mezclado: se utilizaron tiempos de 20 y 40 minutos.
- b.) Porcentaje de caucho incorporado: se utilizaron porcentajes de 15 y 20% del total del peso de la mezcla asfalto-caucho.

En la primera fase del estudio (Contrato IDU-366-01, Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas) se estableció que por las características de los ligantes nacionales y por motivos económicos en el funcionamiento en planta, no era conveniente modificar los ligantes a temperaturas elevadas (175 a 200°C) como se practica en la literatura internacional (Sebaaly et al., 2000, Leite et al., 2000). Por lo anterior y basados en los resultados obtenidos en la primera fase del proyecto se escogió una temperatura de mezclado de 155°C. Con el fin de optimizar el proceso de modificación se utilizó como mezclador el equipo Ultra Turrax T-50 el cual proporciona una energía de mezclado de 2000 rpm.

#### 5.2.2. Granulometría del caucho utilizado

El caucho utilizado durante el proceso de modificación del ligante es proveniente de una empresa reencauchadora de llantas, por lo que el caucho se genera como un desperdicio del proceso de molienda de la huella de la llanta.

El grano de caucho reciclado en forma bruta fue sometido a un tamizado para garantizar la uniformidad del material. El material fue clasificado como pasa 30. La granulometría del caucho se presenta a continuación (Figura 5.4).



**Figura 5.4. Granulometría del GCR.**

**5.2.3. Incorporación del caucho y Proceso de Mezclado**

Como se describió en la parte superior, el proceso de modificación se llevó a cabo por medio del esfuerzo cortante suministrado por el equipo Ultra Turrax T-50 a 2000 rpm. La condición de temperatura fue controlada con ayuda de un manto de calentamiento a 155 °C (Figura 5.5).

La incorporación del modificador se lleva a cabo de manera continua una vez el asfalto esta fundido y a una temperatura de 155 °C.

La tabla No. 5.6, ilustra las mezclas evaluadas indicando los porcentajes de caucho utilizados al igual que los tiempos de mezclado.

**Tabla 5.6. Dosificaciones utilizadas en el mezclado**

MUESTRA	% DE CAUCHO	TIEMPO DE MEZCLA (min)
B1-15-20	15	20
B2-15-20	15	20
B3-15-20	15	20
B1-20-20	20	20
B2-20-20	20	20
B3-20-20	20	20
B1-15-40	15	40
B2-15-40	15	40
B3-15-40	15	40
B1-20-40	20	40
B2-20-40	20	40
B3-20-40	20	40

Nomenclatura.

B1-15-20: Los dos primeros dígitos indican el origen del asfalto, en este caso B. de la refinería de Barranca; A. para la refinería de Apiay, acompañado de el número de la muestra en estudio. El siguiente par de dígitos indican el porcentaje de caucho incorporado, y por último se indica el tiempo de mezclado para cada muestra.

**Figura 5.5. Montaje para modificación en el laboratorio**



#### 5.2.4. Pruebas Físicas

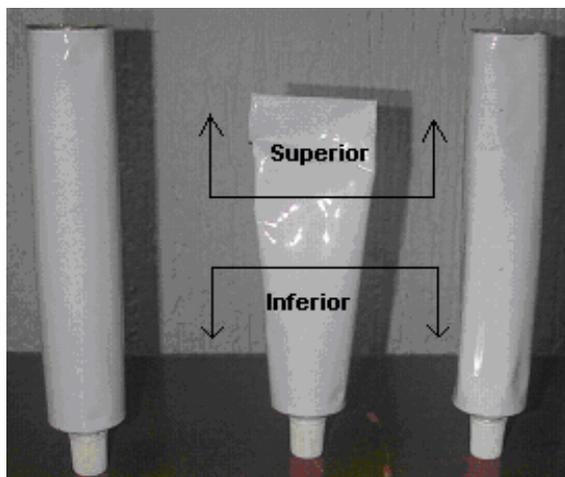
La evaluación de las propiedades físicas se llevó a cabo a través de las pruebas estabilidad al almacenamiento, de penetración y de viscosidad Brookfield.

##### 5.2.4.1. Prueba de estabilidad al Almacenamiento

La prueba Zenke o de estabilidad al almacenamiento permite evaluar el porcentaje de separación entre fases. Consiste en mantener la muestra asfáltica en un tubo colapsible de aluminio sellado y sin aire durante 72 horas a una temperatura entre 160°C y 180°C.

La evaluación se hace por medio del punto de ablandamiento (Test de anillo y Bola). Según Arenas<sup>3</sup> en su libro “Tecnología del Cemento Asfáltico” habrá separación de fases si la diferencia entre la temperatura de ablandamiento de los extremos del tubo supera los 4 °C . La prueba se desarrolla bajo la norma INVIAS E-712-1998.y la ASTM D-36.

La figura 5.6 muestra los tubos colapsibles de aluminio utilizados. El montaje y las probetas utilizadas para la prueba de anillo y bola se presentan en las figuras 5.7 y 5.8.



**Figura 5.6. Tubos Colapsibles de Aluminio**

<sup>3</sup> ARENAS Hugo, “Tecnología del Cemento Asfáltico”. Ed. Faid. 1991.



**Figura 5.7. Probetas de la Prueba Anillo y Bola**



**Figura 5.8. Montaje Prueba Anillo y Bola**

Los resultados de esta prueba se presentan en la tabla No. 5.7.

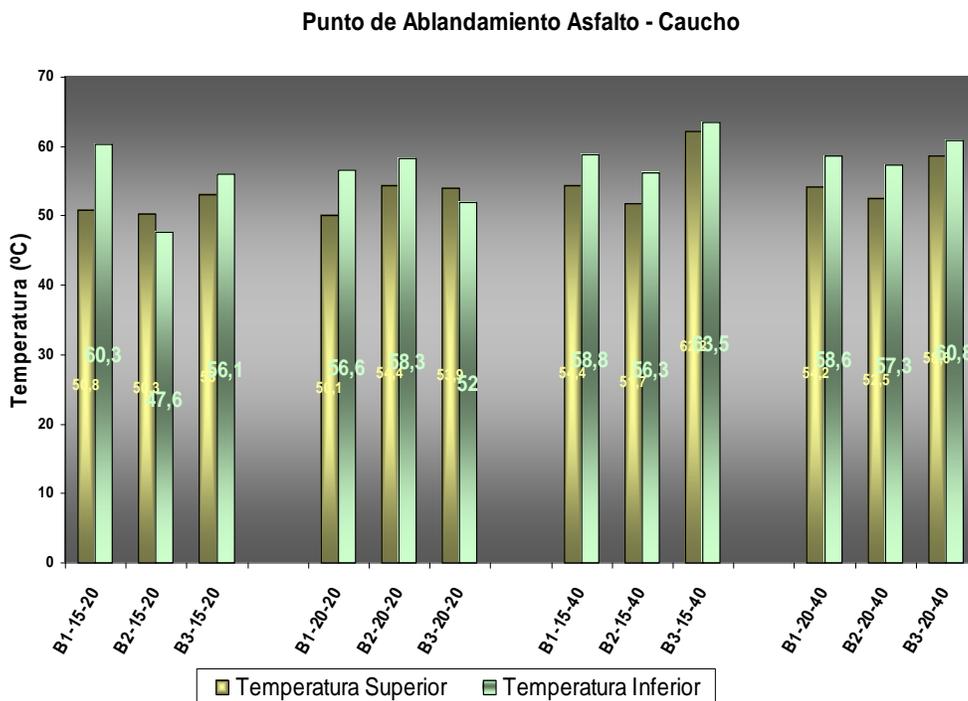
**Tabla 5.7. Resultados Prueba de Anillo y Bola**

Muestra	T ablandamiento (°C)		% Diferencia	Separación
	SUPERIOR	INFERIOR	T ablandamiento	Fases
<b>B1-15-20</b>	50,8	60,3	15,8	SI
<b>B2-15-20</b>	50,3	47,6	5,7	NO
<b>B3-15-20</b>	53	56,1	5,5	NO



<b>B1-20-20</b>	50,1	56,6	11,5	SI
<b>B2-20-20</b>	54,4	58,3	6,7	NO
<b>B3-20-20</b>	53,9	52	3,7	NO
<b>B1-15-40</b>	54,4	58,8	7,5	SI
<b>B2-15-40</b>	51,7	56,3	8,2	SI
<b>B3-15-40</b>	62,2	63,5	2,0	NO
<b>B1-20-40</b>	54,2	58,6	7,5	SI
<b>B2-20-40</b>	52,5	57,3	8,4	SI
<b>B3-20-40</b>	58,6	60,8	3,6	NO

En general se presenta una tendencia donde al aumentar el tiempo de mezclado se presenta una separación de fases menor. Por otro lado, al disminuir la cantidad de caucho incorporado se obtiene una mayor homogeneidad en la fase.



**Figura 5.9. Comparación de Temperaturas de Ablandamiento para la Prueba Zenke**

5.2.4.2. Penetración.



La prueba de Penetración permite relacionar el valor obtenido con la consistencia del asfalto a temperaturas medias de servicio, además de asociar este parámetro con una posible falla de fisuramiento. La prueba se desarrolla bajo la norma ASTM 5-73.

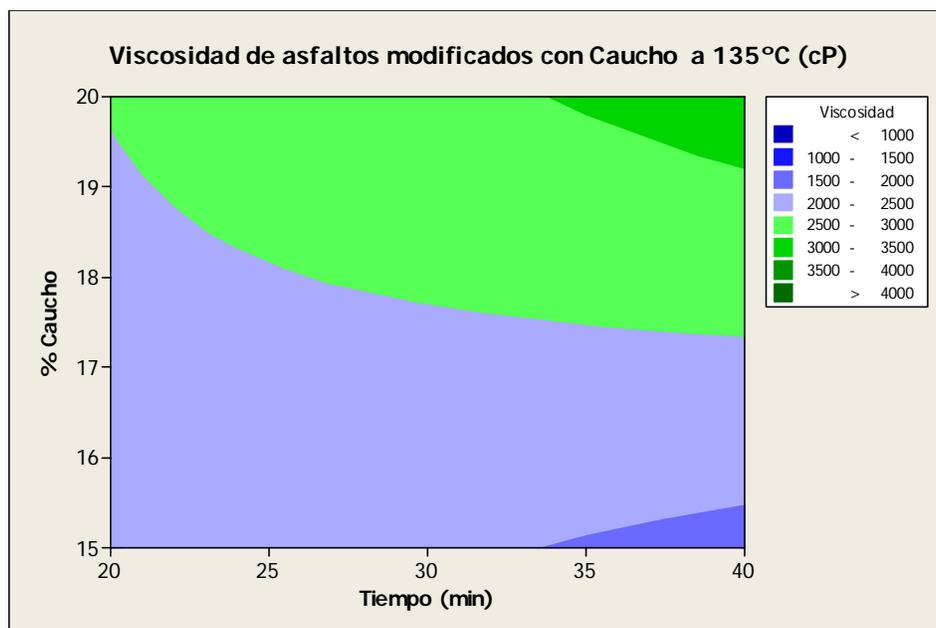
#### 5.2.4.3. Viscosidad Dinámica Brookfield.

La medición de la viscosidad se utiliza para la selección de la mezcla, el criterio utilizado es que el valor de la viscosidad debe estar en un rango de 1500-3000 cP a una temperatura de 163 ° C, según las Especificaciones típicas del Departamento de Transporte de California CALTRANS. El ensayo de viscosidad Brookfield se realiza bajo la norma ASTM D 4402-87. Para los contenidos de caucho analizados no fue posible obtener viscosidades como las estipuladas dentro del rango Caltrans. Ese rango solo fue posible alcanzarlo a una temperatura de 135°C.

**Tabla 5.8. Resultados de Viscosidad Brookfield y Penetración para asfaltos modificados con Caucho.**

<b>Muestra</b>	<b>Penetración (dmm)</b>	<b>Viscosidad (cP)</b>
<b>B1-15-20</b>	52	2000
<b>B2-15-20</b>	54	2400
<b>B3-15-20</b>	50	2417
<b>B1-20-20</b>	51	2200
<b>B2-20-20</b>	51	2200
<b>B3-20-20</b>	52	3150
<b>B1-15-40</b>	78	833
<b>B2-15-40</b>	78	2300
<b>B3-15-40</b>	78	2467
<b>B1-20-40</b>	55	2250
<b>B2-20-40</b>	55	4133
<b>B3-20-40</b>	55	3267

A partir de los datos recolectados se obtiene la superficie de contorno para la viscosidad a 135°C de los asfaltos modificados con caucho.



**Figura 5.6. Viscosidad a 135°C del asfalto caucho modificado por vía húmeda, en función del porcentaje de caucho y el tiempo de mezclado.**

De la Figura 5.10 se observa que los materiales resultantes de la combinación de los factores en los rangos bajo estudio, estarán dentro de las especificaciones de viscosidad exigidas, lo que significa que poseen una viscosidad entre 1500 y 3000 cP.

De acuerdo a la superficie de contorno se recomienda utilizar tiempos de mezcla menores a 25 minutos y con una cantidad de caucho alrededor del 18%. Bajo estas condiciones de mezclado los asfaltos tendrán viscosidades entre 2000 y 2500 cP.

### 5.2.5. Pruebas Reológicas

La caracterización reológica de la muestras se llevó a cabo con un reómetro de corte dinámico DSR bajo la norma AASHTO TP5. El reómetro aplica un esfuerzo de corte de tipo sinusoidal sobre la muestra, y se obtiene como respuesta una deformación la cual presenta la misma frecuencia aplicada, pero con distinta amplitud y con un desfase en el



tiempo. El rango de temperatura entre los cuales fueron desarrolladas estas pruebas es de 10 °C a 82 °C.

Para realizar el ensayo se calienta la muestra asfáltica hasta una temperatura en la cual sea fácilmente vertida y colocada sobre el disco inferior, o previamente elaborada en moldes de silicona con las dimensiones apropiadas. Posteriormente el disco superior baja hasta el inferior una altura determinada logrando que se comprima la muestra, quedando algo de exceso fuera de los discos. Los bordes de la muestra deben ser pulidos hasta dejarlos alineados con los discos. Por último el disco superior termina de bajar hasta una altura establecida por la norma quedando los bordes de la muestra un poco ovalados.

De acuerdo con la norma AASHTO TP5-98, para cementos asfálticos originales y residuos del RTFO se utiliza el disco de 25 mm y la separación entre discos debe ser de 1 mm. Para el residuo del PAV se debe utilizar un disco de 8 mm y separación entre discos de 2 mm.



**Figura 5.7. Ensayo de DSR, disco de 25 mm.**

Las figuras 5.11, 5.12, muestran el reómetro de corte dinámico DSR, los platos portamuestras.



De acuerdo a la metodología Superpave, en un ligante original se evalúa la relación  $G^*/\text{seno}\delta$  como parámetro de control de la deformación permanente. Este mecanismo de falla ocurre en la vida temprana del pavimento, original o no envejecido, y es más crítico a altas temperaturas. Un ligante más rígido y más elástico resistirá más la deformación permanente. El parámetro  $G^*/\text{seno}\delta$  debe ser como mínimo 1kPa para ligantes originales y 2.2 kPa para ligantes envejecidos en RTFO. Para un ligante envejecido en PAV se evalúa la relación  $G^*\text{seno}\delta$  como parámetro de control de fatiga. Este mecanismo de falla ocurre tarde en la vida del pavimento, y es más crítico a temperaturas intermedias. El parámetro  $G^*\text{seno}\delta$  debe ser como máximo 5000 kPa. Un ligante menos rígido y más elástico será más resistente a la fatiga.

#### Definición del Módulo Complejo $G^*$

$$G^* = \frac{\tau_1 - \tau_0}{\gamma_1 - \gamma_0} e^{j\theta} \quad (1)$$



**Figura 5.18. Platos Porta-muestras del DSR**

El DSR es practicado a las muestras originales, antes y después de los procesos de envejecimiento RTFO y PAV. Luego de terminada la caracterización reológica en el DSR de las muestras definidas en la tabla 5.6, los datos fueron analizados, y las temperaturas de falla fueron determinadas de acuerdo a los criterios establecidos en el protocolo Superpave. Las temperaturas de falla se muestran en la tabla 5.9 para las dosificaciones escogidas, se presentan en estado original, residuo RTFO y residuo PAV.

**Tabla 5.9. Temperatura de falla para asfaltos modificados con Caucho**

<b>Muestra</b>	<b>T Original (°C)</b>	<b>T RTFO (°C)</b>	<b>T PAV (°C)</b>
<b>B1-15-20</b>	74,6	78.65	17,4996
<b>B2-15-20</b>	71,5	66.3	16,8704
<b>B3-15-20</b>	72,2	65.25	16.7734
<b>B1-20-20</b>	73,0	68.91	15,2318
<b>B2-20-20</b>	77.7	74.42	13,3873
<b>B3-20-20</b>	77,4	72.07	17,4122
<b>B1-15-40</b>	76,4	63.52	15,5533
<b>B2-15-40</b>	78,3	67.34	16,3593
<b>B3-15-40</b>	76,9	66.45	14,1569
<b>B1-20-40</b>	79,8	62.269	13,7924
<b>B2-20-40</b>	79,8	59.147	16,8215
<b>B3-20-40</b>	80,4	63.12	16.9361

Como se indicó anteriormente la temperatura de falla del ligante de acuerdo con Superpave para el estado original y RTFOT está gobernada por el factor  $G^* / \text{seno } \delta$ , es decir por el factor de deformación permanente. Para los residuos de PAV se analiza el parámetro de control de fatiga  $G^* \text{ seno } \delta$ . El comportamiento reológico de los asfaltos modificados con caucho en estado original (antes de RTFOT) muestra cierto mejoramiento en la temperatura de falla por ahuellamiento a medida que aumenta la cantidad de caucho incorporado. Para la dosificación B1520 (15% de caucho, 20 minutos de mezclado) presenta una temperatura promedio de falla de 72°C, para un asfalto B2020 presenta una temperatura promedio de falla de 75°C (4% de incremento en temperatura). Para los asfaltos modificados en porcentajes de 15%, 20% en 40 minutos de mezclado la tendencia es análoga con valores para 15% de caucho de 77°C, y 79°C para el 20% de caucho incorporado (10% de incremento de temperatura respecto a B1520). Esta tendencia al incremento de la temperatura de falla se puede entender como el incremento en la rigidez del asfalto originado por la incorporación del grano de caucho reciclado (GCR), esto se traduce en un mejoramiento en el grado de desempeño PG.



Para el residuo RTFOT no se observa una tendencia en la variación de las temperaturas de falla, el incremento del porcentaje de caucho no se presenta como factor determinante, pero se observa en la dosificación B2020 los valores de temperaturas más altos con un promedio de 71°C, frente 65°C de temperatura de falla para B1540, 61.5°C para B2040 y 65°C para B1520.

De manera similar a las temperaturas obtenidas para el residuo RTFO, los valores obtenidos en los residuos de la prueba de envejecimiento a presión PAV no presentan ninguna tendencia entre el porcentaje de caucho adicionado y la temperatura de falla del asfalto modificado. Para todas las dosificaciones analizadas la temperatura de falla se encuentra cercana a los 15°C.

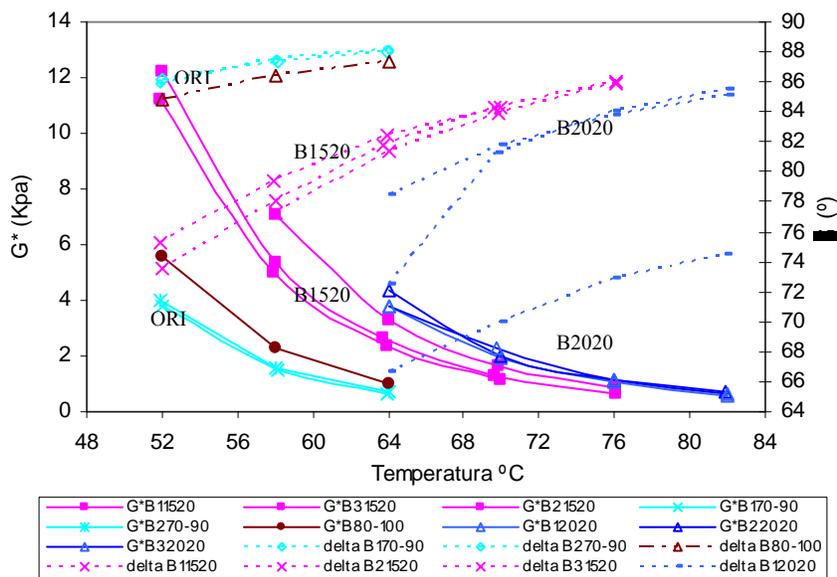
#### **5.2.5.1 Comportamiento reológico de los asfaltos en estado original (Influencia del porcentaje de caucho en comportamiento reológico del ligante)**

En las figuras que se muestran a continuación se presentan gráficamente la dependencia del módulo de corte complejo, el ángulo  $\delta$  de desfase con la temperatura. Estos factores ofrecen información acerca del comportamiento reológico del ligante.

En la Figura 5.13 se muestra el comportamiento reológico de los ligantes de Barranca con penetración 70-90 y 80-100. Adicionalmente se presentan los asfaltos de Barranca 70-90 modificados con GCR en las siguientes dosificaciones:

B 1520: Barranca 70-90 con 15% de GCR mezclado durante 20 minutos.

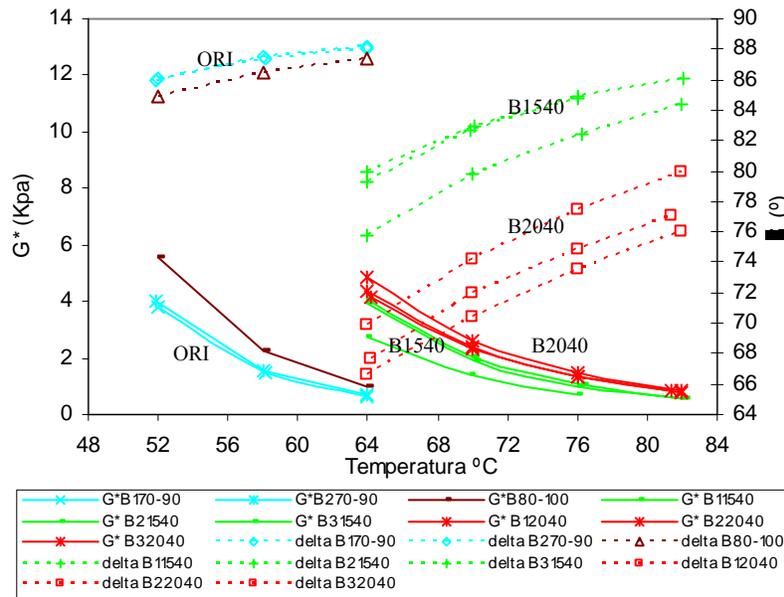
B 2020: Barranca 70-90 con 20% de GCR mezclado durante 20 minutos.



**Figura 5.139. Influencia del porcentaje de caucho en el comportamiento reológico del ligante, 20 minutos de mezclado.**

La figura 5.13 muestra el efecto del incremento en el porcentaje de caucho en el ligante utilizando el mismo tiempo de mezclado. Como es de esperar los ligantes en estado original no modificados presentan los menores módulos complejos, la rigidez se va incrementando al incorporar el GCR, es claro que para el mismo tiempo de mezclado los ligantes con el 20% de caucho presentan la mayor rigidez. Los ángulos de desfase también dan cuenta de la mayor rigidez que ofrece el caucho al ser incorporado dentro del ligante.

Para los ligantes modificados durante 40 minutos de mezclado (Figura 5.14), la influencia del contenido de caucho se mantiene, los ligantes con el 20% de caucho presentan mayores módulos que los ligantes con el 15%, sin embargo la diferencia es mínima al analizar los módulos en relación con el porcentaje de 15%. La diferencia es más notable al analizar los valores de los ángulos de desfase para los ligantes B1540 (B11540, B21540, B31540) presentan valores entre 82 y 85° a 76°C frente a valores entre 73 y 78° a la misma temperatura para los ligante B2040 (B12040, B22040, B32040), indicando esta diferencia un comportamiento más elástico para los ligantes con el 20% de caucho incorporado.



**Figura 5.14. Influencia del porcentaje de caucho en el comportamiento reológico del ligante, 40 minutos de mezclado.**

5.2.5.2. Influencia del tiempo de mezclado en el comportamiento reológico

En la figura 5.15 se muestra la caracterización reológica de los ligantes con el 15% de caucho adicionado para tiempos de mezclado de 20 y 40 minutos. Se observa que con el aumento del tiempo de mezclado para el mismo porcentaje de caucho adicionado los módulos complejos se incrementan en relación con los ligantes no modificados. Los módulos para los ligantes B1540 alcanzan valores a 64°C de 4 Kpa, para B1520 a la misma temperatura se observan valores en promedio de 2.5 Kpa. Los asfaltos B7090 y B80100 para esta temperatura presentan valores inferiores a 1 Kpa (0.68 Kpa para B7090, 0.99 Kpa para B80100). Los resultados mencionados dan clara muestra de la influencia del tiempo de mezclado en el cambio de propiedades de los ligantes modificados.

La Figura 5.16 muestra el comportamiento reológico de los asfaltos con el 20% de caucho adicionado para los tiempos de mezclado de 20 y 40 minutos. Se observa en la figura que el tiempo de mezclado influye de manera significativa, dado que al igual que con el porcentaje del 15% se alcanzan mayores módulos a mayor tiempo de mezclado. De la misma manera se puede precisar que los módulos alcanzados para los asfaltos con el 20%



de caucho y 40 minutos de mezclado superan los módulos de todas las dosificaciones experimentadas, ubicándose esta dosificación como la mejor en cuanto a incremento de rigidez y resistencia al ahuellamiento.

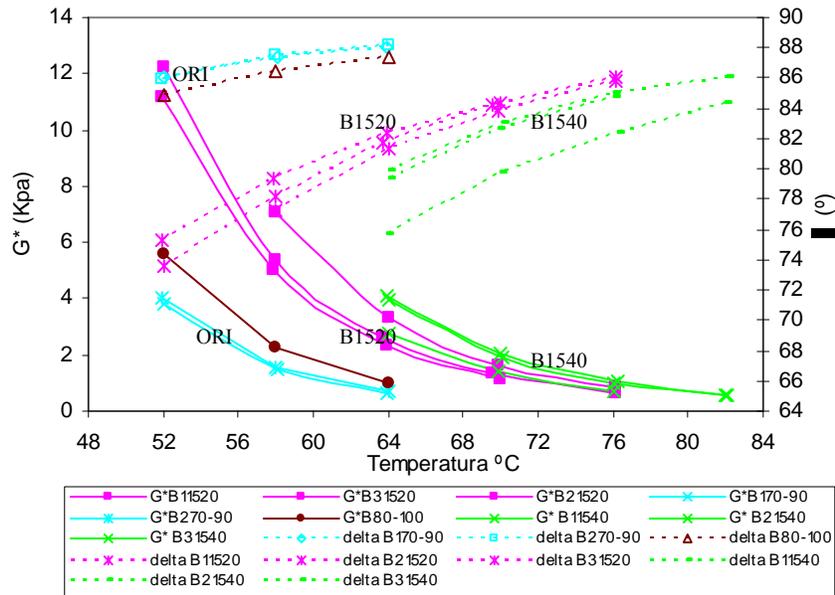


Figura 5.10. Influencia del tiempo de mezclado en comportamiento reológico del ligante, 15% de caucho adicionado.

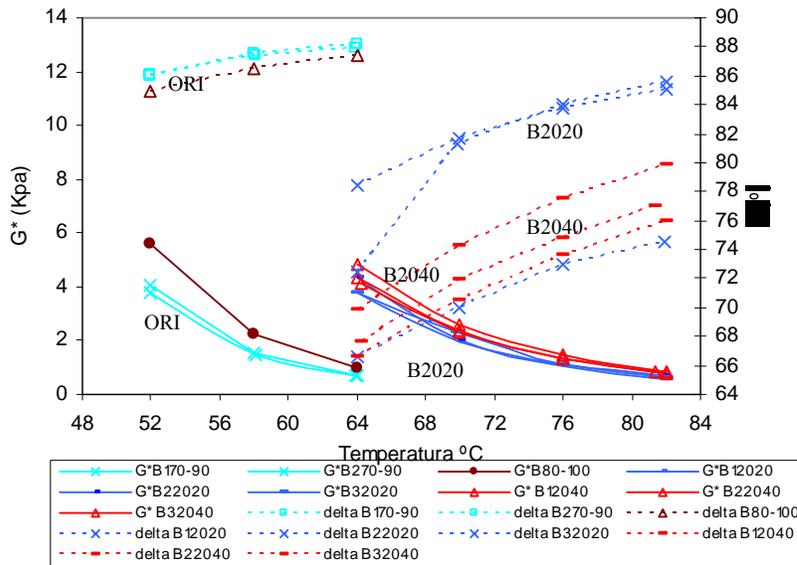
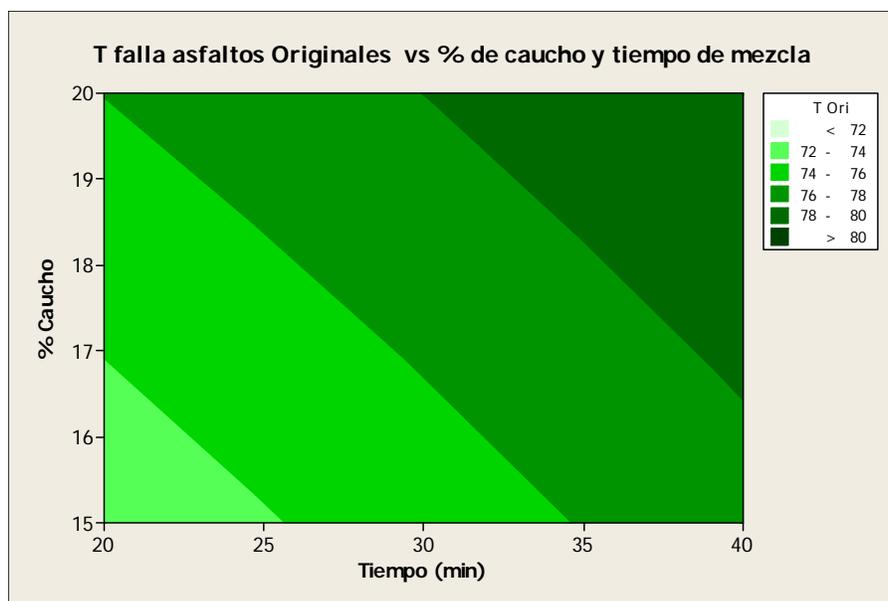


Figura 5.16. Influencia del tiempo de mezclado en el comportamiento reológico del ligante, 20% de caucho adicionado.



En general, la temperatura de falla por ahuellamiento en los asfaltos sin envejecimiento se ve afectada de manera proporcional a la cantidad de modificador y al tiempo de mezclado. El efecto más importante es causado por el tiempo de mezclado, de esta manera las temperaturas de falla mayores se obtienen hacia los 40 minutos de mezclado al utilizar altos porcentajes de caucho.

La figura 5.17 muestra una superficie de contorno que caracteriza esta temperatura.



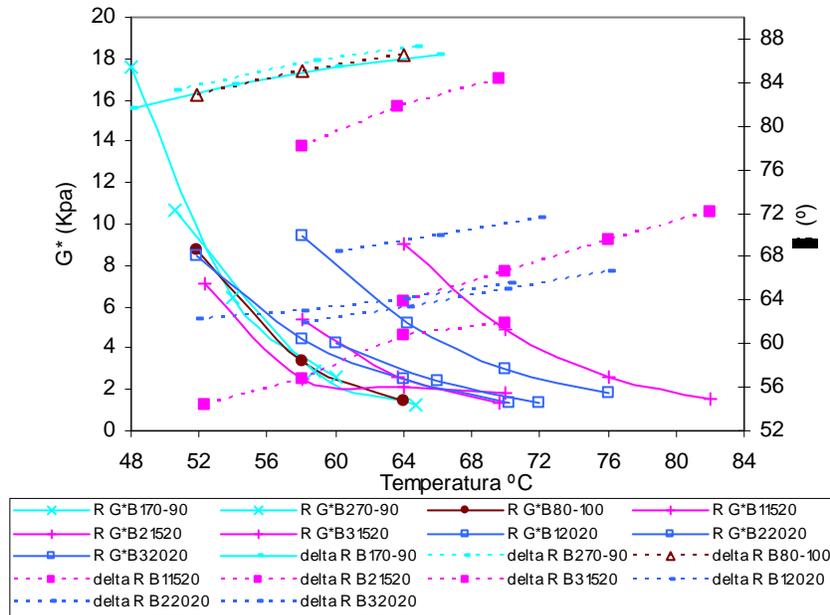
**Figura 5.17 Gráfica de Contorno para la temperatura de falla de los asfaltos modificados con caucho sin envejecimiento.**

### 5.2.5.3. Comportamiento reológico de los residuos después de horno rotatorio de película delgada RTFO.

Luego de haber caracterizado reológicamente los ligantes en estado original, se procedió a envejecer todas las dosificaciones en el horno RTFO, y sobre el residuo realizar nuevamente una caracterización reológica en el reómetro de corte dinámico (DSR). Las condiciones de operación del DSR fueron; barrido de temperatura hasta la falla, a frecuencia constante de 10 rad/seg.

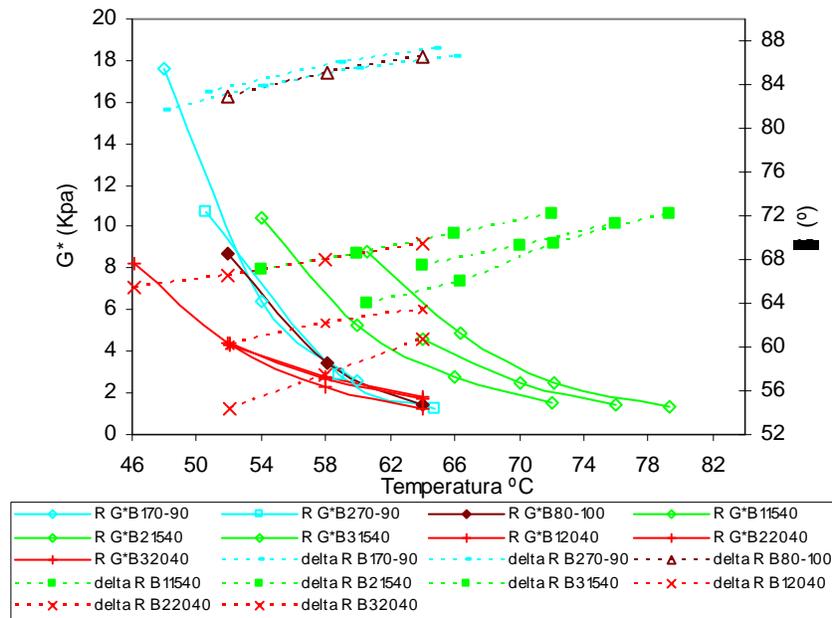


La Figura 5.18 muestra el comportamiento de muestras con tiempo de mezclado de 20 minutos y porcentajes de 15 y 20% de caucho adicionado. Se observa en la figura comportamientos dispersos para las muestras y sus replicas, por lo que no es posible identificar una tendencia hacia la rigidización o el ablandamiento de las muestras en función del contenido de caucho adicionado.



**Figura 5.18. Influencia del porcentaje de caucho en el comportamiento reológico del ligante, 20 minutos de mezclado.**

La Figura 5.19 muestra el comportamiento de muestras con tiempo de mezclado de 40 minutos y porcentajes de 15 y 20% de caucho adicionado. En la figura se observa que a pesar que existe algo de dispersión entre las muestras de una misma dosificación, se alcanza a identificar que la dosificación del 15% de caucho y el tiempo de mezclado analizado experimentan mayores módulos que los mostrados por el porcentaje de 20%, mostrando un comportamiento similar al de los asfaltos no modificados. Este comportamiento es diferente al analizar los ángulos de desfase, pues los ángulos para el contenido de 20% son menores que para el porcentaje de 15%, tendiendo de esta manera a un comportamiento más elástico.



**Figura 5.19. Influencia del porcentaje de caucho en el comportamiento reológico del ligante, 40 minutos de mezclado.**

**Influencia del tiempo de mezclado en el comportamiento reológico**

En la Figura 5.20 se agrupa el comportamiento reológico de las muestras con el 15% de adición de caucho y tiempos de mezclado de 20 y 40 minutos. La dispersión en los resultados se mantiene, pero al igual que los casos analizados anteriormente para el tiempo de mezclado de 40 minutos se observa que los ligantes presentan mayores módulos, contrario a los ligantes modificados durante 20 minutos cuyo comportamiento se confunde con los ligantes no modificados. Para los ángulos de desfase se observa que los menores ángulos se presentan en los ligante modificados durante 20 minutos de mezclado la diferencia en los ángulos de desfase entre ambos tiempos de mezclado es de 5° aproximadamente.

Al analizar la influencia en el porcentaje de 20% de caucho con tiempos de mezclado de 20 y 40 minutos, se observa una reacción contraria respecto al tiempo de mezclado (Figura 5.20), los módulos para el tiempo de 20 minutos son mayores a los observados con el tiempo de mezclado de 40 minutos. El comportamiento de los módulos de corte con el barrido de temperaturas es muy parecido al de los ligantes no modificados. Los ángulos de



fase se encuentran en rangos similares para ambos tiempos de mezclado, pero bastantes diferentes a los ángulos de fase de los ligantes no modificados.

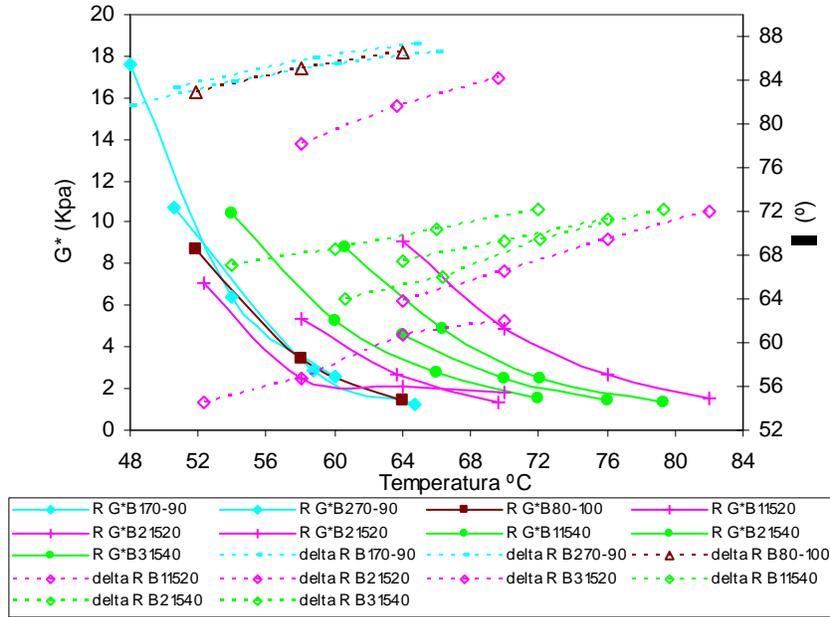


Figura 5.11. Influencia del tiempo de mezclado en el comportamiento reológico del ligante, 15% de caucho adicionado.

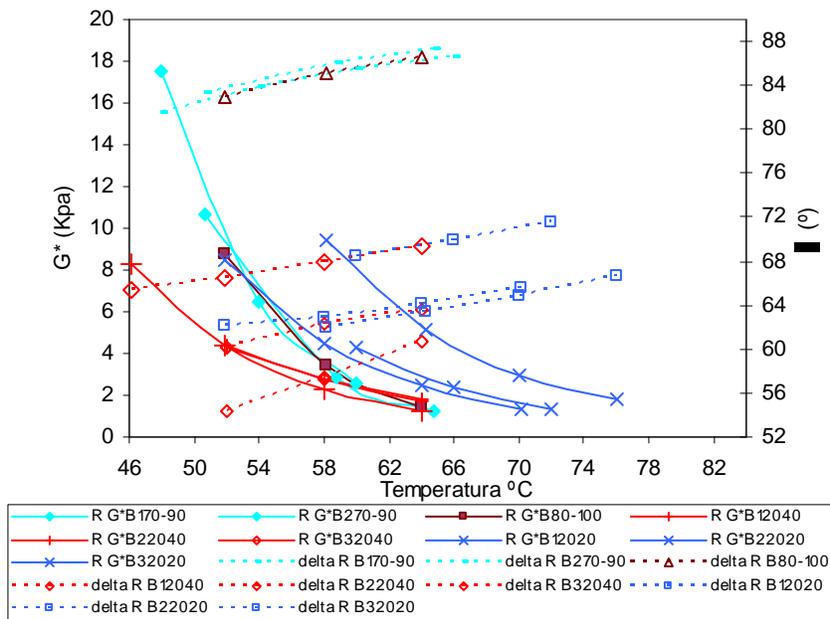
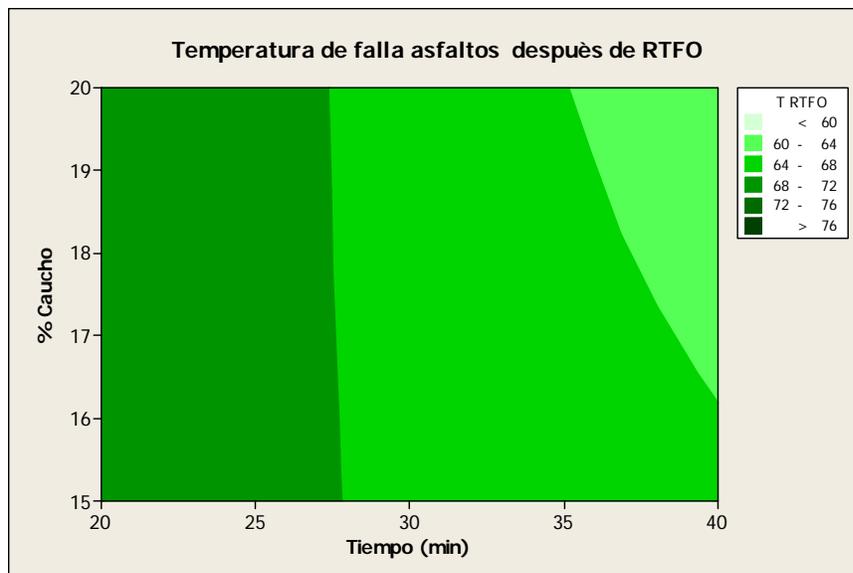


Figura 5.21. Influencia del tiempo de mezclado en el comportamiento reológico del ligante, 20% de caucho adicionado.



En general se encuentra que la temperatura de falla de los asfaltos después de RTFO se ve afectada de manera importante por el tiempo de mezclado, de manera tal que para tener temperaturas mayores de falla se prefieren tiempos de mezclado bajos con porcentajes de caucho alrededor del 20%.



**Figura 5.22. Superficie de Contorno para la temperatura de falla de asfaltos modificados con caucho, después de un proceso de envejecimiento RTFO.**

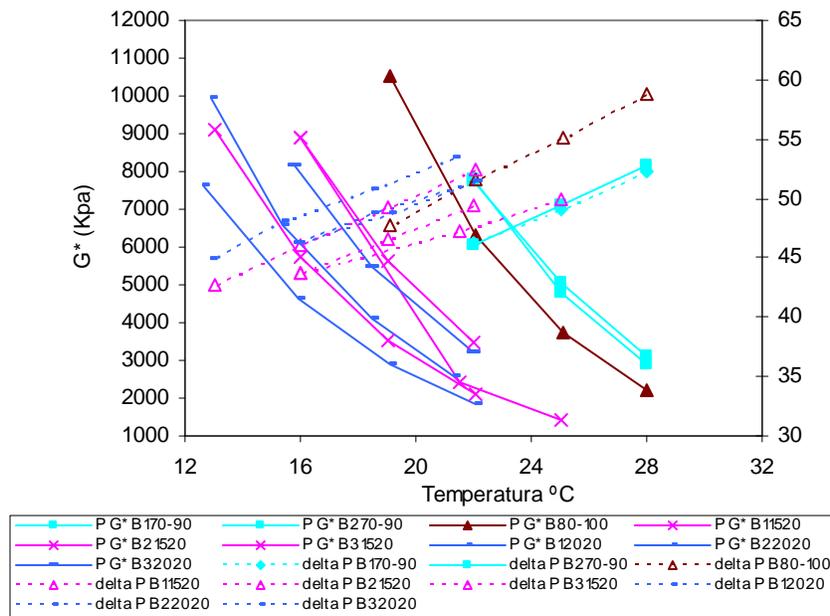
5.2.5.4. Comportamiento reológico de los residuos después de horno rotatorio de película delgada RTFO y envejecidos en cámara de envejecimiento a presión PAV.

El paso siguiente al análisis reológico de los residuos de RTFO, fue analizar en el DSR el residuo RTFOT+PAV. Con la prueba PAV se trata de determinar el desempeño del ligante a largo plazo, esto es varios años después de haber colocado el ligante en servicio. Cuando se analiza la reología de un ligante sometido a RTFOT+PAV el factor más importante a analizar es el factor de fisuración por fatiga  $G^* \text{ sen } \delta$  el cual debe ser inferior a 5000 Kpa.

Los módulos obtenidos luego de la caracterización reológica de residuos PAV son un indicativo de que tan susceptible es el ligante al agrietamiento por fatiga. Ligantes con módulos elevados serán más susceptibles a la fisuración por fatiga que ligantes con módulos moderados o inferiores.



Como se observa en los resultados obtenidos en la caracterización reológica (Figuras 5.21, 5.22, 5.23, 5.24), el caucho al ser adicionado a un ligante original mejora la resistencia a la fatiga, esto se puede deducir de los mayores módulos que presentan los ligantes sin modificación, situación que se observa también en los valores de los ángulos de desfase de los ligantes sin modificar. El GCR al ser incorporado al asfalto de Barranca disminuye el endurecimiento a largo plazo en más de un 50% para temperaturas de 22°C. En general en cuanto al comportamiento de los módulos no se observa mayor diferencia, contrario a los ángulos de desfase en los que alcanzan a diferenciar tendencias algo débiles. En la Figura 5.23 se muestran los ligantes modificados con un tiempo de mezclado de 20 minutos y porcentajes de 15 y 20%. Los ángulos de desfase para los asfaltos con el 15% de caucho presentan valores inferiores a los ligantes con el 20%; lo que indica que los ligantes con el 20% presentan menos rigidez y por lo tanto menor riesgo a la fisuración por fatiga.

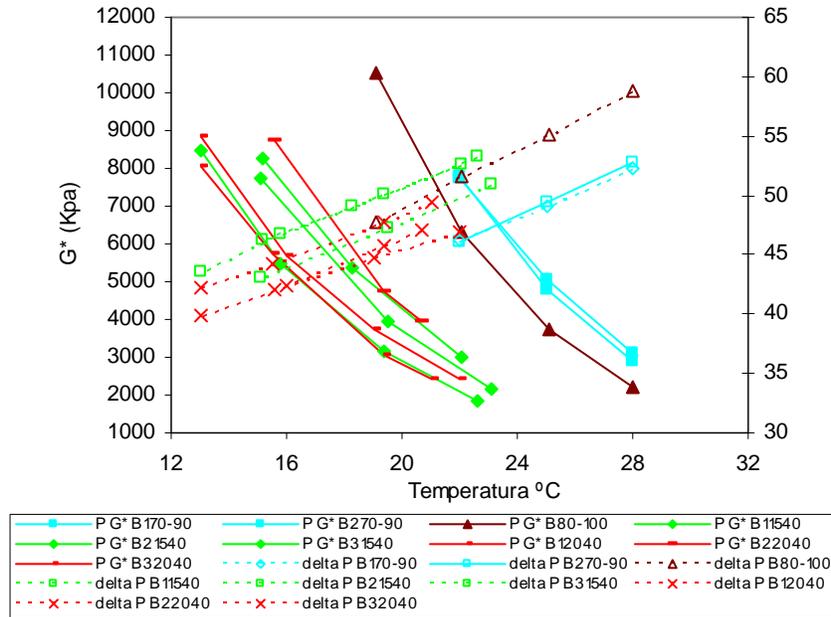


**Figura 5.12. Influencia del porcentaje de caucho en el comportamiento reológico del ligante, 20 minutos de mezclado.**

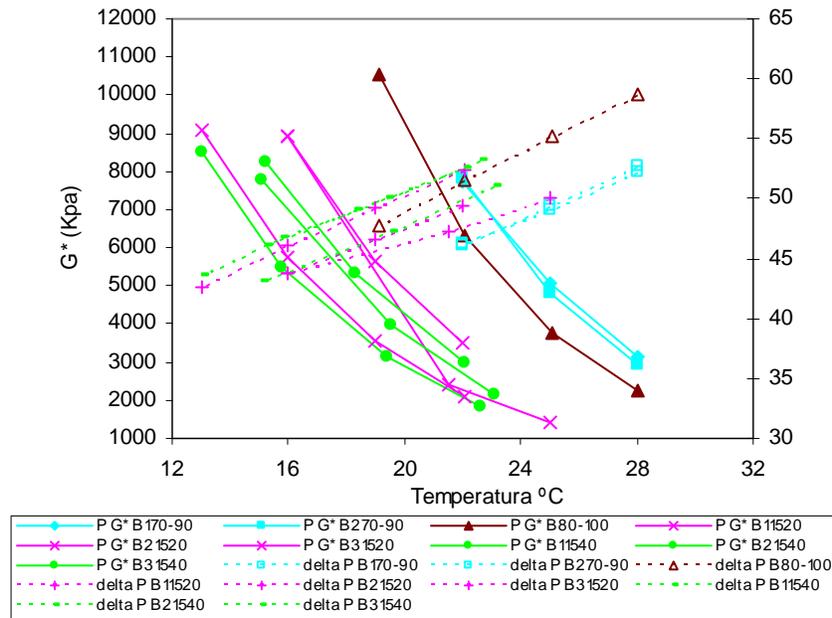
La Figura 5.24 muestra la influencia del porcentaje de caucho para un tiempo de mezclado de 40 minutos. Los mayores ángulos de desfase se observan en los ligantes con el 15% de



caucho indicando un comportamiento más viscoso que el obtenido del ligante con el 20% de caucho. En la Figura 5.25 se presenta para un porcentaje fijo de 15% de caucho, tiempos de mezclado de 20 y 40 minutos, en esta ilustración el ligante de combinación 15% de caucho y 40 minutos de mezclado se comporta como el más viscoso o el menos envejecido.

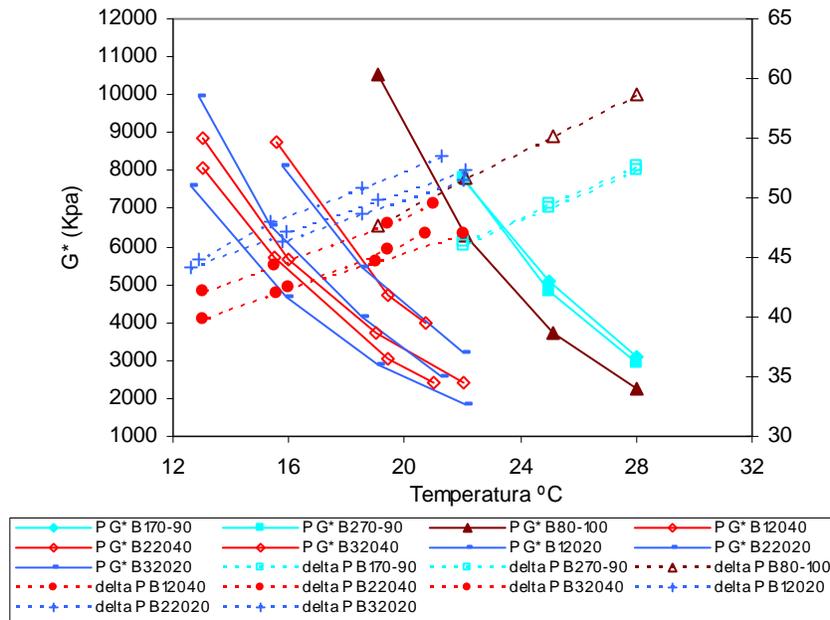


**Figura 5.13. Influencia del porcentaje de caucho en el comportamiento reológico del ligante, 40 minutos de mezclado.**



**Figura 5.25. Influencia del tiempo de mezclado en el comportamiento reológico del ligante, 15% de caucho adicionado.**

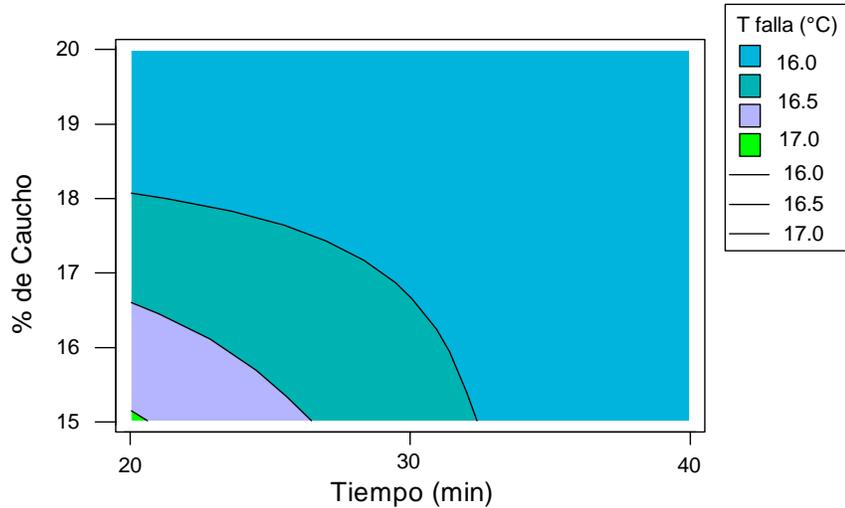
La Figura 5.26 muestra la influencia del tiempo de mezclado para ligantes modificados con el 20% de caucho, en esta se observa una clara tendencia del ligante con el tiempo de mezclado de 20 minutos a presentar ángulos de desfases altos, indicativo de menor afectación del envejecimiento a largo plazo en relación con el ligante con tiempo de mezclado de 40 minutos.



**Figura 5.14. Influencia del tiempo de mezclado en el comportamiento reológico del ligante, 20% de caucho adicionado.**

La gráfica de contorno correspondiente a la temperatura de falla para asfaltos con envejecimiento PAV se muestra a continuación (Figura 5.27).

### Temperatura de falla PAV



**Figura 5.15. Superficie de contorno de temperaturas de falla, porcentaje de caucho y tiempo de mezclado.**



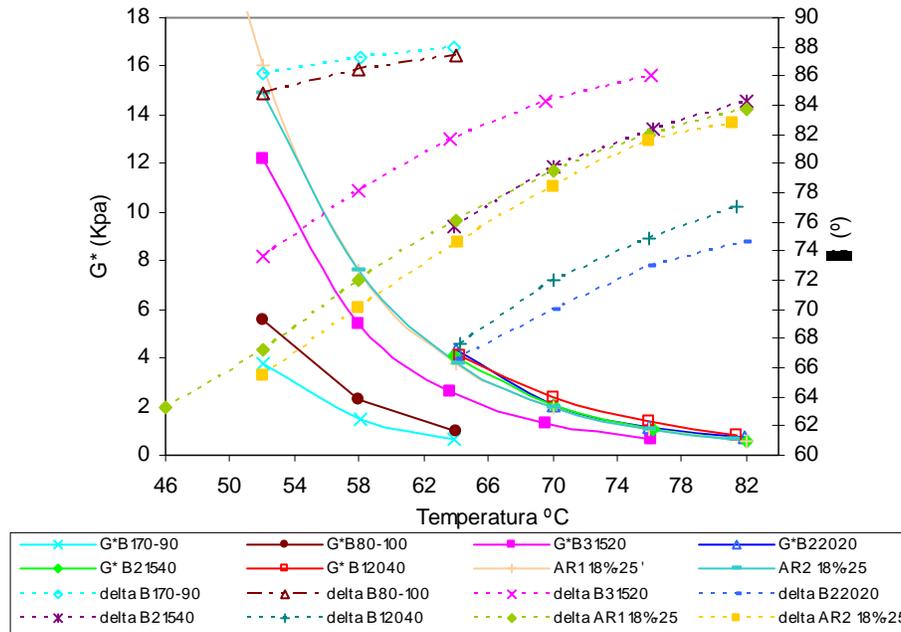
De acuerdo a los resultados expuestos anteriormente se podría hacer una selección de la formulación más adecuada para la aplicación en la pista de prueba.

La dosificación de caucho recomendada para obtener un comportamiento más elástico y que presente temperaturas de falla mayores se encuentra alrededor del 18% con un tiempo de mezclado de 25 minutos.

Con la información analizada hasta el momento y bajo estas condiciones expuestas anteriormente se obtendría una viscosidad entre 2000 y 2500 cP y unas temperaturas de falla entre 74 - 76 °C y 68-72 °C para asfaltos originales y envejecidos con RTFO respectivamente. Para asfaltos con envejecimiento PAV la temperatura de falla se encuentra entre los 16 -16.5 °C.

Para llevar a cabo este paralelo se utilizó la réplica de cada muestra que presentara un comportamiento promedio. De esta manera para asfaltos Barranca 70/90 se escogió Barranca 1(B17090). Los asfaltos modificados con caucho fueron representados por las muestras “B31520”, “B21540”, “(B22020)” y ”B12040”. A continuación se presentan las gráficas correspondientes para los asfaltos sin envejecimiento (Figura 5.28).

Con la dosificación escogida de 18% de caucho incorporado y 25 minutos de mezclado se produjeron dos replicas y se evaluaron sus propiedades reológicas. El comparativo se muestra en la Figura 5.28. En la figura se alcanza a observar el comportamiento reológico con la nueva dosificación (18% de caucho y 25 minutos de mezclado), comportamiento que no varia mucho en cuanto a módulos y es confundible con las muestras B22020, B21540 y B12040. Los ángulos de desfase de los ligantes AR18%25' (AR-asphalt rubber) muestran un comportamiento menos elástico que el experimentado por las muestras B12040 y B22020, y cercano al de la muestra B21540.



**Figura 5.16. Comparación de desempeño de ligantes modificados con caucho sin envejecimiento.**

### 5.3. Caracterización reológica de los asfaltos comerciales modificados con polímero Estireno Butadieno Estireno- SBS, y polímero Estireno Butadieno Rubber-SBR.

Los polímeros escogidos para comparar con el asfalto caucho escogidos fueron:

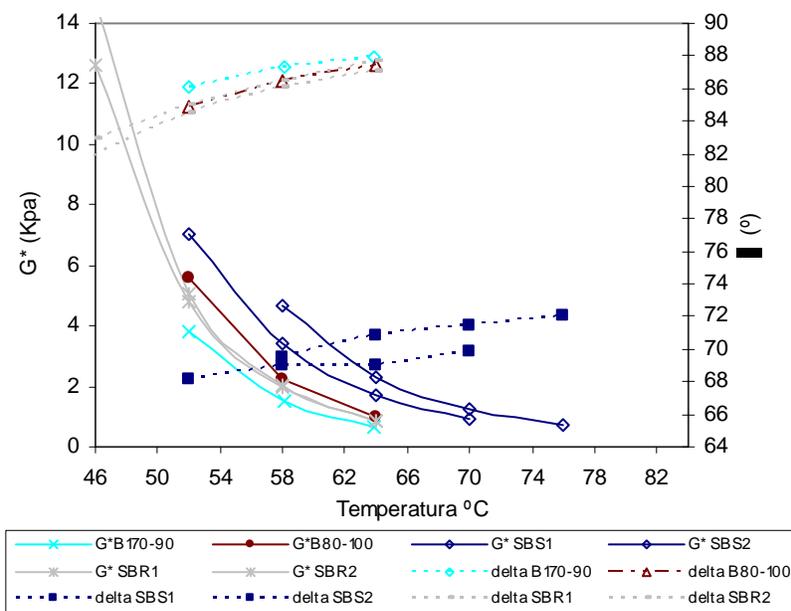
- SBR
- SBS

Estos polímeros se encuentran clasificados dentro del grupo de los elastómeros, cuentan con la propiedad de recuperar su forma inicial después de deformarse, y presentar un buen desempeño aun a bajas temperaturas.

El ligante modificado con SBS presenta una mayor resistencia al ahuellamiento, característica que se evidencia con los ángulos de desfase menores y los mayores módulos presentados. Para 58°C las replicas con SBS presentan módulos de 3.4 y 4.6 Kpa(Figura



5.29), en tanto que las replicas con polimeros SBR presentan módulos de 2 Kpa. Los ángulos de desfase a 58°C para los ligantes con SBS presentan valores de 68 y 69°, en contraste con los ángulos de los ligantes modificados con SBS con valores de 86°, valores cercanos a los presentados por los asfalto de Barranca 70-90 y 80-100.



**Figura 5.29. Comparación de desempeño de ligantes comerciales modificados con polímeros SBR y SBS sin envejecimiento.**

En la figura 5.30 se presenta la caracterización reológica de los ligantes modificados luego del envejecimiento en horno de película delgada rotatorio RTFO. Los resultados mantienen al ligante con polímero SBS como el de mejor desempeño en cuanto a resistencia al ahuellamiento característica evidenciada con los mayores módulos complejos y los menores ángulos de desfase. Los ángulos de desfase en el ligante con polímero SBR presentan una disminución de 4° en promedio, en relación con los presentados antes del envejecimiento.

Los residuos RTFO+PAV muestran que el ligante con SBS presenta la menor susceptibilidad al envejecimiento a largo plazo. El ligante con SBR presenta un comportamiento similar al de los ligante no modificados en cuanto a módulos de corte. Al



analizar los ángulos de desfase el ligante con SBR presenta los menores ángulos de desfase evidenciando esto un mayor envejecimiento a largo plazo.

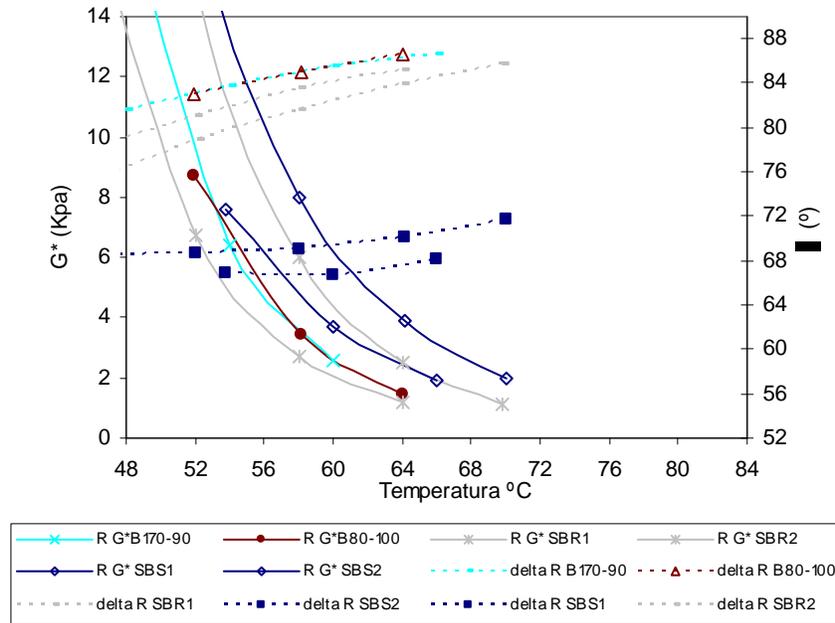


Figura 5.17. Comparación de desempeño de ligantes comerciales modificados con polímeros SBR y SBS envejecidos en RTFO.

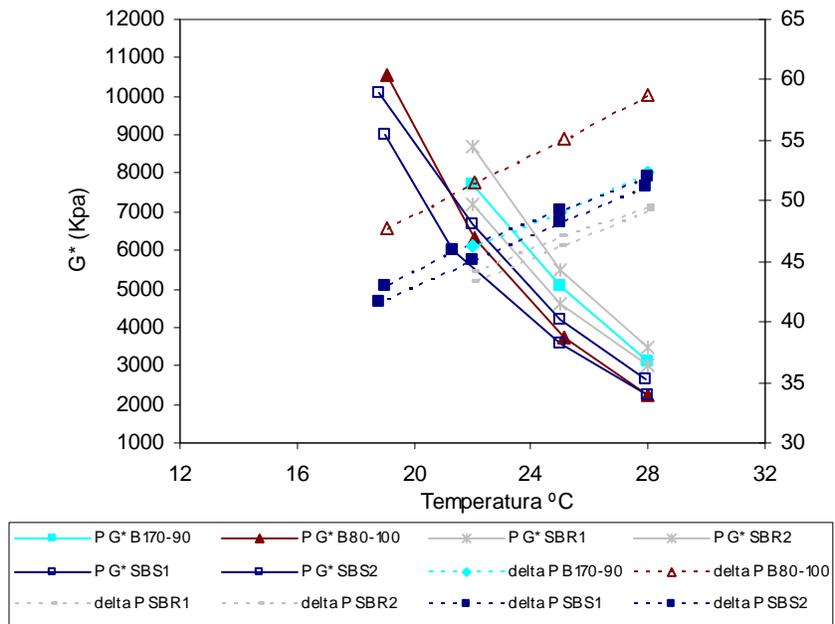


Figura 5.31. Comparación de desempeño de ligantes comerciales modificados con polímeros SBR y SBS envejecidos en PAV.



#### **5.4. Desempeño del asfalto caucho frente a otros modificadores.**

Para evaluar el desempeño del asfalto caucho con dosificación 18% de caucho y 25 minutos de mezclado, los resultados de la caracterización reológica del asfalto caucho sin envejecimiento fueron comparados con los resultados obtenidos de la caracterización de los asfaltos comerciales modificados con polímeros estireno butadieno estireno-SBS, y estireno butadieno rubber-SBR, de igual manera se analizaron los comportamientos reológicos luego de RTFO y PAV. Se muestra en la Figura 5.32 la caracterización reológica de los ligantes en referencia sin envejecimiento. El asfalto caucho se comporta como el ligante de mayor módulo y presenta la mejor susceptibilidad térmica en relación con los ligantes SBS y SBR. Para 58 °C el asfalto caucho presenta un módulo de corte de 7.6 Kpa, seguido por el SBS con 3.39 Kpa, y SBR con 1.95 Kpa. Los ángulos de desfase indicadores del comportamiento elástico del material muestran que para 52° C el asfalto caucho AR18%25' presenta un menor ángulo que el experimentado por el ligante con SBS, pero con el incremento de la temperatura, el ligante con polímero SBS no se ve afectado, en tanto que el asfalto caucho aumenta sustancialmente con el incremento de la temperatura.

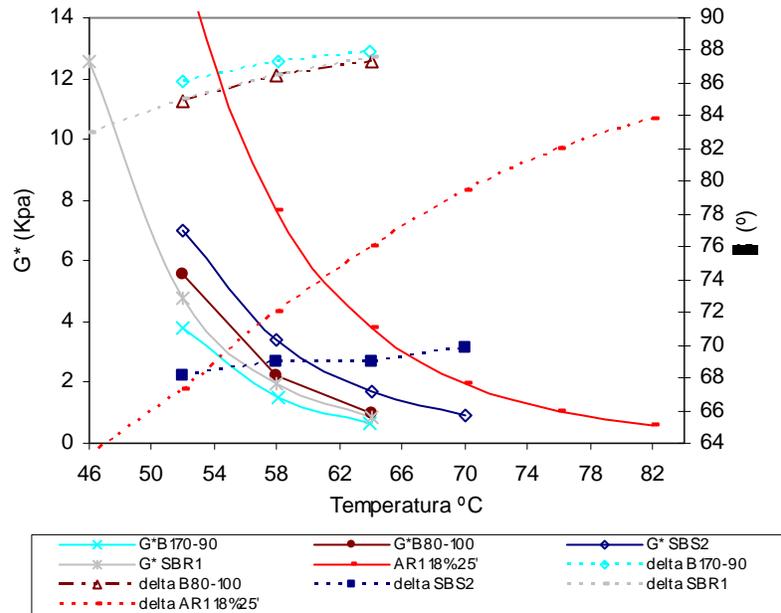


Figura 5.32. Comparación de desempeño de ligantes comerciales modificados con polímeros SBR y SBS vs asfalto caucho sin envejecimiento.

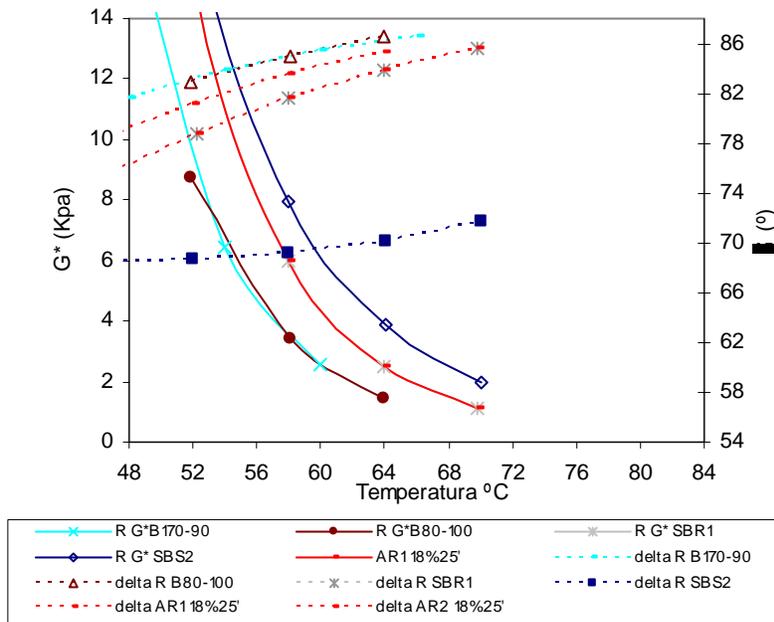
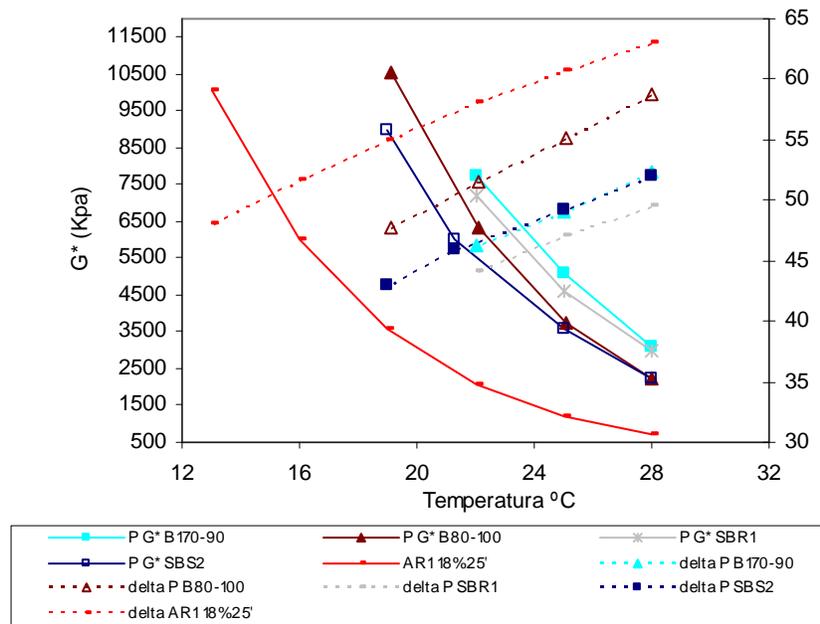


Figura 5.18. Comparación de desempeño de ligantes comerciales modificados con polímeros SBR y SBS envejecidos en RTFO.



### 5.4.1. Envejecimiento en horno de presión PAV

El comportamiento luego de envejecer los ligantes a través de RTFO y en PAV es mostrado en la figura 5.34. Se observa que el ligante de Barranca 70-90 presenta los módulos más altos, y en orden descendente se presentan SBR, Barranca 80-100, SBS y asfalto caucho. Este orden está indicando que los asfaltos menos envejecidos fueron el AR18% 25' y el ligante modificado con SBS. Los ángulos de desfase muestran que el asfalto-caucho luego del envejecimiento a largo plazo (PAV) posee las características más viscosas en relación con los ligantes evaluados. Es de destacar que el ligante con polímero SBR muestra un comportamiento similar al de los ligantes modificados.



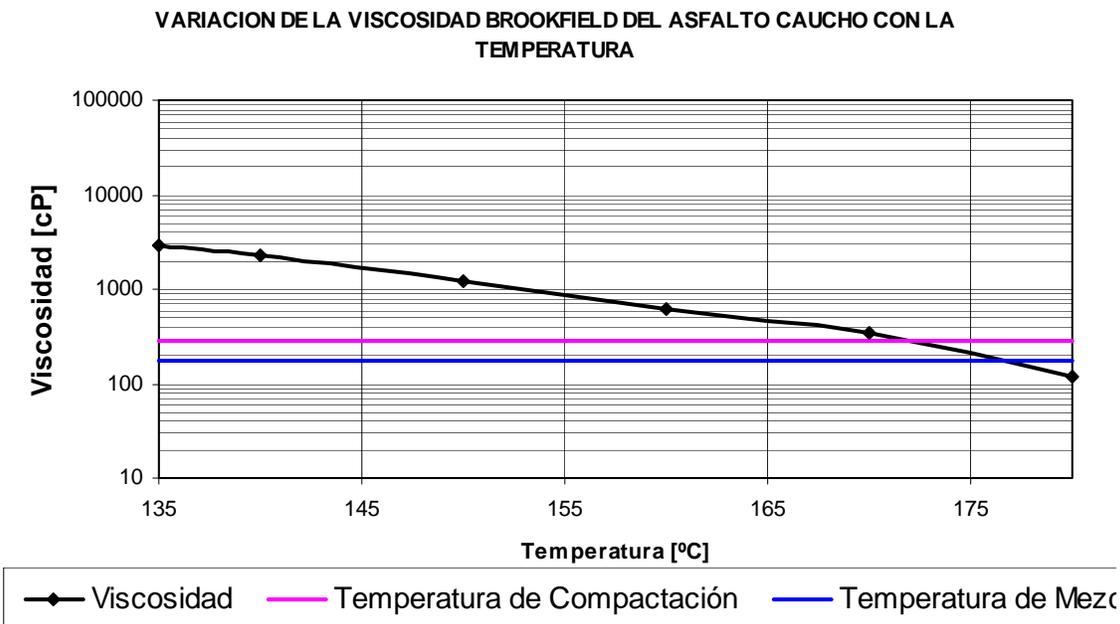
**Figura 5.19. Comparación de desempeño de ligantes comerciales modificados con polímeros SBR y SBS envejecidos en PAV.**

### 5.4.2. Curva Reológica del Asfalto Caucho

Como parte de la caracterización física del asfalto caucho seleccionado y como etapa preliminar de los diseños de mezclas asfáltica, se llevo a cabo la medida de la curva reológica o de viscosidad Brookfield. Con base a estos datos se pueden encontrar las temperaturas de mezcla y de compactación.



A continuación se presenta la curva de viscosidad Brookfield característica de este material.



**Figura 5.35. Curva Reológica del Asfalto Caucho**

La temperatura de mezcla corresponde a una viscosidad del asfalto de 170 cP y la temperatura de compactación corresponde a una viscosidad de 290 cP.

De acuerdo con las viscosidades Brookfield las temperaturas de mezcla y de compactación son 178,5°C y 171.9° C respectivamente.

La ficha técnica del asfalto caucho modificado por vía húmeda se presenta a continuación:

**Tabla 5.10. Hoja técnica del asfalto modificado con caucho por vía húmeda**

ENSAYO	MÉTODO	RESULTADO
Penetración, 25°C, 5s, 100g (dmm)	ASTM D5	90
Punto de Ablandamiento (°C)	ASTM D-36	52
Ductilidad, 5°C, 5cm/min (cm)	ASTM D-113	25
Punto de Ignición (°C)	INVIAS 709	300
Punto de Llama (°C)	INVIAS 709	338
Viscosidad a 135 °C (cP)	ASTMD 4402-87	2917
Temperatura de Mezcla (°C)	ASTM D-1559	179
Temperatura de Compactación (°C)	ASTM D-1559	172
ENSAYO DE ENVEJECIMIENTO RTFO (Norma AASHTO T 240)		
Pérdida de Masa (%)	ASTM D 2872	0.068
Penetración al residuo, 25°C, 5s, 100g (dmm)	ASTM D5	70



## 6. Diseño de las mezclas Asfálticas

En este capítulo se describe el procedimiento utilizado para el diseño de mezclas con ligantes estudiados. Para el diseño de mezclas se utilizó como referencia la norma RSV 2002, esta norma involucra análisis del contenido de vacíos, módulos dinámicos y peso específico Bulk.

En total se elaboraron 8 diseños de mezcla con granulometría tipo IDU 0/14 como se mencionan a continuación:

- Mezcla con ligante Barranca 70/90.
- Mezcla con ligante Barranca 80/100.
- Mezcla con ligante Barranca 70/90 modificado con GCR proceso húmedo.
- Mezcla con ligante Barranca 80/100 modificado con GCR proceso húmedo.
- Mezcla con ligante Barranca 80/100 modificada con GCR proceso seco.
- Mezcla con ligante modificado con polímero SBR.
- Mezcla con ligante modificado con polímero SBS.
- Mezcla con ligante Apiay 60/70 modificado con GCR proceso húmedo.

### 6.1. Agregados

Para la elaboración y diseños de las mezclas asfálticas se escogieron agregados de amplia utilización en el medio, esto con el fin de obtener mezclas representativas de las fuentes de materiales de la región y de la práctica cotidiana de la construcción de vías.

Se utilizaron Agregados de peña, en este caso de la cantera Vista Hermosa, y arena de procedencia aluvial, arena del Guamo.

**Tabla 6.1. Agregados utilizados**

	Pétreos		Arena	
Cantera	Vista Hermosa	Vista Hermosa	Vista Hermosa	Guamo
Tamaño	1/2"	3/8"	arena	arena
origen	Peña	Peña	Peña	Río

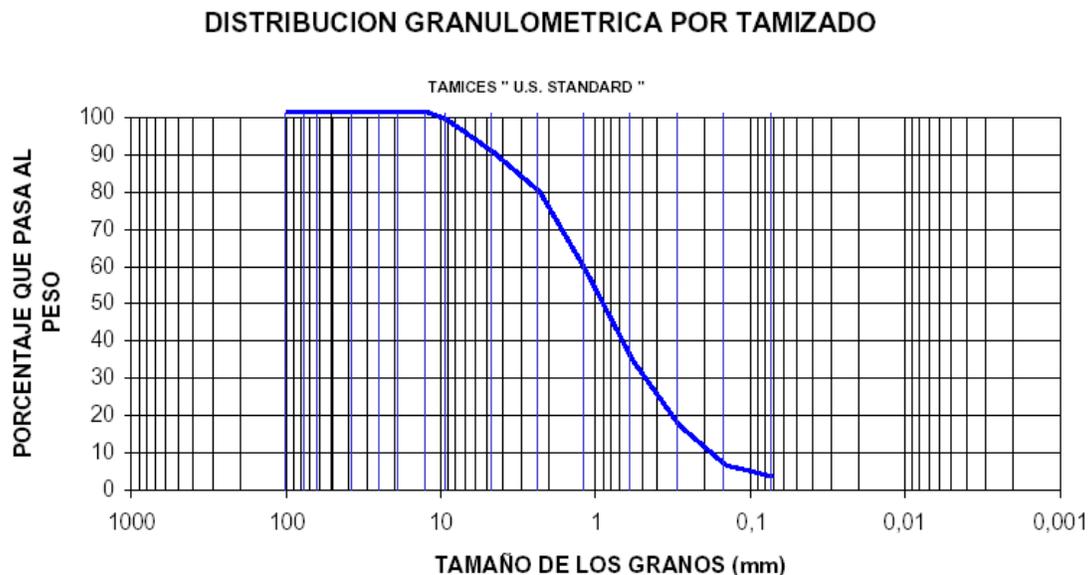


### 6.1.1. Granulometría de los agregados

La granulometría está definida como la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico, el cual consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría.<sup>4</sup> A continuación se presenta el resultado del análisis granulométrico y la respectiva curva granulométrica. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma NTC 77.

#### 6.1.1.1. Arena de guamo

Como se indicó anteriormente la arena de guamo es un agregado de procedencia aluvial, la granulometría es presentada en la figura 8.1., esta presentó un porcentaje pasa 200 de 2.27%, un módulo de finura general de 3.22%, y un módulo de finura de arenas de 3.2%. Módulos superiores a 3 son característicos de arenas gruesas.



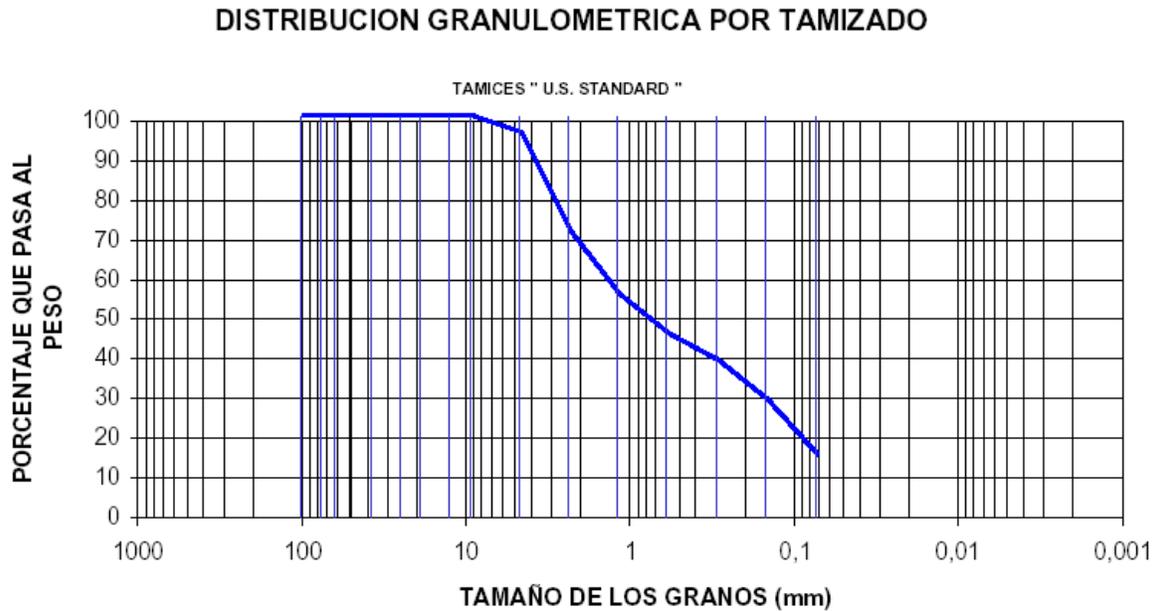
**Figura 6.1. Distribución granulométrica arena de guamo.**

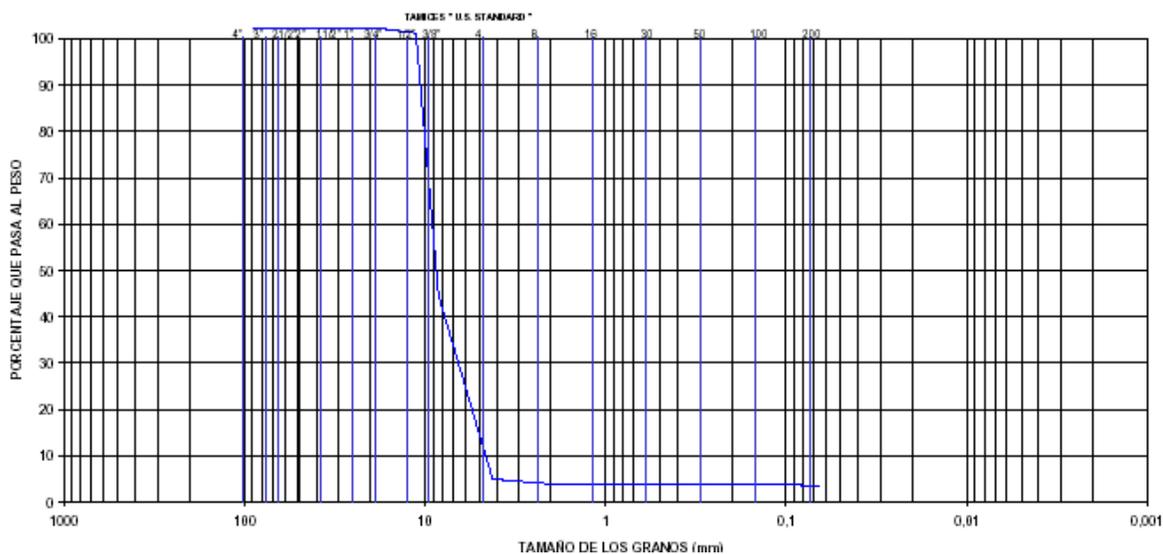
#### 6.1.1.2. Arena de trituración Vista Hermosa

<sup>4</sup> SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Op. Cit., p. 72.



La distribución granulométrica de la arena de vista hermosa se muestra en la figura 6.2, esta arena presentó un porcentaje pasa 200 de 14.48%, módulo de finura de 2.67%.







### 6.1.1.5. Pesos específicos y absorción.

Dentro de las propiedades físicas de los agregados que dependen directamente de las propiedades de la roca original de donde provienen. “El peso específico es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, incluyendo la masa del agua dentro de los poros saturables, (después de la inmersión en agua durante aproximadamente 24 horas), pero sin incluir los vacíos entre las partículas, comparado con la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida”<sup>5</sup>. “La absorción en los agregados, es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado como un porcentaje de la masa seca”<sup>6</sup> Estos ensayos se realizaron de acuerdo a las normas NTC 237 y NTC 176.

**Tabla 6.2. Pesos específicos y porcentajes de absorción.**

Agregado	Arena		Grava	
	Guamo	Vista Hermosa	Vista Hermosa 1/2"	Vista Hermosa 3/8"
Peso específico	2,68	2,66	2,56	2,61
Absorción (%)	1,41	2,58	4,08	2

## 6.2. Ligantes

Los resultados de la caracterización física de los ligantes utilizados se muestra en la tabla

**Tabla 6.3. Características físicas de los asfalto estudiados.**

PRUEBA	Barranca 70-90	AC 80-100	SBS	SBR
Viscosidad a 135°C(cP)	683	2917	1267	2917
Penetracion Original(dmm)	92	90	49	62
Ductilidad(cm)	150	25	109,5	147
Estabilidad al almacenamiento	SI	NO	NO	SI

<sup>5, 6</sup> [http://www.construaprende.com/Lab/17/Prac17\\_1.html](http://www.construaprende.com/Lab/17/Prac17_1.html) (última visita 25-01-06)



Punto Ablandamiento(°C)	50	52	85	50
Penetracion del Residuo(dmm)	33	70	34	41
Pérdida de Masa (%)	0,08	0,380	0,12	0,45
T mezcla (°C)	155	179	177 *	160 *
T compactación (°C)	145	172	166 *	150 *
T falla original(°C)	61,5	76,7	71,5	62,93
T falla residuo(°C)	67,5	62,2	67,5	62,14
T falla PAV(°C)	22,9	16,1	21,1	22,8

### 6.3. Metodología para los diseños de las mezclas asfálticas

Para el diseño de las mezclas asfálticas se escogió una granulometría semi-abierta, de tipo CA 0/14, esta nomenclatura sugiere que su utilización es recomendada para capas de rodadura, de acuerdo al numeral F.2.6-Mezclas asfálticas en caliente para capas de rodadura y de liga para soportes poco deformables, del Reglamento técnico para la ejecución de obras en el sector vial de Bogotá, D.C. – RSV 2002. El numeral en mención, recomienda trabajar estas rodaduras en espesores de 7 a 9 cm. La distribución de porcentajes para la granulometría en análisis se muestra en la tabla 6.2.

**Tabla 6.4. Intervalos de especificación granulométricos para mezclas asfálticas en caliente\***

Tamaño de partícula	CA 0/14
mm	Porcentaje que pasa (%)
14	94 a 100
10	72 a 84
6,3	50 a 66
4	40 a 54
2	28 a 40
0,08 (capa de rodadura)	7 a 10
0,08 (capa de liga)	6 a 9

\*Fuente: Reglamento técnico para la ejecución de obras en el sector vial de Bogotá, D.C., 2003.



La tabla 6.3 establece las propiedades mínimas requeridas para mezclas asfálticas para capas de rodadura, propiedades que fueron tenidas en cuenta al momento del diseño de mezclas.

**Tabla 6.5. Propiedades mínimas requeridas para mezclas asfálticas para capas de rodadura o liga\***

Ensayo	Norma	Mezcla asfáltica semi-abierta para capas de rodadura ó	
		0/10	0/14
<b>Ensayo de compactación giratoria</b> Compacidad en 10 giros (C10) Compacidad en 60 giros (C60) Compacidad en 80 giros (C80)	IDU-300	< 89% 92 - 95 % -	< 89% - 93 - 96 %
<b>Ensayo de compresión simple a 18°C y 1 mm/seg +/-0,1mm/s</b> - Resistencia a la compresión a 18°C, R en Mpa • con asfalto Tipo II • con asfalto Tipo I r luego inmersión - relación: R seco	INV E-747  INV E-738	> 5 > 6  > 0,75	> 5 > 6  > 0,75
<b>Ensayo Marshall</b> - Compacidad - capa de rodadura - capa de ligadura	INV E-748	<= 97% <= 95%	<= 97% <= 95%
<b>Ensayo de ahuellamiento</b> Maxima velocidad de deformación (µm/mín) en el intervalo de 105 a 120 mín	INV E- 756	20	20

\* Fuente: Reglamento técnico para la ejecución de obras en el sector vial de Bogotá, D.C., 2003.

### 6.3.1. Contenido de ligante

El contenido en ligante se determinó de acuerdo a lo establecido en el numeral F.2.6.1.2 del RSV 2002. A continuación se describe el procedimiento:

$$\text{Contenido...de...ligante} = K\alpha\sqrt{\Sigma} \quad (6.1)$$

$$\alpha = \frac{2.65}{\gamma_G} \quad (6.2)$$

Donde:

$\Sigma$  : superficie específica convencional = 0.25 G + 2.3 S + 12 s + 135 f.



- K** : módulo de riqueza.  
**f** : proporción en peso de partículas menores del tamiz 200.  
**G** : porción en peso de partículas de más de 6.3 mm.  
**S** : proporción en peso de partículas comprendidas entre 6.3 y 0.315 mm.  
**s** : proporción en peso de partículas comprendidas entre 0.315 y 0.08 mm.

De acuerdo con RSV 2002, los valores mínimos de los módulos de riqueza K son respectivamente de 3.3 y 3.4.

Entonces una vez se calculan los parámetros de la ecuación (6.1), se toma una K inicial de 3.3. Este valor de K está sujeto a variaciones de acuerdo a los resultados que se vayan obteniendo en las pruebas de evaluación de desempeño de la mezcla fabricada. Por lo tanto se evalúan varios valores de K para encontrar el porcentaje óptimo de ligante

$$\text{El parámetro } \alpha \text{ se calcula como } \alpha = \frac{2.65}{\gamma_{\text{agregados}}} = \frac{2.65}{2.65} = 1, \quad (6.3)$$

Los parámetros de selección del porcentaje óptimo de ligante son el porcentaje de vacíos que debe estar entre el 4% y el 8%, y el módulo dinámico a 15 °C y 10Hz el cual debe ser mayor a 32000 Kg/cm<sup>2</sup>.

Siguiendo los requerimientos de la tabla 6.3, se utilizó el método de la prensa de cizallamiento giratoria PCG para obtener el contenido óptimo de asfalto en cada mezcla. Este ensayo permite llevar a cabo una compactación en condiciones isotérmicas y con trayectorias de esfuerzos similares a las que se presentan en el campo. El ensayo se realizó con 80 giros lo cual corresponde a mezclas asfálticas para rodadura 0/14. Estos giros garantizan una compactación entre el 93 y el 96%.



**Figura 6.5. Distribución granulométrica para mezcla 0/14 con los agregados escogidos.**

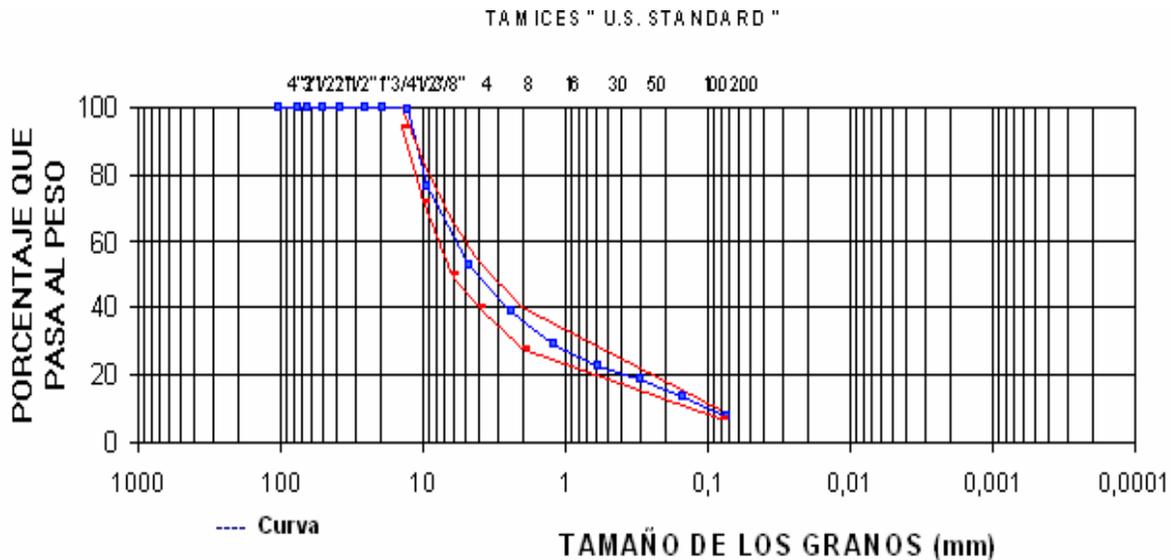
### 6.3.2. Granulometría

Como se ha venido mencionando hasta el momento, con los agregados escogidos se determinaron los porcentajes necesarios que cumplieran con la granulometría escogida (IDU 0/14). Los porcentajes se muestran a continuación (Tabla 6.4)

**Tabla 6.62. Combinación de porcentajes en peso granulometría 0/14**

	Vista Hermosa ½"	Vista Hermosa 3/8"	Arena de Guamo	Arena de Trituración
Porcentaje en peso	0,4	0,2	0,1	0,3

Con la formula de trabajo mostrada en la tabla 6.4, se obtuvo la curva granulométrica mostrada en la figura 6.6. Se observa en la figura que la granulometría obtenida se encuentra dentro de los límites de una gradación tipo 0/14.



**Figura 6.6. Distribución granulométrica para mezcla 0/14 con los agregados escogidos.**

Teniendo la granulometría escogida y la metodología de diseño definida se procedió a fabricar las briquetas con los contenidos de asfalto obtenidos de la ecuación (6.1). Se elaboraron las siguientes mezclas:

- Mezcla con ligante Barranca 70/90.
- Mezcla con ligante Barranca 80/100.
- Mezcla con ligante Barranca 70/90 modificado con GCR proceso húmedo.
- Mezcla con ligante Barranca 80/100 modificado con GCR proceso húmedo.
- Mezcla con ligante Barranca 80/100 modificada con GCR proceso seco.
- Mezcla con ligante modificado con polímero SBR.
- Mezcla con ligante modificado con polímero SBS.
- Mezcla con ligante Apiay 60/70 modificado con GCR proceso húmedo

El procedimiento para la elaboración de las mezclas con caucho mediante proceso seco se menciona en el numeral 6.2.3.





**Figura 6.8. Material retenido tamiz 50 de la arena de Guamo junto a la fracción de GCR correspondiente**

A continuación se presentan fotografías de los procedimientos realizados durante el diseño de las mezclas.



**Figura 6.9. Prensa de compactación giratoria PCG**



**Figura 6.10. Briqueta conformada luego de compactación giratoria.**



**Figura 6.11. Procedimiento para determinación del peso específico bula.**



**Figura 6.12. Estabilización térmica de las briquetas para la prueba de Módulo Dinámico**



**Figura 6.13. Prueba de Módulo Dinámico en la MTS.**

#### **6.4. Resultados obtenidos de los diseños de mezclas**



Con el objetivo de cumplir con los requisitos establecidos en el RSV 2002, (Tabla 6.3), a continuación se muestra la evaluación de las diferentes mezclas ensayadas considerando los parámetros; contenido de ligante, módulo de riqueza (K), contenido de vacíos y módulo dinámico de la mezcla a 15°C y 25 Hz (Tabla 6.5).

**Tabla 6.7. Resumen valores de los ensayos para el diseño de las mezclas asfálticas**

Asfalto	% Asfalto	K	Peso específico Bulk	% Vacíos	Módulo Dinámico
					Kg/cm2
	5.41	3.3	2.10	9.3	95919
<b>Barranca 70/90</b>	5.91	3.6	2.12	8.19	133706
	6.4	3.9	2.13	7.51	147312
	6.89	4.2	2.15	5.24	115120
	5.41	3.3	2.11	9.2	102132
<b>AC 70/90 Vía Húmeda</b>	5.91	3.6	2.12	8.45	100955
	6.4	3.9	2.14	7.35	123578
	6.89	4.2	2.16	4.66	111835
	5.41	3.3	2.13	8.80	95919
<b>Barranca 80/100</b>	5.91	3.6	2.14	6.60	120719
	6.4	3.9	2.16	5.96	112642
	6.89	4.2	2.13	6.54	168779
	5.41	3.3	2.10	9.2	111093
<b>AC 80/100 Vía Húmeda</b>	5.91	3.6	2.11	9.2	80893
	6.4	3.9	2.11	8.2	126809
	6.89	4.2	2.14	6.0	131639
	5.41	3.3	2.09	10.86	101167
<b>AC 80/100 Vía Seca</b>	5.91	3.6	2.09	9.05	81305
	6.41	3.9	2.11	8.63	101642
	6.89	4.2	2.08	5.35	63345
	5.41	3.3	0.00	0.00	0.00
<b>Apiay 60/70 Vía Húmeda</b>	5.91	3.6	2.10	9.90	110244
	6.4	3.9	2.13	7.24	101642
	6.89	4.2	2.15	6.28	144849
	5.41	3.3	2.11	8.08	151997
<b>SBS</b>	5.91	3.6	2.13	7.54	126338
	6.4	3.9	2.16	6.19	136864
	6.89	4.2	2.16	4.8	104561
	5.41	3.3	2.10	9.91	112642
	5.91	3.6	2.12	8.56	80404
<b>SBR</b>	6.4	3.9	2.13	7.29	167150
	6.89	4.2	2.13	6.08	87475



---

A partir de los datos de los ensayos de módulo dinámico, peso específico Bulk y porcentaje de vacíos de la mezcla, se selecciona el porcentaje óptimo de asfalto, el cual corresponde al punto donde se presente el módulo dinámico más alto y que se encuentre en el rango de porcentaje de vacíos permitido.

#### **6.4.1. Contenido óptimo de ligante(siguiente página)**



### 6.4.1.1. Mezcla asfáltica con ligante Barranca 70/90

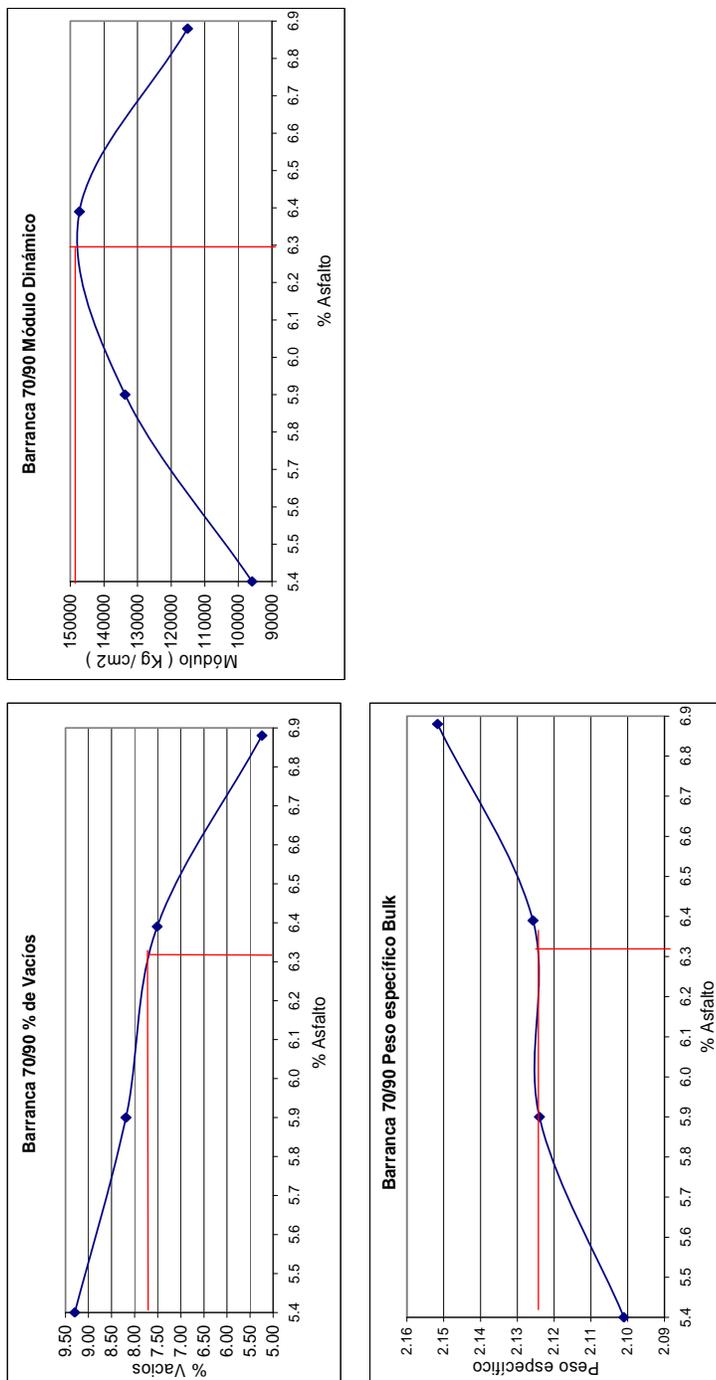


Figura 6.14. Diseño de mezclas Barranca 70/90.



### 6.4.1.2. Mezcla asfáltica con ligante Barranca 70/90 modificado por proceso vía húmeda

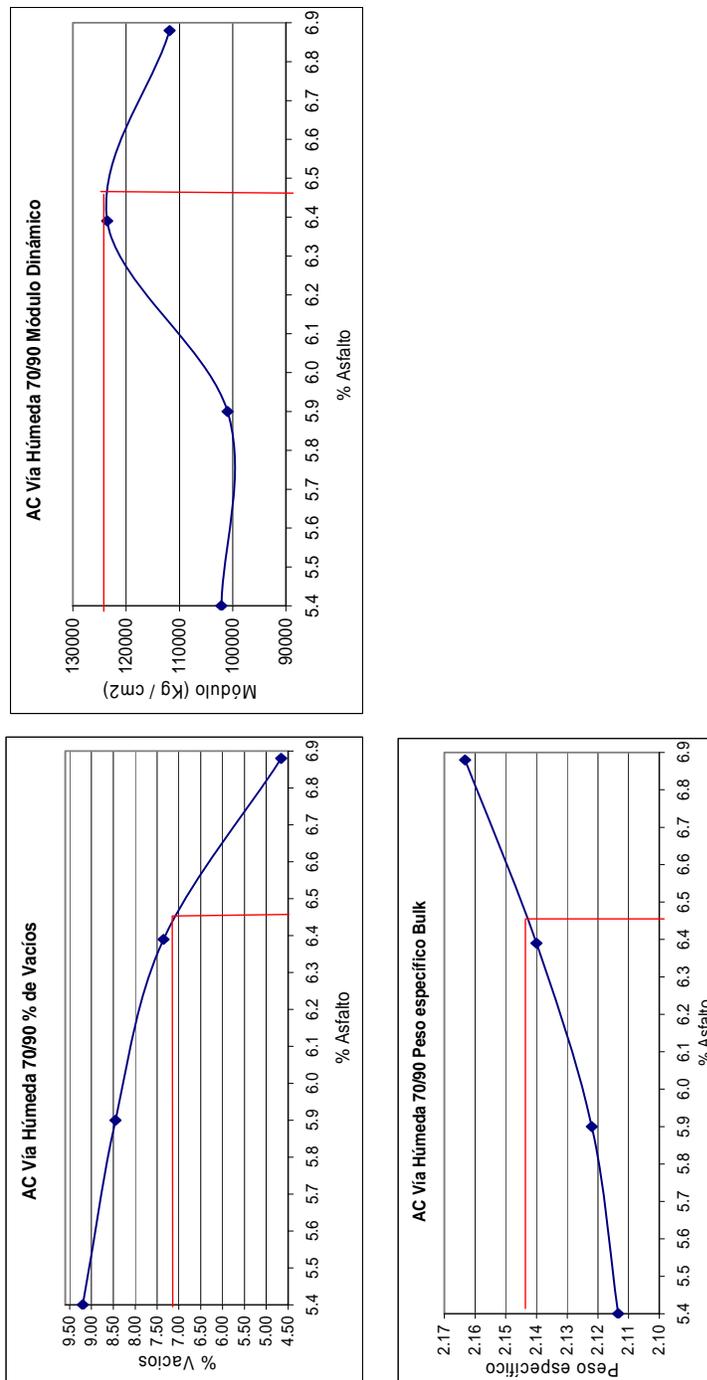


Figura 6.4. Diseño de mezclas Barranca 70/90 vía húmeda.



### 6.4.1.3. Mezcla asfáltica con ligante Barranca 80/100

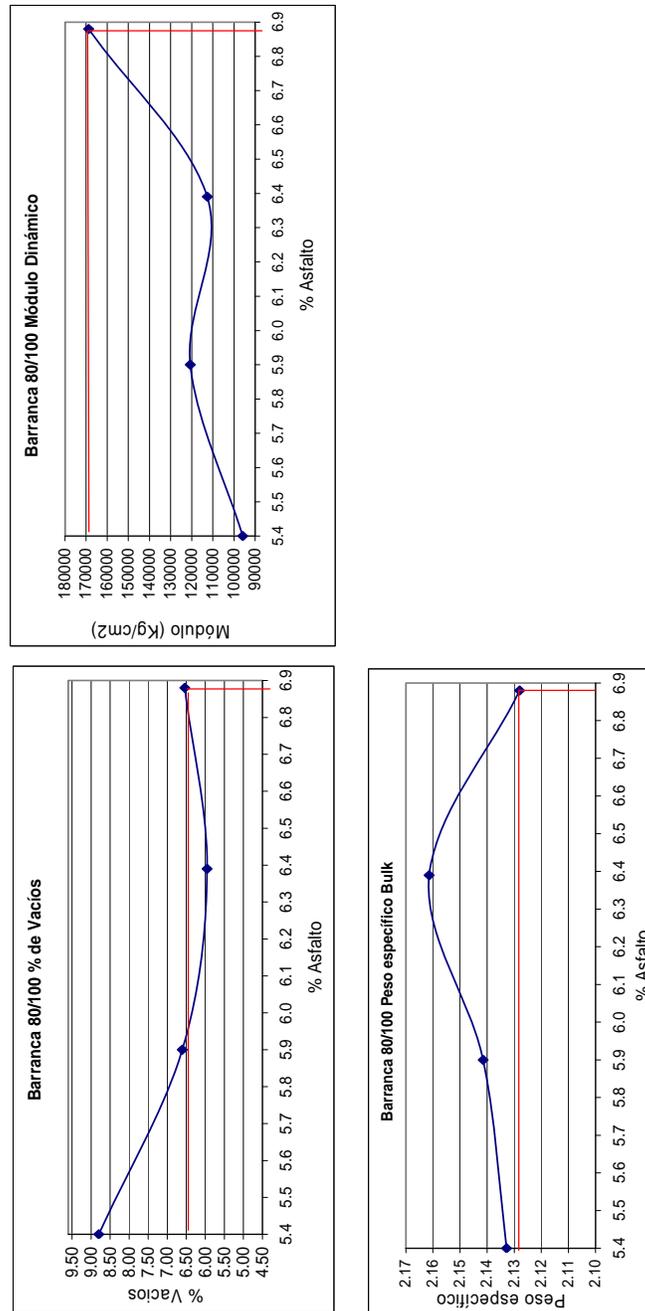


Figura 6.16. Diseño de mezclas Barranca 80/100.



### 6.4.1.4. Mezcla asfáltica con ligante Barranca 80/100 modificado por proceso vía húmeda

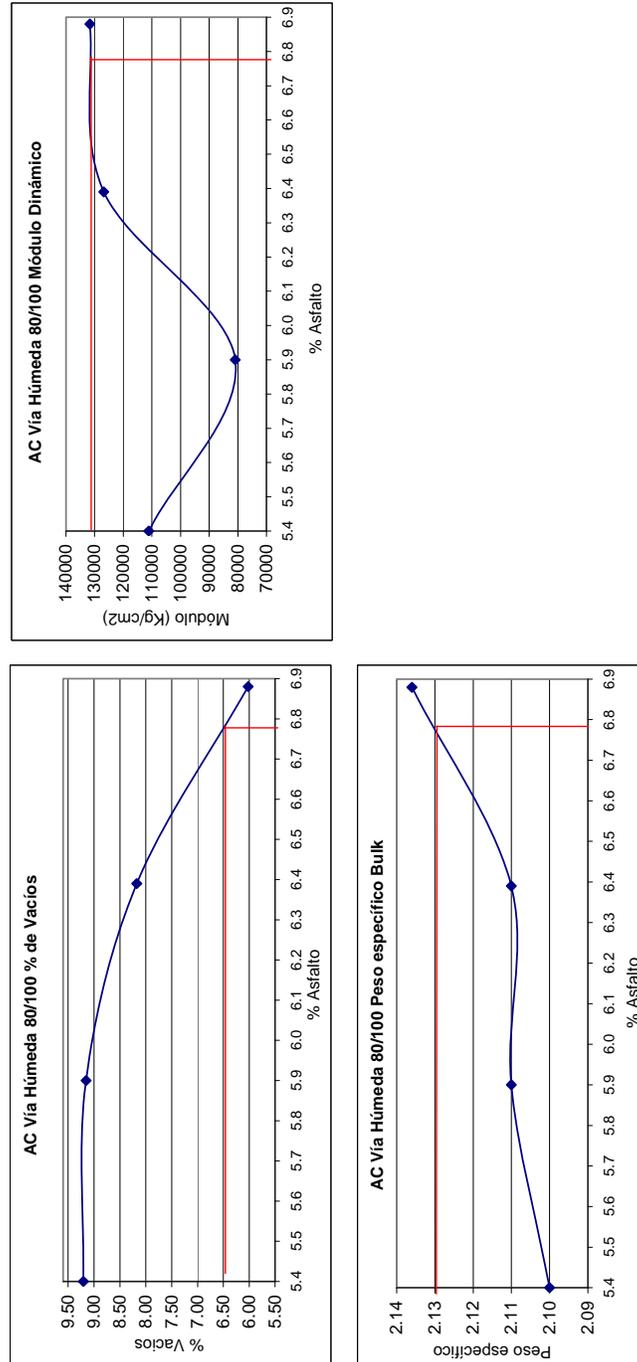


Figura 6.17. Diseño de mezclas Barranca 80/100 vía húmeda.



### 6.4.1.5. Mezcla asfáltica con ligante Barranca 80/100 modificado por proceso vía seca

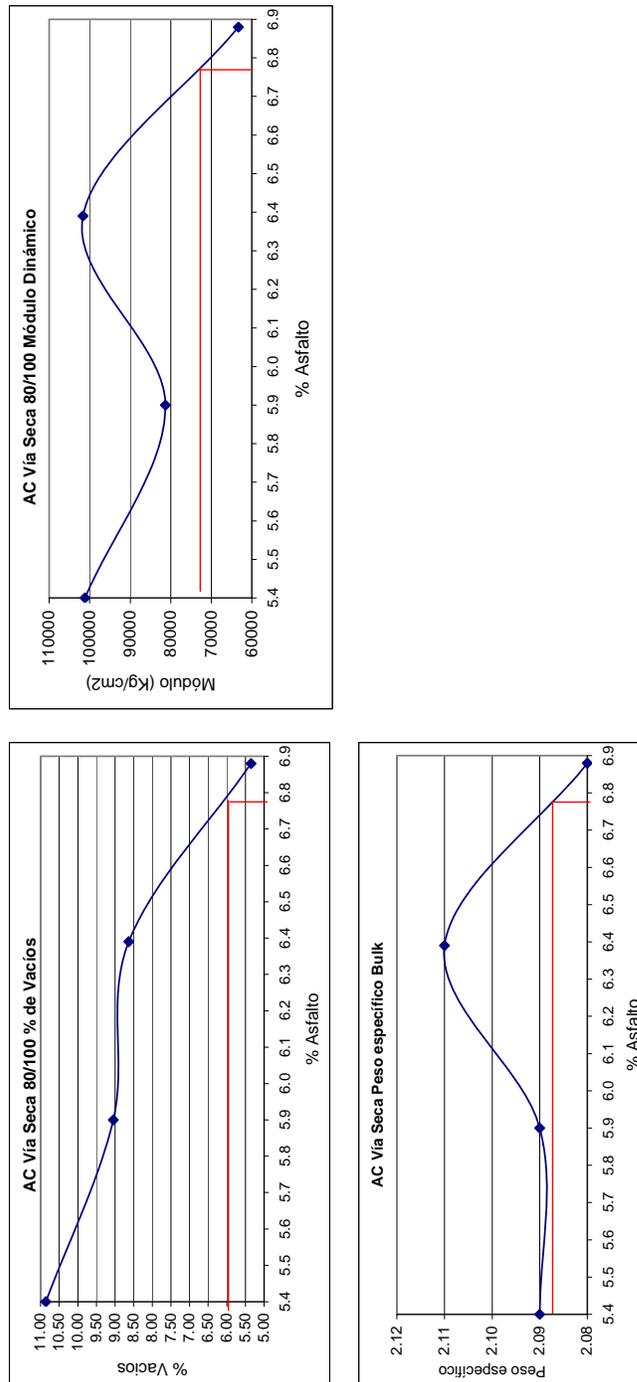
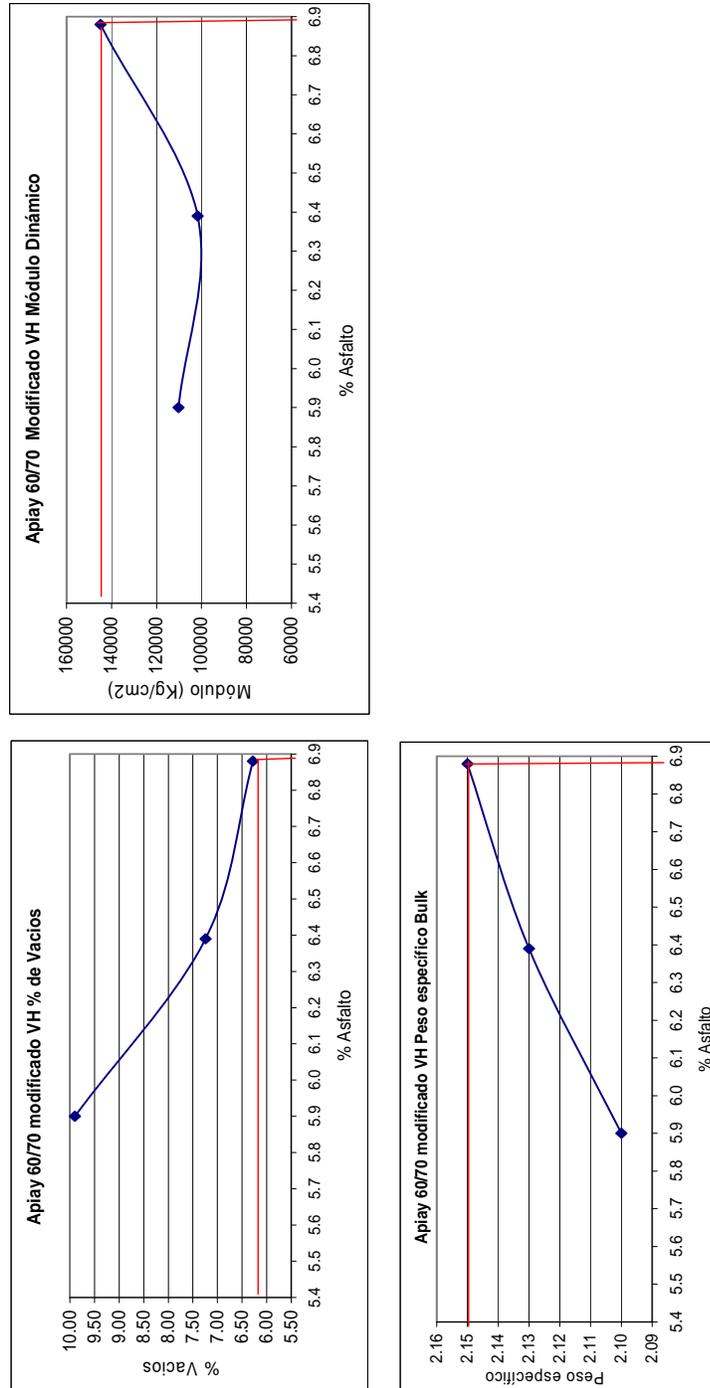


Figura 6.18. Diseño de mezclas Barranca 80/100 vía seca.



### 6.4.1.6. Mezcla asfáltica con ligante Apiay 60/70 modificado por proceso vía húmeda



**Figura 6.19. Diseño de mezclas Apiay 60/70 vía húmeda.**



### 6.4.1.7. Mezcla asfáltica con ligante comercial modificado con polímero SBS

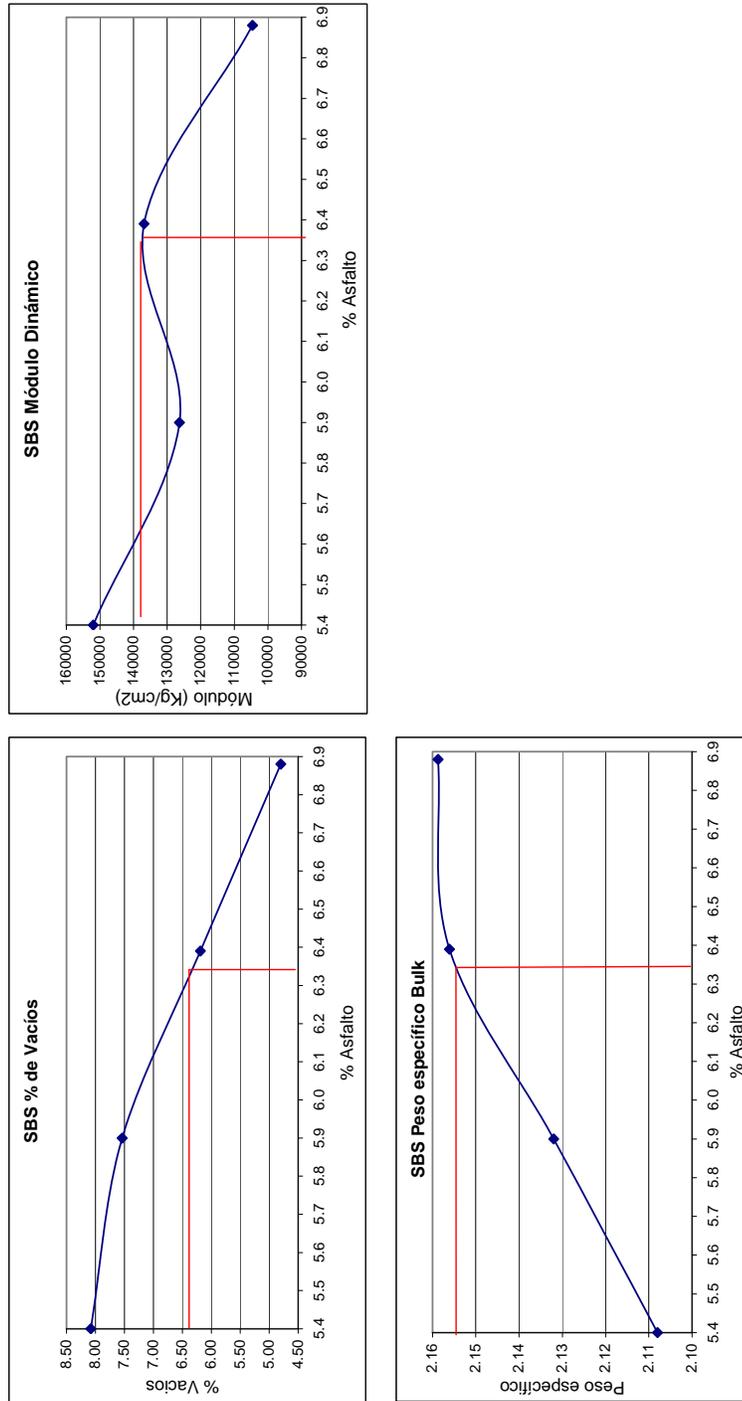


Figura 6.5. Diseño de mezclas ligante comercial con polímero SBS.



### 6.4.1.8. Mezcla asfáltica con ligante comercial modificado con polímero SBR

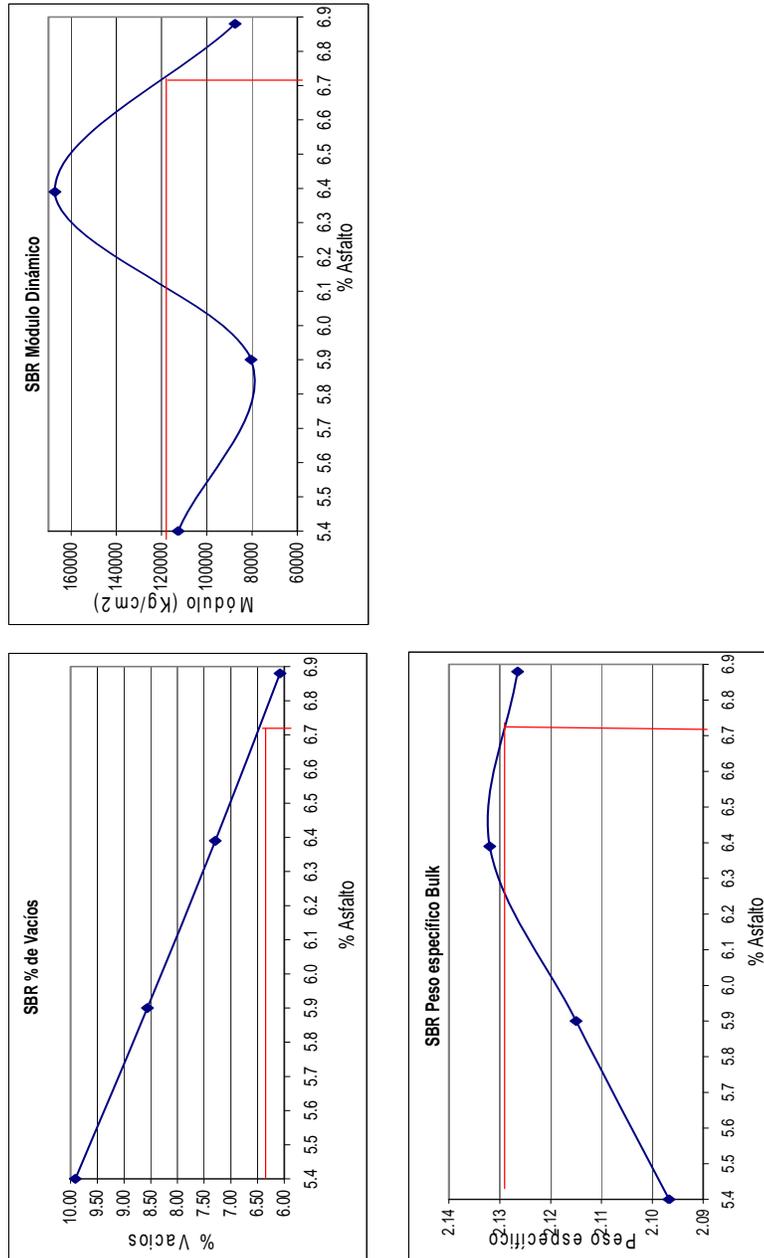


Figura 6.21. Diseño de mezclas ligante comercial con polímero SBR



De acuerdo a lo anterior se obtienen las siguientes fórmulas de trabajo para las mezclas asfálticas:

**Tabla 6.8. Fórmulas de Trabajo para las Mezclas Asfálticas**

	% Asfalto	1/2"	3/8"	Arena de Guamo	GCR	Arena de Trituración
<b>Barranca 70/90</b>	6.32	0.4	0.2	0.1	0	0.3
<b>Modificado AC 70/ 90 Vía Húmeda</b>	6.46	0.4	0.2	0.1	0	0.3
<b>Barranca 80/100</b>	6.89	0.4	0.2	0.1	0	0.3
<b>Modificado AC 80/100 Vía Húmeda</b>	6.78	0.4	0.2	0.1	0	0.3
<b>Modificado AC 80/100 Vía Seca</b>	6.78	0.4	0.3	0.12	0.01	0.17
<b>Apiay 60/70 Modificado Vía Húmeda</b>	6.89	0.4	0.2	0.1	0	0.3
<b>Modificado SBS</b>	6.35	0.4	0.2	0.1	0	0.3
<b>Modificado SBR</b>	6.72	0.4	0.2	0.1	0	0.3

Con los contenidos óptimos de asfalto escogidos (Tabla 6.8) las mezclas presentan las siguientes características (Tabla 6.9).

**Tabla 6.9. Valores de ensayos para los diseños finales de mezclas asfáltica**

Asfalto	Peso específico bulk	Módulo (Kg/cm <sup>2</sup> ) 15°C , 10 Hz	Vacíos (%)
<b>Barranca 70/90</b>	2.124	140800	7.55
<b>Modificado AC 70/90 Vía Húmeda</b>	2.144	123000	7.2
<b>Barranca 80/100</b>	2.13	168779	6.54
<b>Modificado 80/100 AC Vía Húmeda</b>	2.13	130000	6.5
<b>Modificado 80/100 AC Vía Seca</b>	2.088	74000	6.0
<b>Apiay 60/70 Modificado Vía Húmeda</b>	2.15	144849	6.25
<b>Modificado SBS</b>	2.155	130850	6.4
<b>Modificado SBR</b>	2.135	120000	6.5

#### 6.4.2. Evaluación de diseños de las Mezclas Asfálticas

Como parte final de la evaluación al desempeño de las mezclas diseñadas y con el fin de verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos exigidos (Tabla 6.3) se adelantaron pruebas de:



- Modulo Dinámico a 3 temperaturas diferentes: 5 °C, 25 °C y 40 °C haciendo un barrido de 4 frecuencias: 1Hz, 4Hz, 10 Hz y 16 Hz.
- Fatiga
- Ahuellamiento
- Adherencia por medio de la prueba de Inmersión – Compresión

#### 6.4.2.1. Módulos Dinámicos

Los módulos dinámicos representan la respuesta mecánica de un material cuando este se ve sometido a cargas repetitivas, que pueden presentar cierta frecuencia o señal de carga (señal sinusoidal). La respuesta dinámica en las mezclas asfálticas al igual que el asfalto depende de la temperatura, es por esto que se llevan cabo barridos de frecuencia a diferentes temperaturas. El módulo dinámico de un material viscoelástico se denota  $E^*$ . Este es un número complejo y está compuesto por una componente real y una imaginaria. En la teoría visco-elástica el valor absoluto del módulo complejo  $|E^*|$  por definición es el módulo dinámico, pero en general el término “modulo dinámico” es usado para denotar condiciones de carga no estáticas (Dougan et al. 2003).

$$E^* = \delta/\varepsilon = \delta_0 e^{i\omega t} / \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \theta)} = \delta_0 \sin \omega t / \varepsilon_0 \sin(\omega t - \theta)$$

$\delta_0$  = máximo esfuerzo

$\varepsilon_0$  = deformación pico

$\theta$  = ángulo de fase, grados

$\omega$  = velocidad angular

$t$  = tiempo en segundos  $i$  = componente imaginaria del modulo complejo



### 6.4.2.1.1. Módulos Dinámicos barrido de frecuencias a tres temperaturas

A continuación se proporcionan las curvas de módulo dinámico para cada asfalto. En estas ilustraciones la curva de color azul oscuro corresponde al ensayo realizado a 5 °C, la línea café corresponde a 25°C y la verde a 40°C.

Los resultados de los módulos dinámicos obtenidos para cada mezcla se muestran en las figuras 6.22 a 6.28. En las figuras se aprecia que el comportamiento de las mezclas a bajas temperaturas (5°C) experimenta una mayor rigidez que para altas temperaturas. Para algunas mezclas a bajas temperaturas el comportamiento es casi independiente de la frecuencia de carga (Figura 6.22 mezcla ligante barranca 70/90, 6.27 mezcla con polímero SBR).

- Barranca 70/90

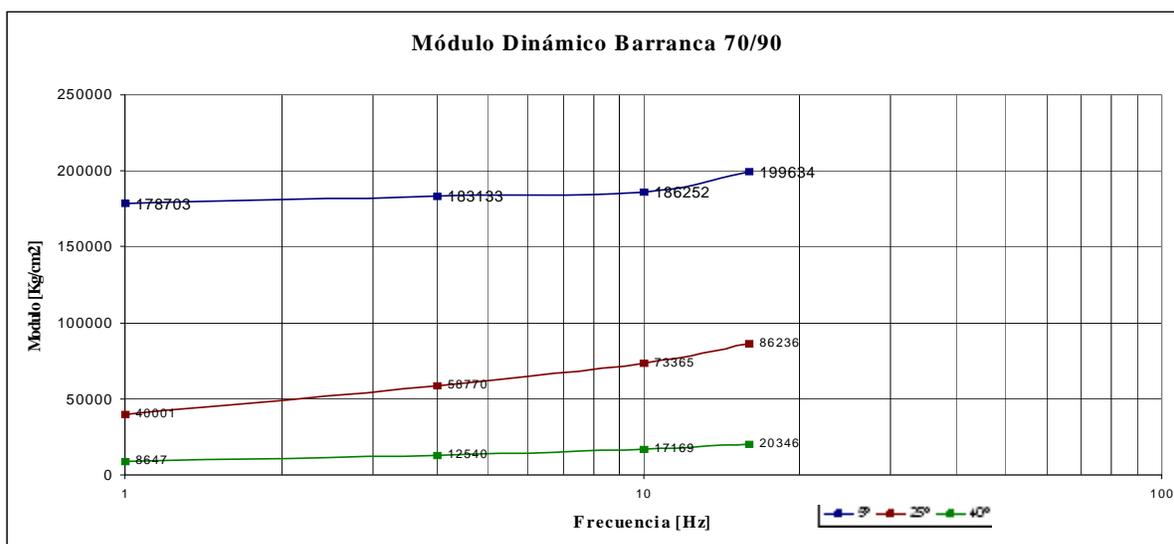


Figura 6.22. Módulo Dinámico diseño óptimo para Barranca 70/90

- Asfalto Caucho Modificado por Vía Húmeda 70/90

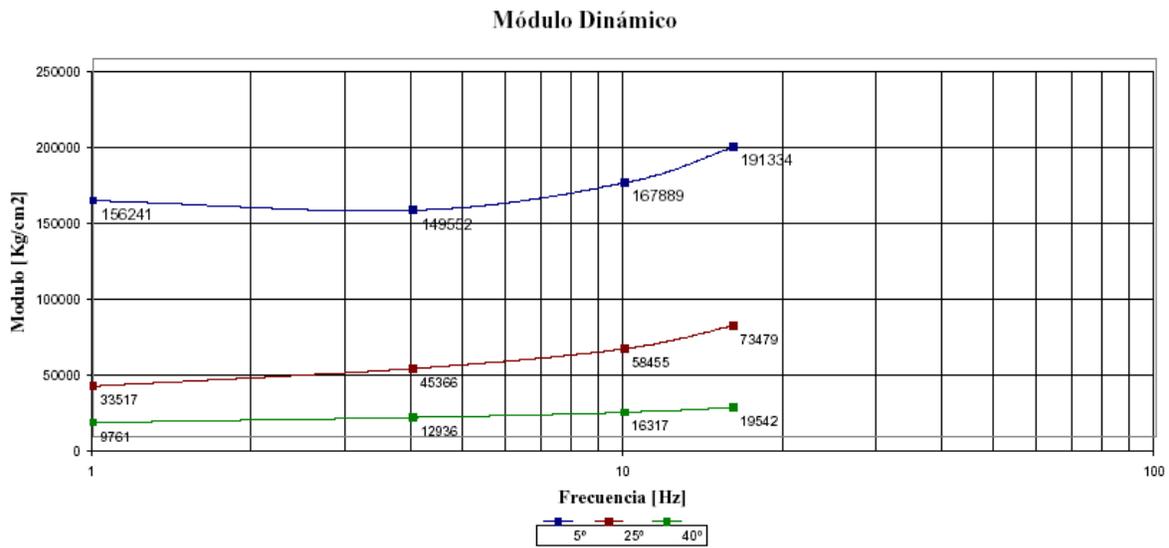


Figura 6.23. Módulo Dinámico diseño óptimo para Asfalto Caucho VH 70/90.

- Barranca 80/100

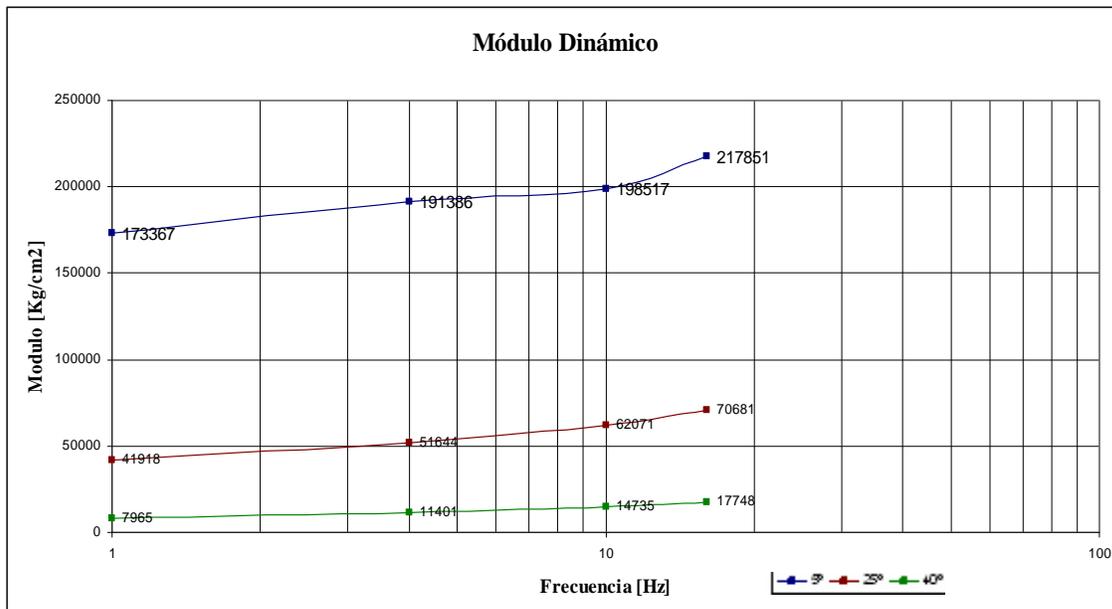


Figura 6.24. Módulo Dinámico diseño óptimo para Barranca 80/100.



• Asfalto Caucho Modificado por Vía Húmeda 80/100

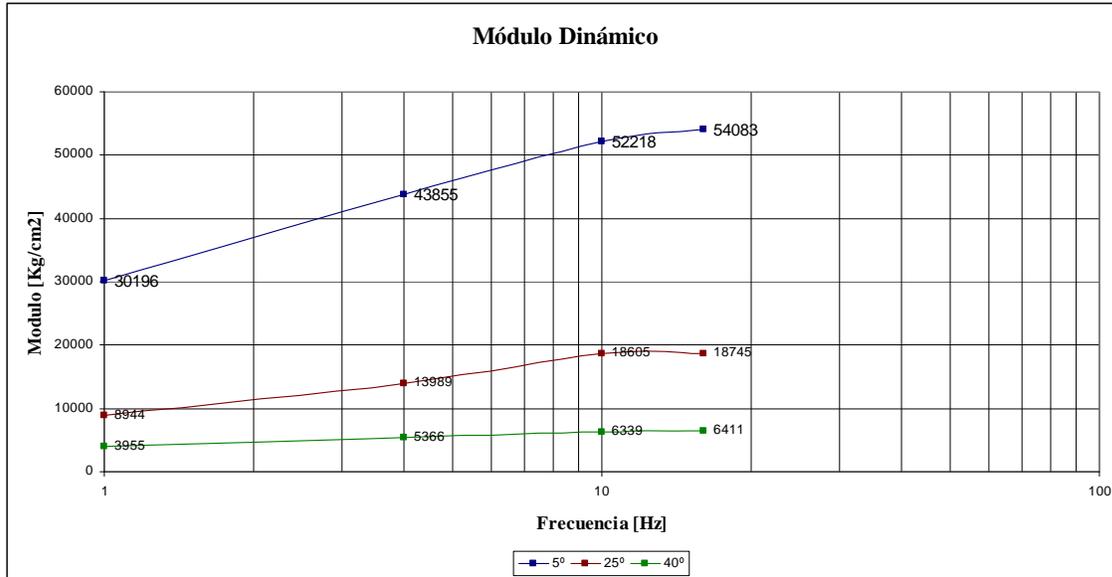


Figura 6.25. Módulo Dinámico diseño óptimo para Asfalto Caucho VH 80/100

• Asfalto Caucho Modificado por Vía Seca Barranca 80/100

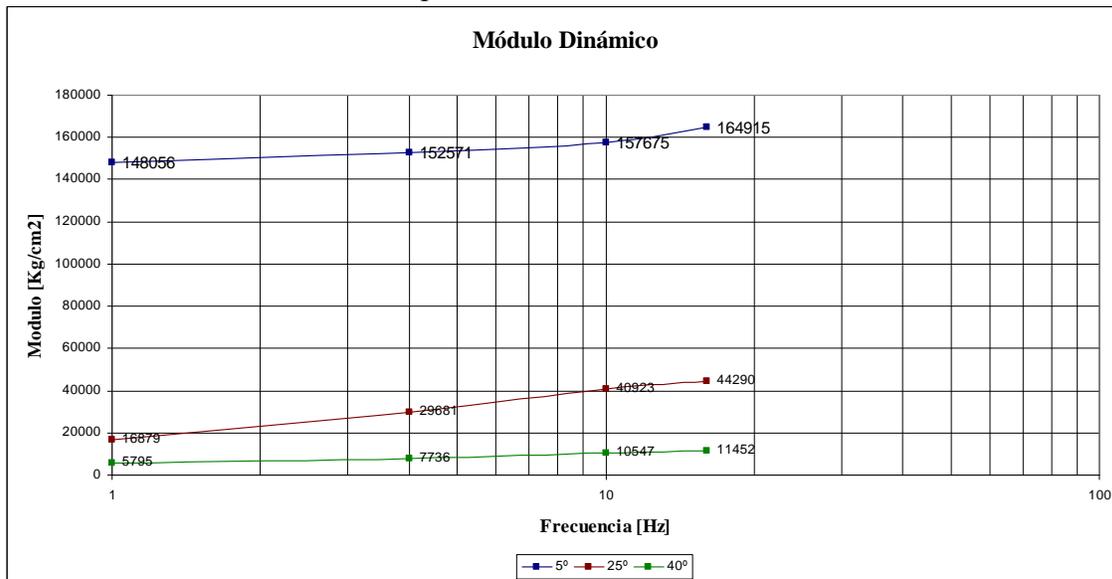


Figura 6.26. Módulo Dinámico diseño óptimo para Asfalto Caucho VS 80/100



- Apiay 60/70 modificado por vía húmeda

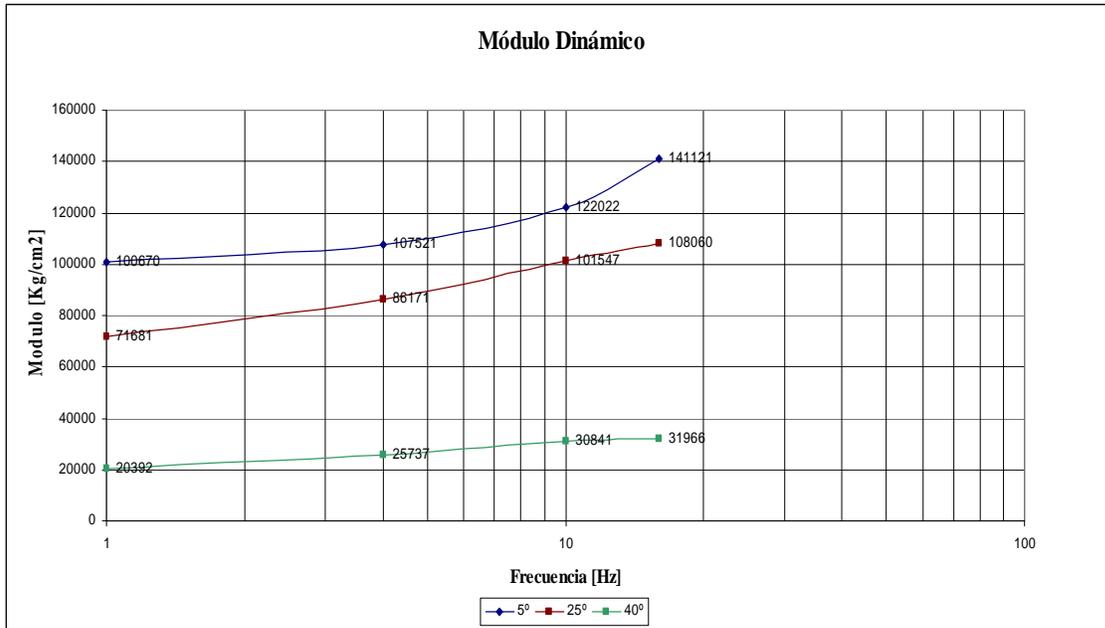


Figura 6.27. Módulo Dinámico diseño óptimo para Apiay vía húmeda.

- Modificado SBR

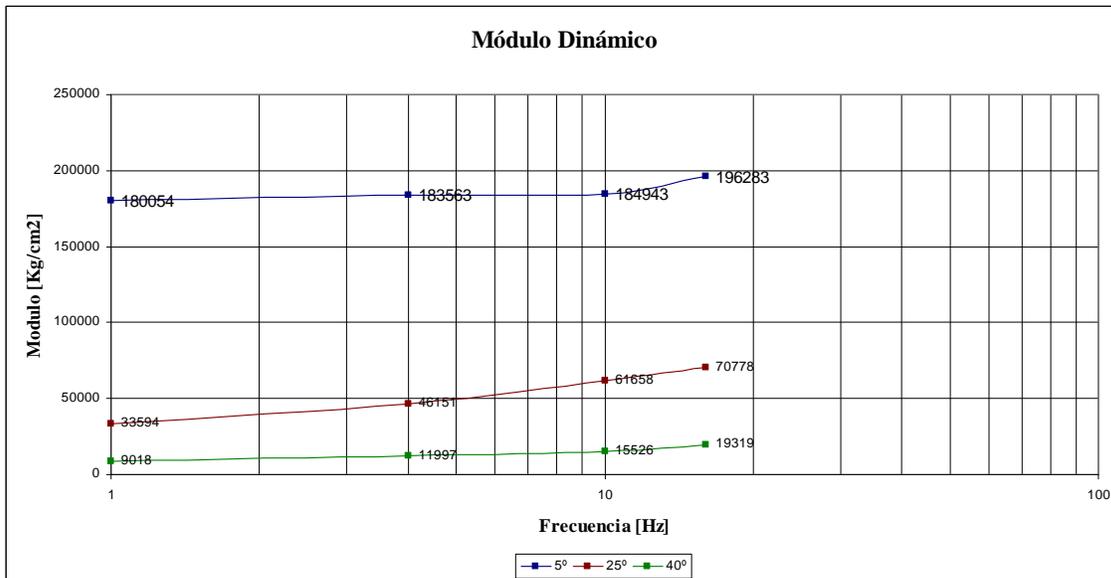
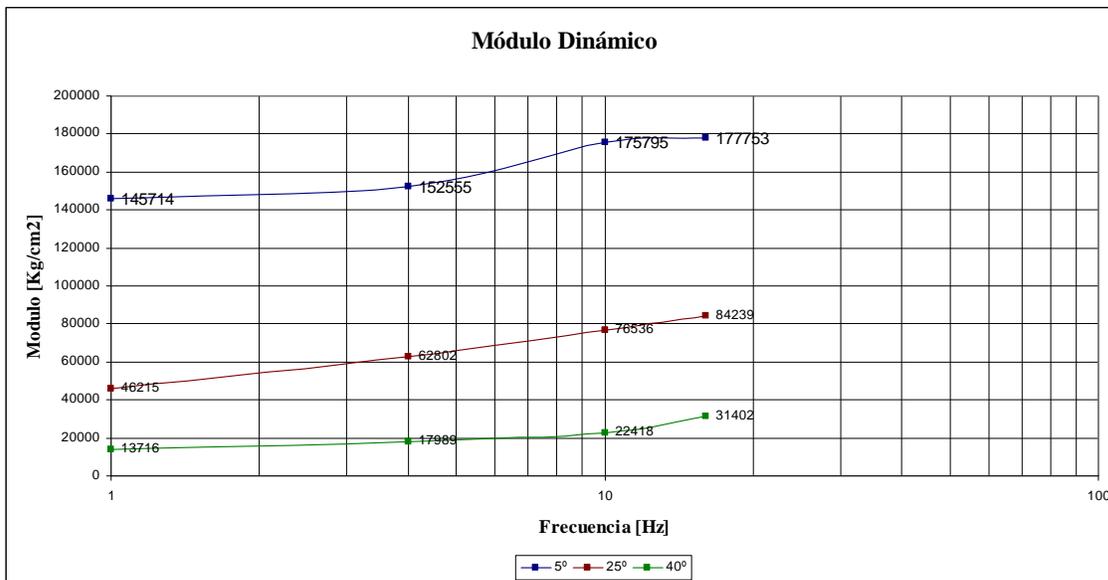


Figura 6.28. Módulo Dinámico diseño óptimo para modificado con SBR.



- Modificado SBS



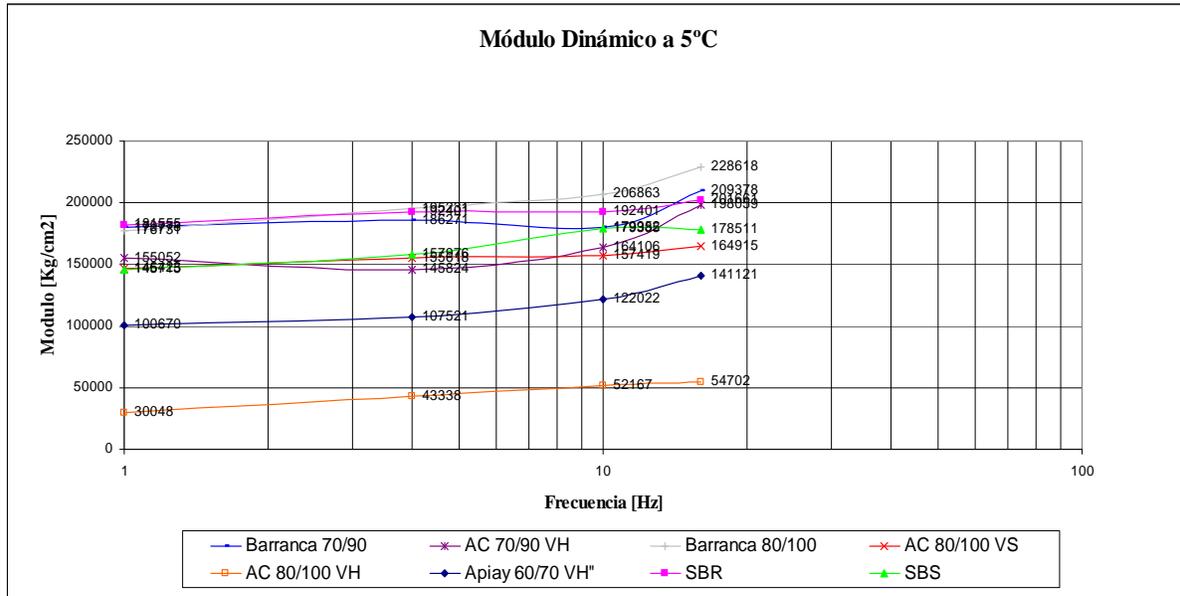
**Figura 6.29. Módulo Dinámico diseño óptimo para modificado con SBS.**

#### 6.4.2.1.2. Comparativo de Módulos Dinámicos barrido de frecuencias a tres temperaturas

Al analizar los módulos a una frecuencia de 10Hz se puede notar que: a bajas temperaturas el módulo dinámico más alto lo presentan el asfalto Barranca 80/100 y el asfalto Barranca 70/90. El menor módulo lo presenta el ligante de Barranca 80/100 modificado con caucho por vía húmeda (AC VH 80/100), mostrando una variación importante del módulo en relación a los otros asfaltos, los cuales presentan valores de módulos muy cercanos entre sí. Además se puede notar la influencia del GCR en la respuesta del módulo dinámico, al pasar el ligante B80/100(Barranca 80/100) del mayor módulo al menor luego de la modificación. Sorprende también el caso del ligante B70/90(Barranca 70/90) que su módulo es disminuido luego de la modificación un 10% , y que el ligante de Apiay modificado con GCR a pesar de ser en estado original un ligante duro(60/70) su módulo dinámico ocupa el penúltimo lugar en resistencia, solo superado por el AC VH 80/100.



- 5° C



**Figura 6.30. Módulos Dinámicos a 5°C.**

Para temperaturas intermedias (25°C) y a una frecuencia de 10 Hz, se encuentra que el ligante con mayor módulo es el A60/70 VH (Apiay 60/70 modificado con caucho), seguido por el SBS y SBR que se encuentra en rango de valores muy cercanos. Es importante notar la diferencia de los valores A60/70 VH presentó un módulo de 101547 Kg/cm<sup>2</sup>, los SBS y SBR respectivamente presentaron 76536 y 61658 Kg/cm<sup>2</sup>. Los ligantes que siguen en orden de valoración son B70/90, B80/100 y el B70/90 VH. De manera similar que para bajas temperaturas el ligantes B80/100 VH presentó casi el menor módulo (18605 Kg/cm<sup>2</sup>) solo superado por el B80/100 VS (10547 Kg/cm<sup>2</sup>).

Los asfaltos modificados con SBR y con caucho presentan valores de módulos muy cercanos además de ser los más bajos entre los asfaltos evaluados. Este comportamiento es de esperar ya que el efecto principal de modificación en el asfalto es causado por el material elastomérico incorporado al asfalto, es decir el SBR y las llantas recicladas en el caso del asfalto caucho.



Al modificar se cambian de una manera importante las propiedades elásticas del material, estas variaciones estructurales pueden ser incluso más notorias a nivel macroscópico cuando se modifica con SBS que cuando se modifica con SBR o con caucho, ya que el SBS es un material más rígido. Este efecto se ve claramente en la ilustración anterior donde los asfaltos modificados con SBR y con caucho presentan un módulo inferior al mostrado por los modificados con SBS.

- 25°C

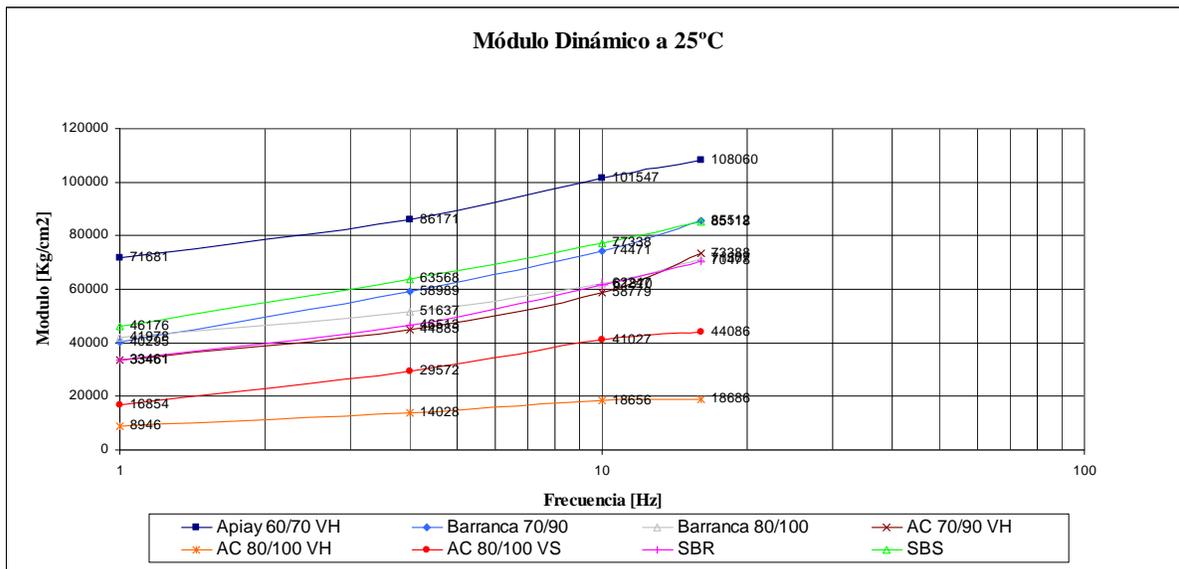
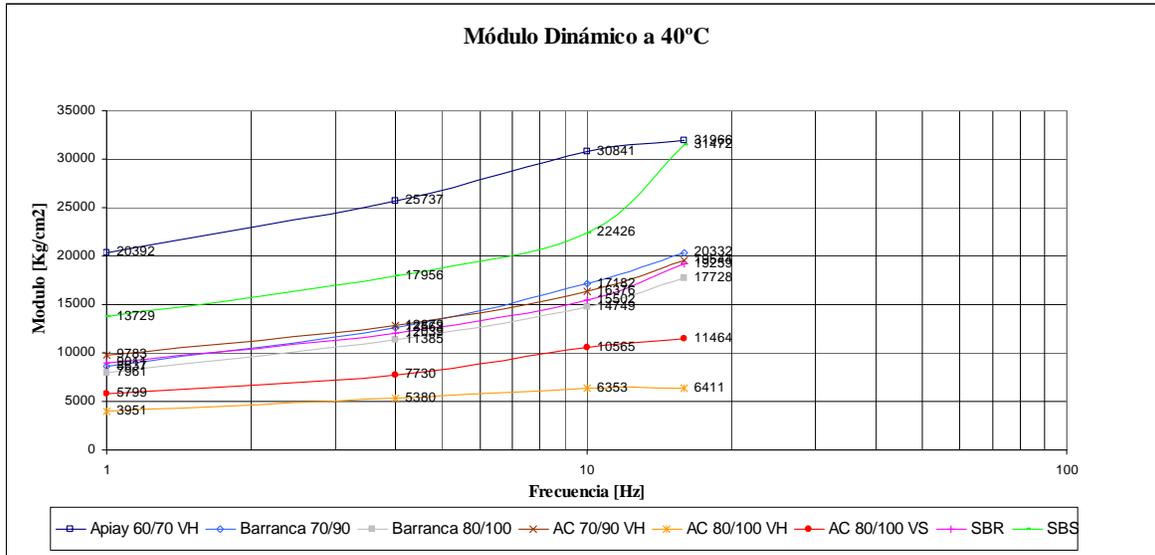


Figura 6.31. Módulos Dinámicos a 25°C



- 40°C



**Figura 6.32. Módulos Dinámicos a 40°C**

Al analizar los módulos a una temperatura de 40 °C se conserva la tendencia que se presenta en los valores de los módulos evaluados a 25°C, sin embargo el comportamiento de todos los asfaltos al aumentar la temperatura tiende a volverse más cercano entre sí.

Los resultados de las pruebas dinámicas para altas temperaturas muestran que el ligante con mejor desempeño es el A60/70 VH(30841 Kg/cm<sup>2</sup>), el ligante con polímero SBS(22418 Kg/cm<sup>2</sup>) y el B80/100 VH(18745 Kg/cm<sup>2</sup>). Estos resultados evidencian como el GCR incrementa los módulos de las mezclas cuando estas trabajan a altas temperaturas. Observando el comportamiento de los ligante no modificados, como es de esperar el ligante 70/90 presentó mayores módulos que el B80/100. Los resultados obtenidos a estas temperaturas cobran relevancia por el hecho que es una temperatura fácil de alcanzar aún en climas como los de Bogotá.

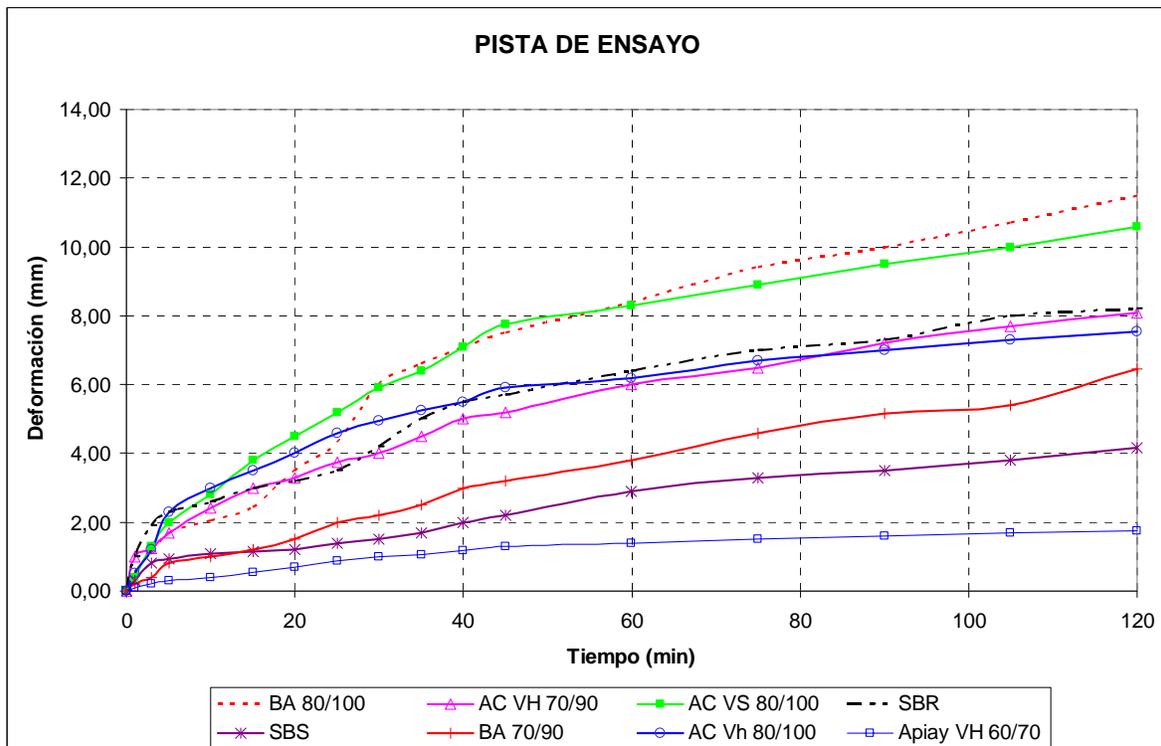


### 6.4.2.2. Ahuellamiento

El ahuellamiento en pavimentos de concreto asfáltico es una forma de deterioro superficial asociado con las condiciones de carga y climáticas a las que está sometido el pavimento en servicio. Se desarrolla gradualmente y aparece como una depresión continua en las bandas de circulación de los neumáticos, dificultando la maniobrabilidad de los vehículos y ocasionando una disminución en la seguridad (Páez & Pereira 2001).

La evaluación de desempeño de las mezclas se llevó a cabo mediante la pista de ensayo de laboratorio norma NLT 173, la cual tiene correspondencia con la norma INV-E 756.

La curva comparativa del comportamiento general de los asfaltos evaluados ante la prueba de Ahuellamiento se presenta a continuación.



**Figura 6.33. Gráfica comparativa de los ahuellamientos para los asfaltos evaluados**

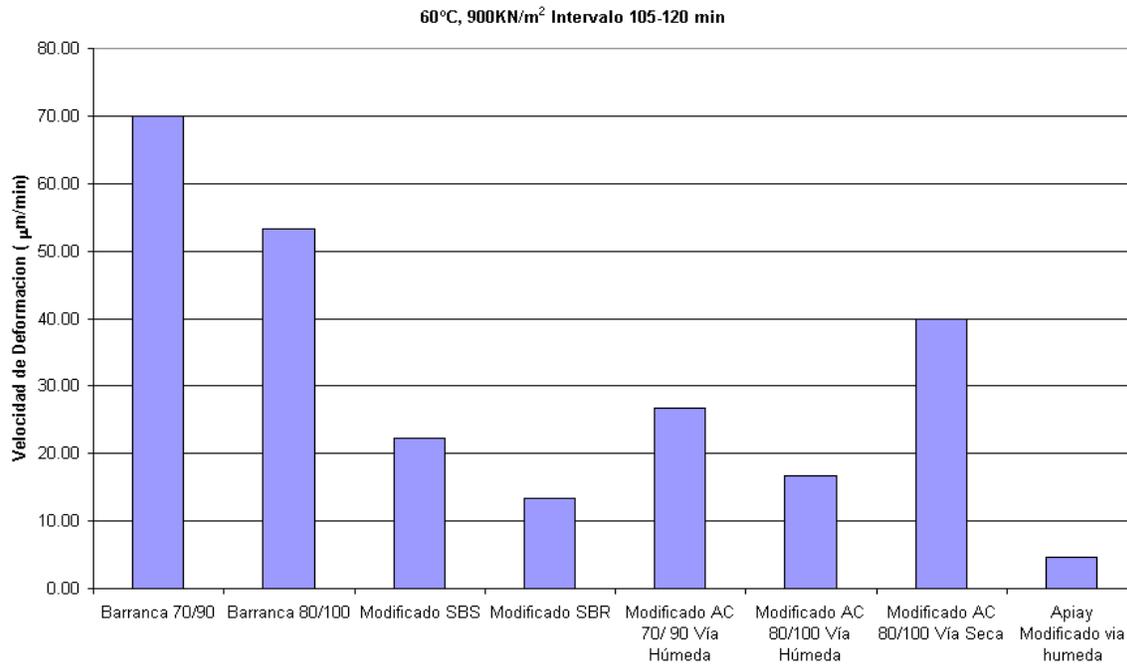


De acuerdo a las curvas de ahuellamiento se puede decir que el asfalto que presenta una mayor resistencia al ahuellamiento es el A60/70 VH(Apiay 60/70 VH), luego le sigue el modificado con SBS, y el B70/90(Barranca 70/90). Los asfaltos modificados con caucho por vía húmeda y con SBR presentan entre si un comportamiento muy cercano, son más resistentes al ahuellamiento que los asfaltos Barranca 80/100 y el modificado con caucho por vía seca. En esta prueba también se encuentra el efecto de las variaciones de propiedades de los asfaltos Barranca 70/90 a Barranca 80/100, siendo este último muy poco resistentes al ahuellamiento.

A continuación se presentan las velocidades de deformación alcanzadas en la prueba de ahuellamiento, los valores deberían ser menores a  $30 \mu\text{m}/\text{min}$ , valor aceptado como referencia para la evaluación de la fluidez del asfalto bajo una carga aplicada a condiciones de operación de  $60^\circ\text{C}$ . A través de esta gráfica se puede observar que los asfaltos modificados con caucho por vía húmeda y SBR presentan velocidades de deformación menores, esto puede ser debido a la estructura interna del material alcanzada por medio del proceso de modificación, en la cual se le confiere una estructura reforzada que ayuda a distribuir con mayor eficiencia los esfuerzos aplicados al material, resultando en velocidades de deformación menores.



### Velocidades de Deformación



**Figura 6.34. Comparación de las velocidades de deformación alcanzadas por los diferentes asfaltos en la prueba de ahuellamiento. Velocidad de deformación en el intervalo de los 105 a los 120 minutos, a 60°C y 900 KN/m<sup>2</sup> de presión de contacto.**

A pesar que las velocidades de deformación indican una característica importante como la de susceptibilidad a la temperatura bajo cargas aplicadas, es importante tener en cuenta no solo este parámetro, sino también la deformación acumulada resultante del esfuerzo. De esta manera se puede hacer una evaluación mas completa del comportamiento del material en la prueba de ahuellamiento. La figura 6.34 muestra que el asfalto Barranca 80/100 presenta las deformaciones acumuladas más altas, lo cual redundaría en problemas serios de ahuellamiento en la vía.

En general los asfaltos modificados por vía húmeda, es decir los asfaltos caucho, los modificados con SBR y SBS, presentan deformaciones acumuladas menores con menores velocidades de deformación. De acuerdo a estas gráficas, el asfalto de Apiay modificado

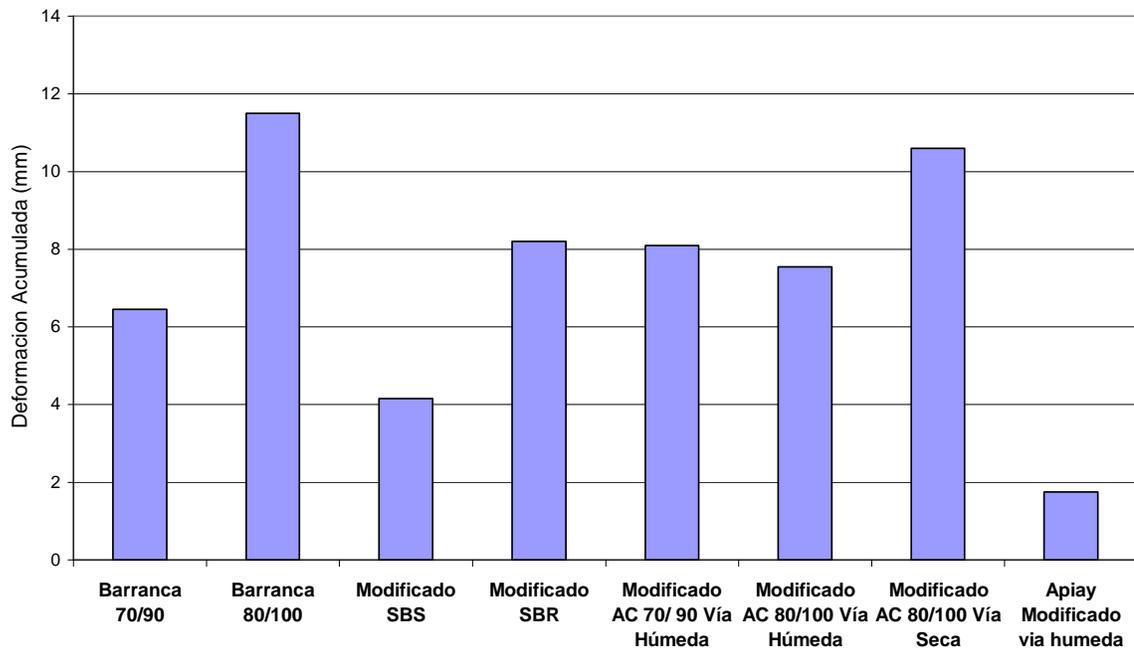


con caucho por vía húmeda presenta un comportamiento excelente en esta prueba al alcanzar valores muy bajos de deformaciones acumuladas con la menor velocidad de deformación encontrada entre los asfaltos evaluados.

De acuerdo a las velocidades de deformación se esperaría tener el orden de falla por ahuellamiento que se presenta a continuación:

- Barranca 70/90
- Barranca 80/100
- Modificado AC 80/100 por Vía Seca
- Modificado AC 70/90 por Vía Húmeda
- Modificado SBS
- Modificado AC 80/100 por Vía Húmeda
- Modificado SBR
- Apiay modificado Vía Húmeda

**Deformación Acumulada  
60°C, 900KN/m2 Intervalo 105-120 min**



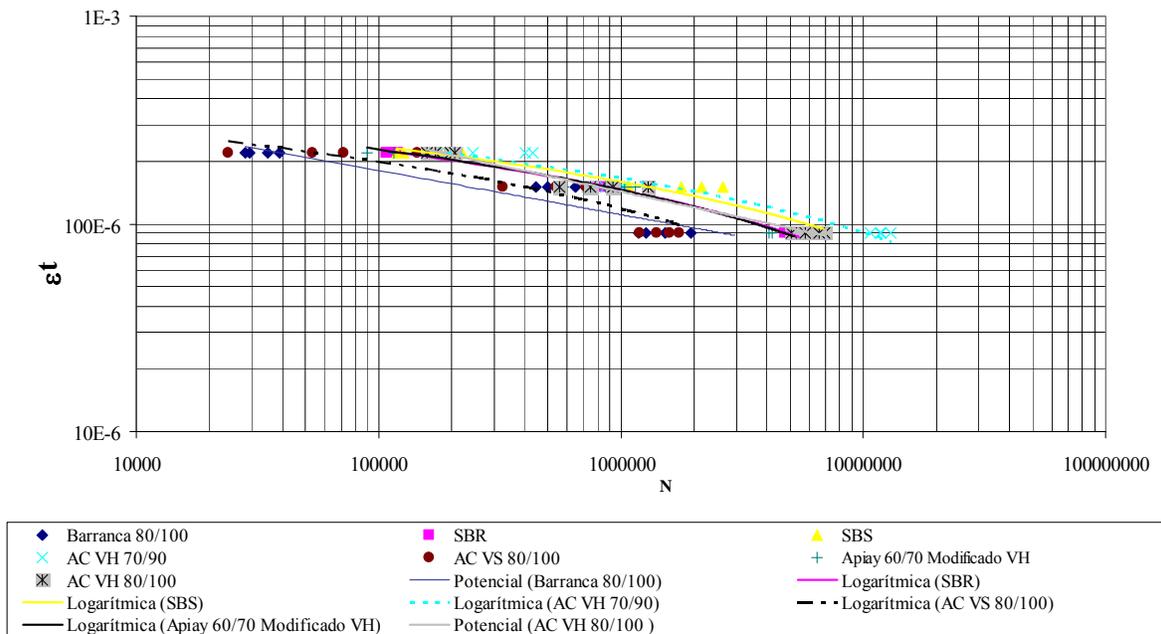
**Figura 6.35. Comparación de las deformaciones acumuladas alcanzadas por los diferentes asfaltos en la prueba de ahuellamiento.**



De acuerdo a este último parámetro, se esperaría que los daños más severos por este tipo de falla fueran presentados por el asfalto Barranca 80/100, seguido por el modificado con caucho por vía seca. El tramo menos afectado por ahuellamientos permanentes sería el que está construido con asfalto modificado con SBS.

### 6.4.2.3. Pruebas de Fatiga

*Curva de Fatiga*

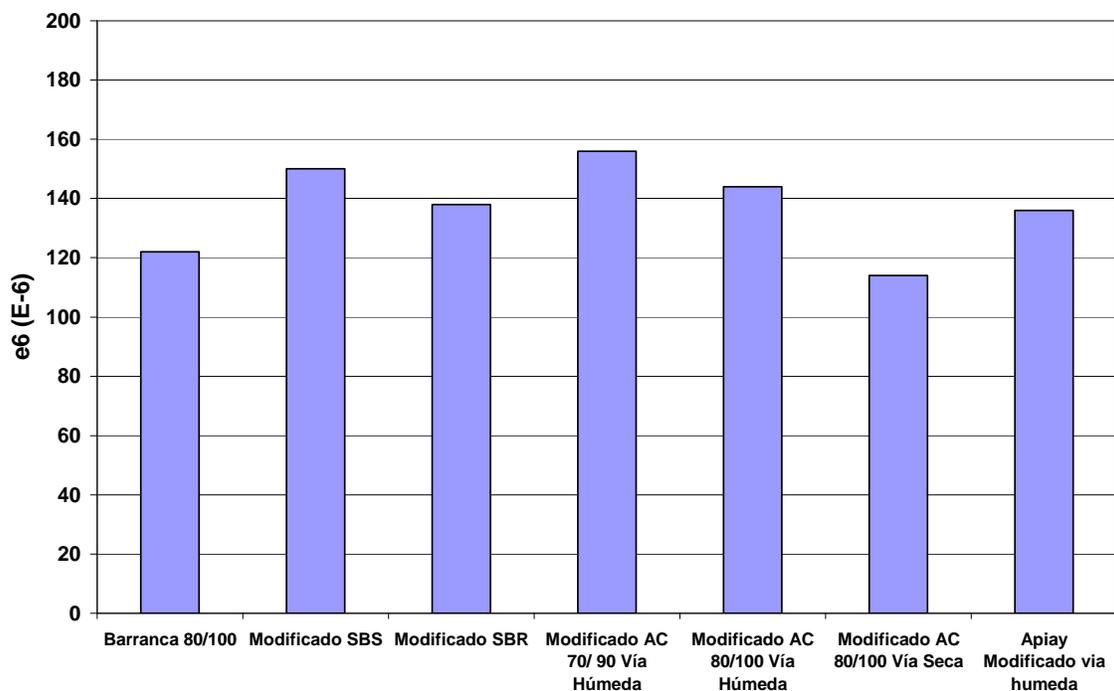


**Figura 6.36. Curvas de Fatiga para los asfaltos evaluados**

Este ensayo muestra que el asfalto Barranca 80/100 presenta la menor resistencia entre los asfaltos evaluados. El más resistente a presentar falla por ahuellamiento es el asfalto caucho 70/90 modificado por vía húmeda, seguido por los modificados SBS, SBR. El asfalto caucho modificado por vía húmeda mejora un poco la fatiga del asfalto original Barranca 80/100.



**Fatiga:  $\epsilon_6$  (21°C, 10 Hz)**



**Figura 6.37. Comparación parámetro  $\epsilon_6$ .**

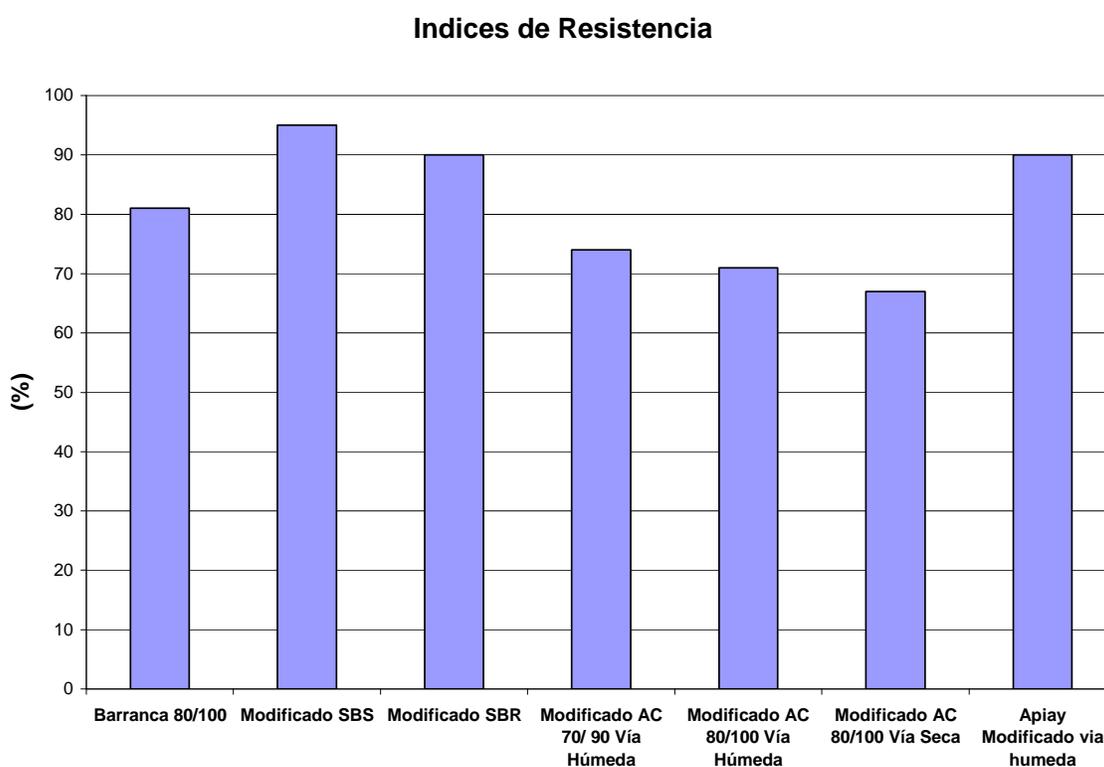
**Tabla 6.10. Datos ensayo de Fatiga**

Asfalto	Fatiga 21°C, 10Hz		
	$\epsilon_6$ (E-6)	b	$\alpha$
Barranca 80/100	122	-0,2122	4,71
Modificado AC 70/ 90 Vía Húmeda	156	-0,231	4,33
Modificado AC 80/100 Vía Húmeda	144	-0,2508	3,99
Modificado AC 80/100 Vía Seca	114	-0,2345	4,26
Apiay Modificado vía húmeda	136	-0,2449	4,08
Modificado SBS	150	-0,2257	4,43
Modificado SBR	138	-0,2419	4,13



De acuerdo a estos datos, la mezcla asfáltica más resistente a la fatiga teniendo un  $e_6$  mayor de 120 E -6, es la elaborada con asfalto barranca 70/90 modificada por vía húmeda con caucho, seguida por la modificada con SBS, y por lo de Barranca 80/100 modificada con caucho por vía húmeda. Al hacer la modificación por vía seca con caucho, la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica disminuye con relación a la mezcla original sin modificación.

#### 6.4.2.4. Inmersión Compresión



**Figura 6.6. Índices de adherencia**

De acuerdo a los índices de adherencia obtenidos se puede decir que el mejor ligante es el asfalto modificado con SBS. El desempeño de los asfaltos modificados con SBR y apiay modificado con caucho por vía húmeda cumplen con la especificación que exige que este índice sea mayor al 70%.



---

Los asfaltos de Barranca 80/100, Barranca 70/90, y modificado con caucho 80/100 por vía húmeda, presentan índices de adherencia mayores al 70%, lo cual significa que poseen características de interacción con los agregados suficientes para tener un buen desempeño en la vía. Los asfaltos modificados con caucho por vía húmeda no alcanzan a presentar un buen nivel de adherencia ligante - agregado.



## 7. PISTA DE PRUEBA

### 7.1. Localización

El tramo seleccionado para la construcción de la pista de prueba se encuentra ubicado en la ciudad de Bogotá D.C., en la localidad de Engativá, barrio Los Álamos. Este se encuentra sobre la carrera 96 comprendido entre la calle 67 y la calle 63 más conocida como Avenida José Celestino Mutis, (Figura 1, Figura 2).



**Figura 7.7. Corredor escogido para construir la Pista de Prueba. Fotografía tomada Febrero de 2004.**

**Tabla 7.2. Características generales de la vía y la zona de influencia**

Malla Vial	Vía	Desde	Hasta	Localidad	Tipo de Tráfico
Local principal Urbana	Carrera 96	Calle 67	Avenida José Celestino Mutis	Engativá	T2



Para la selección del tramo de prueba se tuvo en cuenta que el tramo escogido cumpliera las siguientes características:

- Corredor vial con tráfico uniforme.
- Tráfico significativo de vehículos mixtos (autos, buses, camiones).
- Vía en mal estado.
- Intervención de impacto moderado de acuerdo a la zona de ubicación.

## LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

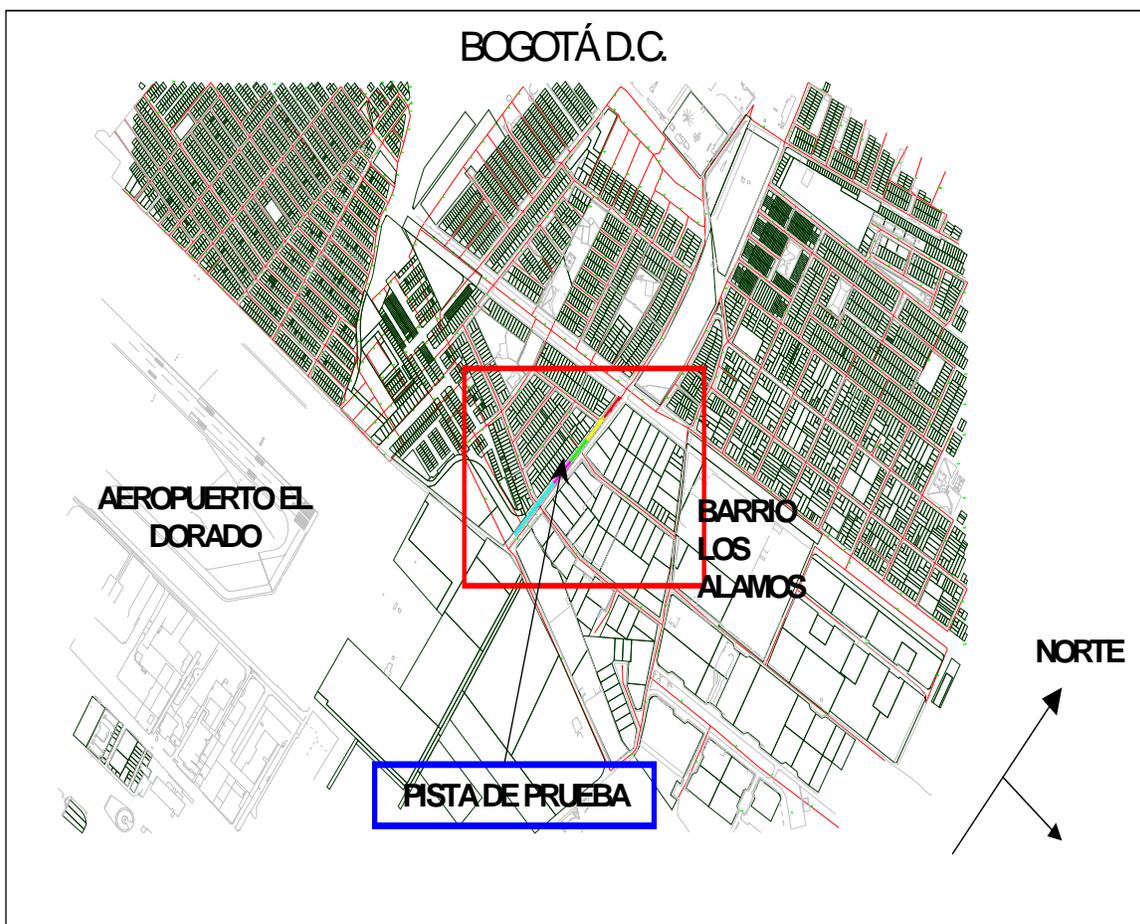


Figura 7.8. Localización General de la pista de prueba.



**Tramo a Intervenir:** la carrera 96 esta compuesta por dos calzadas con separador intermedio, el ancho de cada calzada varía entre 7 y 7.2 mts, es una vía compuesta por una carpeta asfáltica en pésimo estado producto de la falta de mantenimiento y el tráfico de vehículos de transporte urbano. El tramo a intervenir es la calzada que conduce el tráfico desde la calle 67 hacia la avenida José Celestino Mutis en sentido norte-sur cuya longitud es de 270 mts (Figura 1).

## 7.2. Caracterización de la Subrasante y las capas granulares

Para llevar a cabo la construcción de la pista de prueba, fue necesario primero caracterizar la estructura de pavimento existente. Para esto fueron realizados 4 apiques a lo largo del corredor, distanciados cada uno por 85 m. A las muestras obtenidas de los apiques se le realizaron los ensayos básicos de caracterización, para determinar sus propiedades índices, adicionalmente fueron realizados tanto para los materiales granulares como de subrasante ensayos de módulos resilientes.

Para caracterizar el tramo seleccionado se realizaron 4 apiques ubicados de la siguiente manera:

Apique 1: Se realizó a 50 mts a partir de la calle 67.

Apique 2: Se realizó a 135 mts a partir de la calle 67, es decir a 85 mts del anterior.

Apique 3: Se realizó a 220 mts a partir de la calle 67.

Apique 4: Se realizó a 305 mts a partir de la calle 67.

Estructura granular: **Se tomaron dos (2) muestras alteradas en cada apique.**

Subrasante: Se tomó una(1) muestra con tomamuestra de pared delgada (shelby) de cada apique.

Para la caracterización de la estructura granular se llevaron a cabo los siguientes ensayos en laboratorio:



1. Modulo resiliente.
2. Análisis granulométrico por tamizado.
3. Desgaste máquina de los Ángeles.
4. Contenido de finos.
5. Azul Metileno.
6. Límites de Atterberg.
7. Densidad Proctor.

Para la caracterización de la subrasante se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

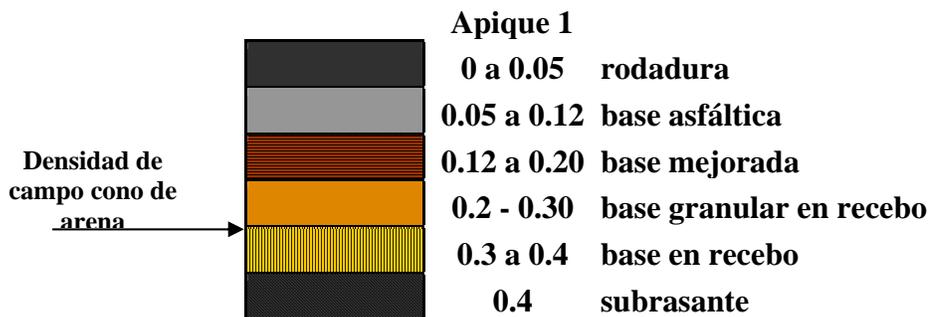
1. Modulo resiliente.
2. Análisis granulométrico por hidrómetro.
3. Límites de Atterberg.
4. Densidad.
5. Humedad natural.

### 7.2.1. Apique #1



**Figura 7.3. Toma de muestra de subrasante y colocación de mezcla asfáltica en el apique No. 1**

Como se indicó anteriormente este apique se ubicó a 50 mts con respecto a la calle 67, y se encontró la siguiente estructura.



**Figura 7.4. Estructura apique No. 1**

### 7.2.2. Apique #2

El apique #2 se ubicó a 135 mts con respecto a la calle 67.



**Figura 7.5. Toma de muestra de subrasante y aspecto de la base asfáltica**



## ESTRUCTURA ENCONTRADA

La estructura existente en el apique 2 se detalla a continuación:

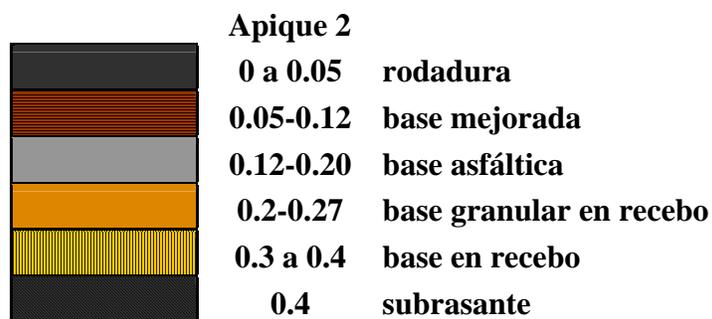


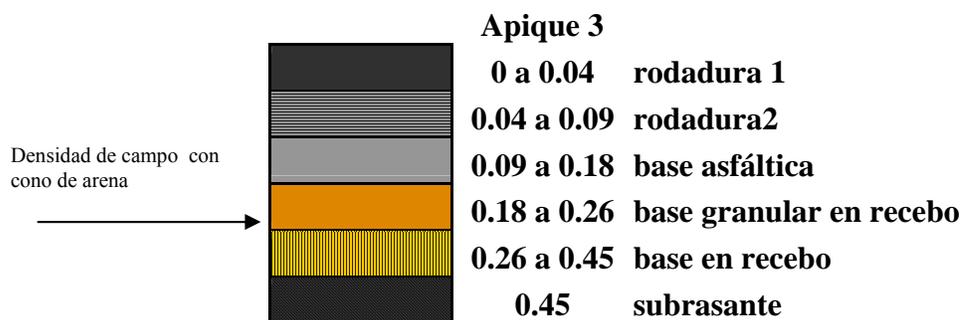
Figura 7.6 . Estructura del apique No. 2

### 7.2.3. Apique #3

El apique #3 se ubicó a 220 mts con respecto a la calle 67. La estructura existente en el apique 3 se detalla a continuación:



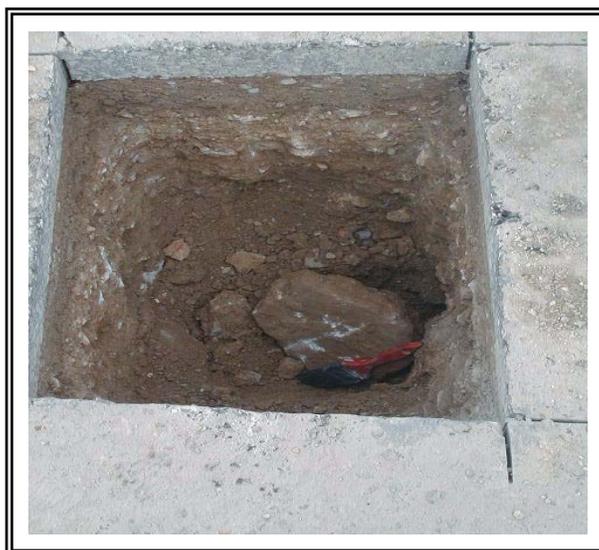
Figura 7.7. Colocación de la mezcla asfáltica en el apique No. 3 y aspecto de la subrasante existente



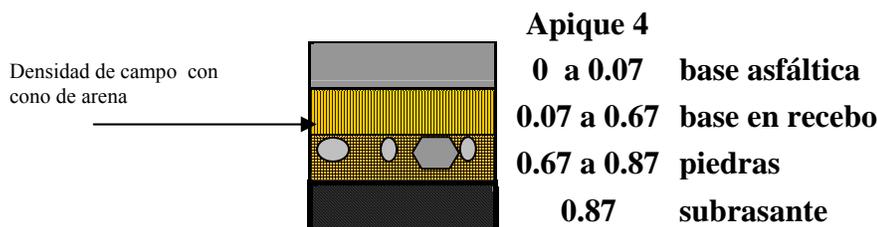
**Figura 7.8. Estructura del apique No. 3**

#### 7.2.4. Apique #4

La estructura existente en el apique 4 se detalla a continuación:



**Figura 7.9. Estrato con alto porcentaje de pétreos a izquierda y toma de muestra con shelby a la subrasante a derecha**



**Figura 7.10. Estructura del apique No. 4**

**7.2.5. RESUMEN DE RESULTADOS DE LABORATORIO**

	<b>APIQUES</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Caracterización de Capas Granulares</b>				
1. Módulo resiliente Kg/cm <sup>2</sup>	646 x ^ 0.1383	828.26 x ^ -0.0556	670 x ^ -0.2301	787 x ^ 0.0216
2. Analisis granulométrico por tamizado	VER ANEXOS			
3. Desgaste máquina de los angeles%	55.2	50.7	54.4	21
4. Contenido de finos (% que pasa 200)	33.04	30.53		21.51
5. Azul de metileno (índice de azul de metileno) %	0.31	0.45	0.36	0.45
6. Límites de Atterberg				
LP	NP	12.51	NP	13.59
LL	NP	21.8	NP	22.2
IP		9.29		8.61
7. Proctor ton/m <sup>3</sup>	2.05	2.04	2.06	2.07
8. Densidad de campo seca (g/cm <sup>2</sup> )	1.82	1.98	1.98	2.66
9. Humedad natural	8.26	8.82	7.16	7.56
<b>Caracterización de la Subrasante</b>				
1. Módulo resiliente Kg/cm <sup>2</sup>	106 x ^ - 0.2524	134 x ^ 0.0283	93.39 x ^ 0.2541	113 x ^ 0.0937
2. Analisis granulométrico por hidrómetro	VER ANEXOS			
3. Límites de Atterberg				
LP	72.43	73.47	70.18	71.03
LL	110.2	107.5	109.7	110.4
IP	37.8	34	39.5	39.3
4. Clasificación fracción fina	OH	OH	OH	OH
4. Humedad natural	92.96	82.12	70.97	69.62
5. Gravedad específica de agregados finos	2.21	2.2	2.15	2.16

Para mayores detalles sobre los ensayos ver anexos.



## 8. Producción de Asfalto Modificado con Caucho en Planta Piloto

### 8.1. Mezcla Seleccionada

De acuerdo a los requisitos exigidos en las especificaciones de Caltrans, se escogió una mezcla con un contenido de caucho de 18%, la cual fue modificada en la planta piloto a 163°C con un tiempo de mezclado de 25 minutos, con lo cual se obtienen valores de viscosidad Brookfield entre 2000 y 2500 cP.

De los ensayos de reología en el DSR (Dinamic Shear Rheometer) esta mezcla presenta temperaturas de falla entre 74 y 76 °C sin envejecimiento, y entre 65 y 70 °C para procesos de envejecimiento de RTFO.

Las características físicas y reológicas de la mezcla seleccionada se presentan a continuación:

**Figura 8.1. Características Físicas y Reológica de la mezcla Seleccionada**

Característica	Valor
Porcentaje de Caucho incorporado (%)	18
Tiempo de mezcla (min)	25
Viscosidad Brookfield (cP)	2000-2500
Temperatura de Falla sin envejecimiento (°C)	74-76
Temperatura de Falla con envejecimiento RTFO (°C)	65-70
Temperatura de Falla con envejecimiento PAV (°C)	16 - 16,5

### 8.2. Planta Piloto de Modificación de Asfaltos

Para la selección de tecnologías aplicadas al proceso de modificación de asfaltos con caucho en planta piloto, hay que tener en cuenta que se deben mantener las condiciones de proceso lo más cercanas a las que se utilizaron durante la experimentación en el laboratorio, esto con el fin de obtener resultados de la escala mayor que sean comparables a los obtenidos en el laboratorio.



El proceso de modificación de asfalto que se realizó en la planta piloto tuvo tres condiciones limitantes principalmente; la primera fue la temperatura de trabajo la cual fue de máximo 200°, teniendo en cuenta que la temperatura de proceso tuvo que ser controlada y mantenida constante a 155°C.

La segunda condición que hay que tener en cuenta es el volumen por bachada que se maneje, el cual se ha definido de 55 galones.

La tercera es la velocidad y el tipo de agitación que se implemente para la homogenización de la mezcla.

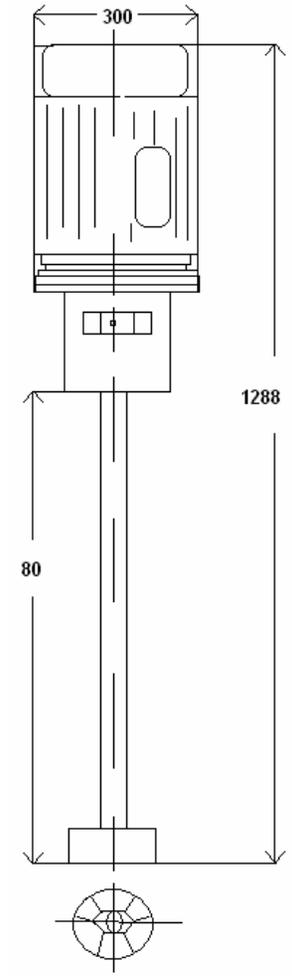
De acuerdo a lo anterior se seleccionó un tanque de mezclado y un equipo mezclador que cumplieran con las características requeridas.

A continuación se presentan las especificaciones principales de los equipos seleccionados.

#### Equipo Mezclador:

- Mezclador tipo turbine que permite y asegura flujo axial.
- Temperatura máxima de trabajo es de 200°C.
- Motor de 5 HP con Arrancador directo .Incluye contactor de bobina a 220V .
- Velocidad de agitación: 1800 rpm.
- Material de construcción: Acero Inoxidable AISI 304.

Las figuras 8.2 y 8.3 muestran un bosquejo del equipo. Las medidas están dadas en centímetros.



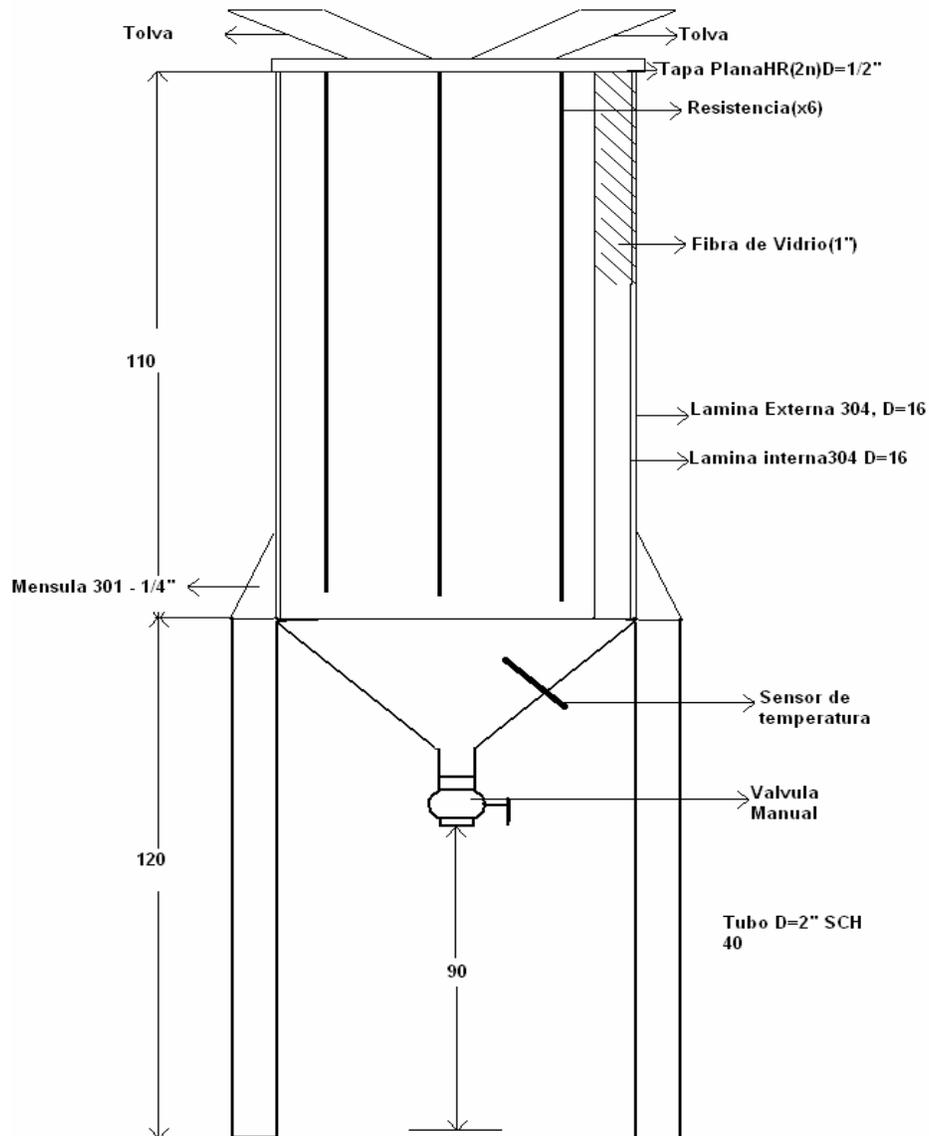
**Figura 8.2. Bosquejo de Mezclador**

### Características del Tanque de Mezcla

- Capacidad de 55 galones de fluido.
- Material: Lámina de Acero Inoxidable 100%, calidad 304 ó calibre 16.
- Tapa plana.
- Dos tolvas alimentadoras ubicadas en la tapa para la alimentación del asfalto fundido y del caucho. También sirven para el desfogue de gases.
- Control de temperatura mediante panel de control eléctrico.
- Altura desde el suelo hasta salida del material modificado: 1.2 m



La figura 8.3 muestra un bosquejo del tanque. Las medidas están dadas en centímetros.



**Figura 8.3. Bosquejo tanque de mezclado**

### 8.3.Planta Piloto

Los equipos correspondientes a la planta piloto, es decir el mezclador y el tanque reactor fueron instalados en Patria S.A, ya que las instalaciones presentan mayores facilidades en



cuanto al manejo del asfalto a la hora de llevar a cabo la modificación y cuando se hace la mezcla asfáltica.

Las condiciones determinadas para la operación del equipo de modificación se resumen a continuación

**Tabla 8.2. Dosificación y condiciones de operación de planta piloto**

<b>DOSIFICACION y CONDICIONES DE MODIFICACION</b>		
Volumen Total	(gal)	55
Tiempo total modificación / Batch	(min)	45
Kg mod./batch neto	(kg)	215
Kg mod./batch con pérdida	(kg)	204
Volumen asfalto /batch	(gal)	47
Masa de asfalto/batch	(kg)	182
Masa de caucho / batch	(kg)	33
Densidad del asfalto caucho modificado (Kg/m <sup>3</sup> )		1040
Cantidad requerida de asfalto modificado ( m <sup>3</sup> )		5.26
Cantidad requerida de asfalto modificado (Kg)		3464
Numero batch requeridos		27
Dias de 8 horas		3
Tiempo total modificación	(h)	21
<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>		
Temperatura de operación	(°C)	160
Temperatura máxima permitida	(°C)	200
Temperatura de arranque del motor	(°C)	140
Velocidad	(rpm)	1800
Capacidad volumétrica	(gal)	55

A continuación se presentan fotografías sobre los equipos utilizados y la ubicación del mezclador en planta.



- **Tanque**



**Figura 8.4. Tanque reactor con motor y tolvas de alimentación**



**Figura 8.5. Tolva de alimentación del caucho**



**Figura 8.6. Válvula de salida del reactor**



**Figura 8.7. Panel de Control**



- Mezclador.



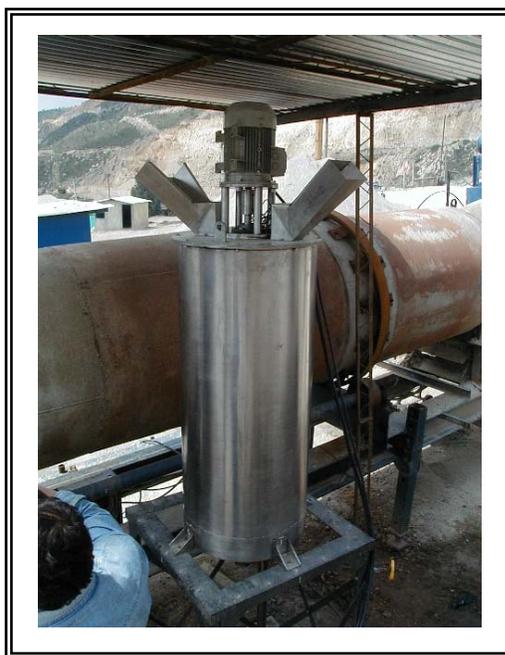
**Figura 8.8. Motor del mezclador**



**Figura 8.9. Mezclador**



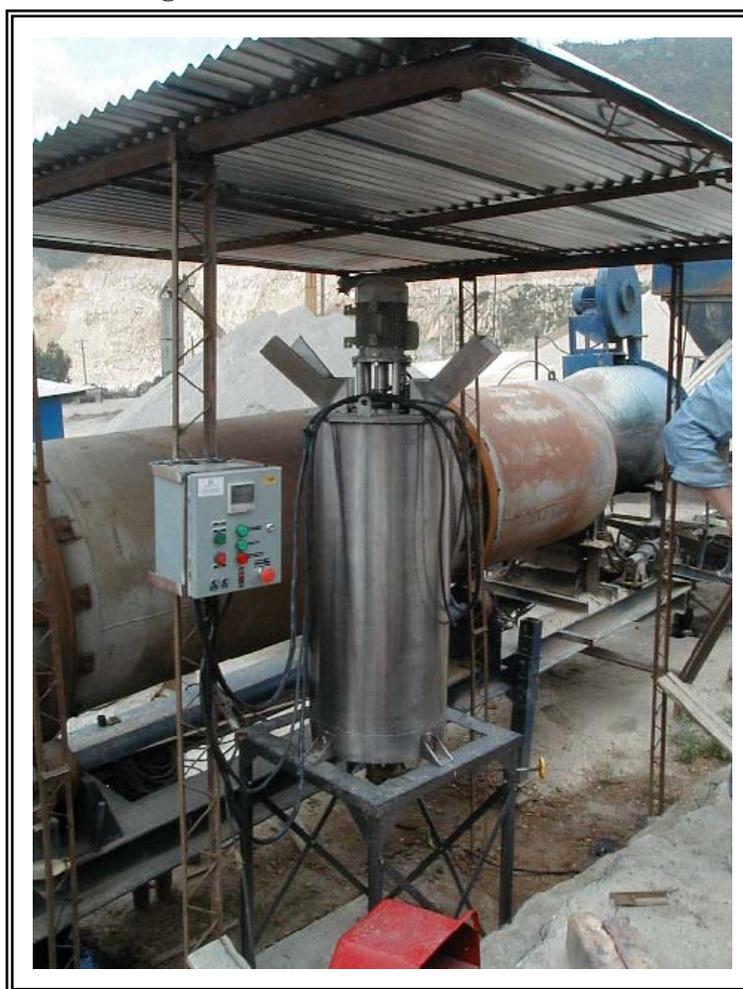
**Figura 8.10. Impeler del mezclador**



**Figura 8.11. Base del reactor anclada en la placa**



**Figura 8.12. Reactor de Modificación**



**Figura 8.13. Planta Piloto de modificación de asfaltos**



## **8.4. Operación Planta Piloto de Modificación de Asfaltos**

### **8.4.1. Preliminares**

La operación de la planta piloto de modificación de asfalto se hace con el fin de obtener la cantidad de asfalto-caucho requerida para el tramo correspondiente al asfalto caucho modificado por vía húmeda, en total son 3518 Kg. Sin embargo en la planta de elaboración de mezcla asfáltica hay un desperdicio de asfalto debido al almacenamiento y pérdidas en tuberías y accesorios, de dos toneladas de asfalto-caucho. Es decir, en total se requiere la producción de 5518 Kg de asfalto en la planta piloto de modificación. Esta cantidad es suficiente para que se alcance un nivel de asfalto en el tanque de almacenamiento y la descarga del material se haga por gravedad.

La cantidad de caucho a incorporar para obtener el asfalto –caucho corresponde al 18% w/w del asfalto. La capacidad efectiva del reactor es de 55 galones, por lo tanto para que se cumpla la relación caucho – asfalto del 18% w se requieren 182 kg de asfalto (47 gal) y 33 kg de caucho. El número de baches requeridos para modificar la cantidad requerida es de 27, teniendo en cuenta un 5% de desperdicio de material en el tanque reactor.

### **8.4.2. Calibración Equipos**

#### **8.4.2.1. Dosificación de Caucho**

Los 23.8 kg de ripio son incorporados manualmente un operario con la ayuda de un balde. El balde tiene una capacidad de 3.4 Kg de ripio hasta el aforo. En total son 7 cubos.

#### **8.4.2.2. Dosificación del Asfalto**

Para llevar a cabo el control de la cantidad de asfalto para incorporar en el tanque se implementaron dos procedimientos. El control por medición de la altura de asfalto en el tanque y por medición del tiempo de incorporación del asfalto.



---

#### 8.4.2.3.Sensor Nivel

El control de nivel del asfalto en el tanque se llevó a cabo por medio de una alarma de nivel. El sensor tiene tecnología de radio frecuencia, el cual no presenta problemas por las altas temperaturas de operación y las dificultades para labores de mantenimiento que se encuentran debido a las características de adherencia del asfalto-caucho.

El set de altura determinado para el asfalto es de 36 cm limpios desde el borde superior del tanque hacia abajo, esta altura permite completar los 47 galones de asfalto requeridos para cada lote de modificación .

Se llevaron a cabo pruebas para asegurar la repetibilidad de la medición y se encontraron resultados satisfactorios.

#### 8.4.2.4.Control por tiempo

El tiempo de incorporación del asfalto al tanque de reacción teniendo la válvula del tanque de almacenamiento del asfalto totalmente abierta es de 2 minutos 30 segundos aproximadamente. El conocimiento de este tiempo proporciona mayor información para poder controlar más eficientemente la válvula de alimentación del asfalto, ya que da un aviso para cerrarla en el momento correcto para que la cantidad de asfalto que queda en las tuberías y baja al reactor por escurrimiento, no sobrepase la que se tuvo en cuenta para determinar la altura limpia que mide la alarma de nivel.

#### 8.4.2.5.Acople de planta piloto a la planta de producción de mezclas asfáltica. Instalación de Tuberías

Una vez se determinaron las condiciones de operación de los instrumentos, se hizo un acople entre la tubería de salida del tanque de modificación de asfaltos y la bomba para



asfalto de la planta. Se implementó un sistema de by-pass que permitía llevar a cabo la alimentación del asfalto desde el tanque número uno hasta al tanque reactor. Una vez terminara la operación de modificación, el asfalto-caucho era bombeado y almacenado en el tanque número 2.

## **8.5. Consideraciones de Seguridad y Operabilidad**

Para llevar a cabo la operación de la planta piloto de modificación de asfaltos de una manera segura, se requiere tener en cuenta condiciones ambientales y de insumos como del personal que la opere.

### **8.5.1. Condiciones para tener un proceso seguro**

- Factores Ambientales

No debe trabajarse si el tanque reactor, o el material aislante contenido en el espacio entre los tanques interno y externo está húmedo. Si es así, el tanque debe secarse en vacío a una temperatura de 40°C hasta que deje de salir vapor de agua por los desfuegos del reactor.

El agua al tener contacto con el asfalto se evapora súbitamente y explota, lo cual puede causar accidentes, como el desbordamiento del contenido asfáltico del tanque.

Si es necesario hacer un refugio especial para resguardar del agua al reactor, en caso que este ubicado a la intemperie.

Una vez se este llevando a cabo la modificación se debe tener una excelente ventilación permanente, ya que durante el proceso de reacción hay generación de gases.

- Condiciones de Insumos

Los materiales que se vayan a incorporar como modificadores del asfalto deben estar perfectamente secos.



---

## **8.5.2. Implementos de Seguridad del personal**

Las personas que estén presentes durante la modificación del asfalto por vía húmeda, deben tener implementos que los protejan de posibles accidentes.

Equipo requerido:

- Casco
- Overall
- Botas de seguridad
- Gafas de Seguridad
- Tapa boca
- Guantes para protección a altas temperaturas

## **8.6. Metodología de Arranque y Operación**

### **8.6.1. Arranque de planta piloto de modificación de asfaltos**

8.6.1.1. Calentamiento de la línea de alimentación del asfalto

8.6.1.2. Cerrado de válvula de salida del reactor.

8.6.1.3. Programación el panel de control de la temperatura de operación del reactor a 160°C

8.6.1.4. Calentamiento de las válvulas de tanque de almacenamiento (Tanque No. 2).

### **8.6.2. Incorporación Asfalto**

8.6.2.1. Vertimiento del asfalto con la válvula totalmente abierta. La persona encargada de la apertura y cerrado de la válvula debe permanecer al lado de la válvula hasta que suena la alarma de nivel indicando el momento exacto para cerrarla.

8.6.2.2. Comprobación manual del nivel alcanzado en el tanque por el método de la barra.



---

### **8.6.3. Incorporación de Caucho**

8.6.3.1. Puesta en marcha del motor del mezclador.

8.6.3.2. Con el recipiente calibrado se lleva a cabo la incorporación del caucho pulverizado al reactor vertiendo el contenido de un cubo a la vez, permitiendo que haya una homogenización del ripio y el asfalto a medida que se va agregando. Teniendo una agitación constante este proceso de incorporación es más eficiente ya que se evita la floculación de material agregado.

### **8.6.4. Proceso de Reacción**

Una vez se termina el proceso de incorporación del caucho la temperatura del sistema baja de 160°C hasta 140°C aproximadamente, esto es debido a la homogenización de temperatura cuando el caucho es vertido en el reactor.

8.6.4.1. El tiempo que se lleva a cabo el proceso de reacción (30 min), se empieza a contabilizar a partir que el sistema alcanza una temperatura de 150°C. El tiempo que se tarda el sistema en re-estabilizar la temperatura a 160 °C es de 5 minutos a partir de los 150°C.

8.6.4.2. Al completarse los 30 minutos de reacción, el motor del mezclador se apaga en el panel de control.

### **8.6.5. Salida de Bach y almacenamiento del material**

8.6.5.1. Apertura válvula de salida del reactor

8.6.5.2. Apertura válvula de la tubería que va del tanque reactor a la bomba

8.6.5.3. Encendido de la bomba

8.6.5.4. Apertura de válvula del tanque de almacenamiento asfalto – caucho. Tanque No 1.

8.6.5.5. Succión del asfalto del reactor y almacenamiento del material.



### 8.6.6. Tiempos de arranque y operación de la planta piloto de modificación de asfaltos

<i>Actividad</i>		<i>Duración (min.)</i>	
<b>8.6.1</b>	8.6.1.1	5	12
	8.6.1.2	1	
	8.6.1.3	1	
	8.6.1.4	5	
<b>8.6.2</b>	8.6.2.1	2.5	5.5
	8.6.2.2	3	
<b>8.6.3</b>	8.6.3.1	-	7
	8.6.3.2	7	
<b>8.6.4</b>	8.6.4.1	5	35
	8.6.4.2	30	
<b>8.6.5</b>	8.6.5.1	1	10.5
	8.6.5.2	1	
	8.6.5.3	0.5	
	8.6.5.4	1	
	6.6.5.5	7	
<b>Modificación 1 Bach</b>		<b>70 min.</b>	

### 8.7. Primeras Pruebas de Modificación

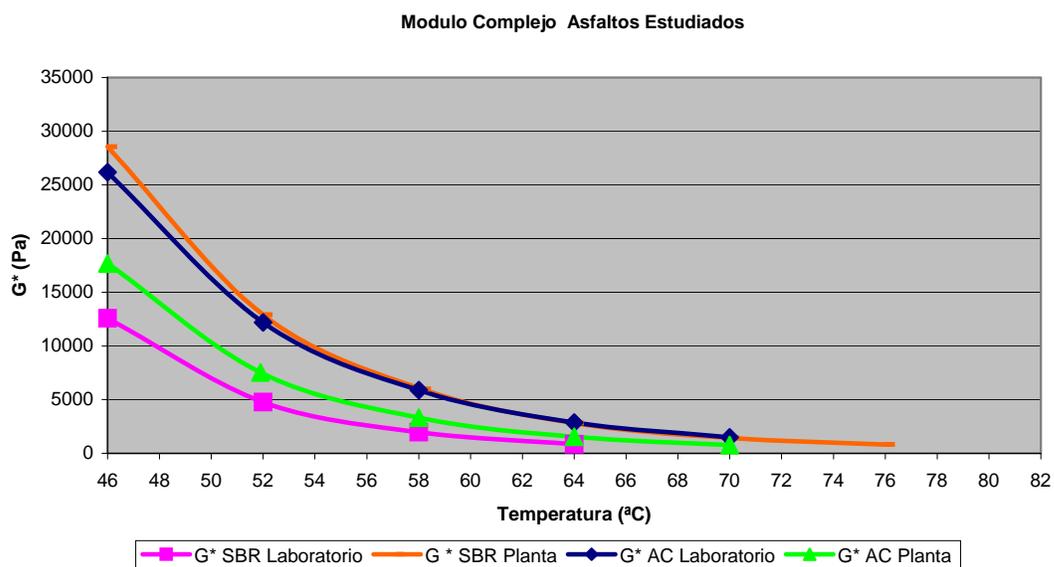
Al incorporar el 18 % en peso de caucho al reactor y llevar a cabo la modificación se obtuvo un asfalto-caucho demasiado viscoso, el cual taponó las tuberías y no permitió el libre flujo a través de la bomba hacia el tanque de almacenamiento. Por esta razón se decidió cambiar la dosificación obtenida en laboratorio por una cantidad de caucho correspondiente al 10.7% en peso.

Bajo esta consideración las propiedades reológicas obtenidas son buenas y no se presentan inconvenientes operacionales.

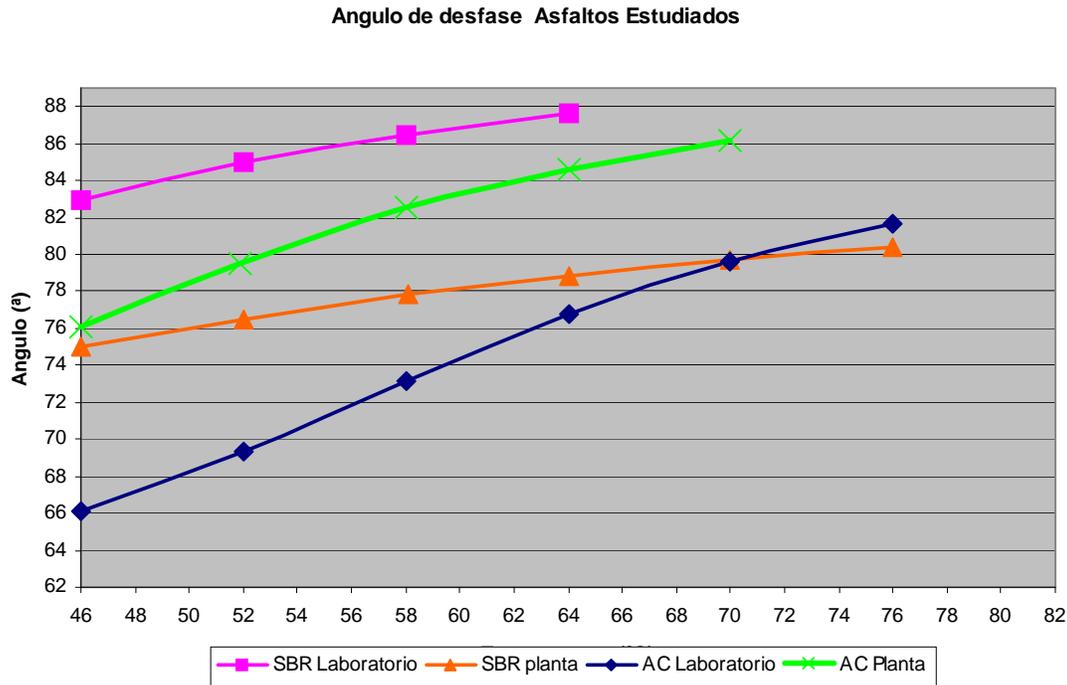


### 8.7.1. Evaluación Reológica de las muestras obtenidas

A continuación se presentan las gráficas de la caracterización reológica que se le aplico al asfalto-caucho modificado en planta y en el laboratorio.



**Figura 8.84. Comparación de Módulos Dinámicos de los asfaltos modificados con SBR y caucho, en planta y en laboratorio.**



**Figura 8.15. Ángulos de desfase de los asfaltos modificados con SBR y caucho , en planta y en laboratorio.**

**Tabla 8.3. Resultados de la caracterización reológica Asfalto-caucho**

**AC LABORATORIO**

T(°C)	G*(Pa)	Delta(°)	G*/send (Kpa)
46	26190	66,13	28,64
52	12190	69,31	13,03
58	5872	73,11	6,14
64	2860	76,73	2,94
70	1490	79,58	1,51
76	824,4	81,65	0,83

**T<sub>Falla</sub> 74,3 °C**

**Tabla 8.4. Resultados de la caracterización reológica asfalto con polímero SBR****SBR LABORATORIO**

<b>T(°C)</b>	<b>G*(Pa)</b>	<b>Delta(°)</b>	<b>G*/send (Kpa)</b>	
46	11,896	82,93	12,69	
52	11,98	84,97	4,794	<b>T<sub>Falla</sub> 62,9 °C</b>
58	11,95	86,49	1,954	
64	12,091	87,63	0,8497	

**Tabla 8.5. Resultados de la caracterización reológica Asfalto-caucho****AC PLANTA**

<b>T(°C)</b>	<b>G*(Pa)</b>	<b>Delta(°)</b>	<b>G*/send (Kpa)</b>	
46	17670	76,05	18,21	
51,9	7525	79,53	7,65	
58	3306	82,59	3,33	
64	1533	84,6	1,54	<b>67,7 °C</b>
70	758,9	86,13	0,76	

**Tabla 8.6. Resultados de la caracterización reológica Asfalto-caucho****SBS PLANTA**

<b>T(°C)</b>	<b>G*(Pa)</b>	<b>Delta(°)</b>	<b>G*/send (Kpa)</b>	
46	28550	74,97	29,56	
52	12910	76,52	13,28	
58,1	5993	77,89	6,13	
64	2818	78,84	2,87	
70	1438	79,73	1,46	
76	817,2	80,41	0,83	<b>T<sub>Falla</sub> 74,1 °C</b>



Con base a las pruebas reológicas se decidió aumentar el tiempo de reacción de 25 minutos fijados a partir de la experimentación en el laboratorio, a 30 minutos para que hubiera una mejor dispersión del caucho en el asfalto.

#### 8.7.1.1. Ajustes de Dosificación y condiciones de proceso

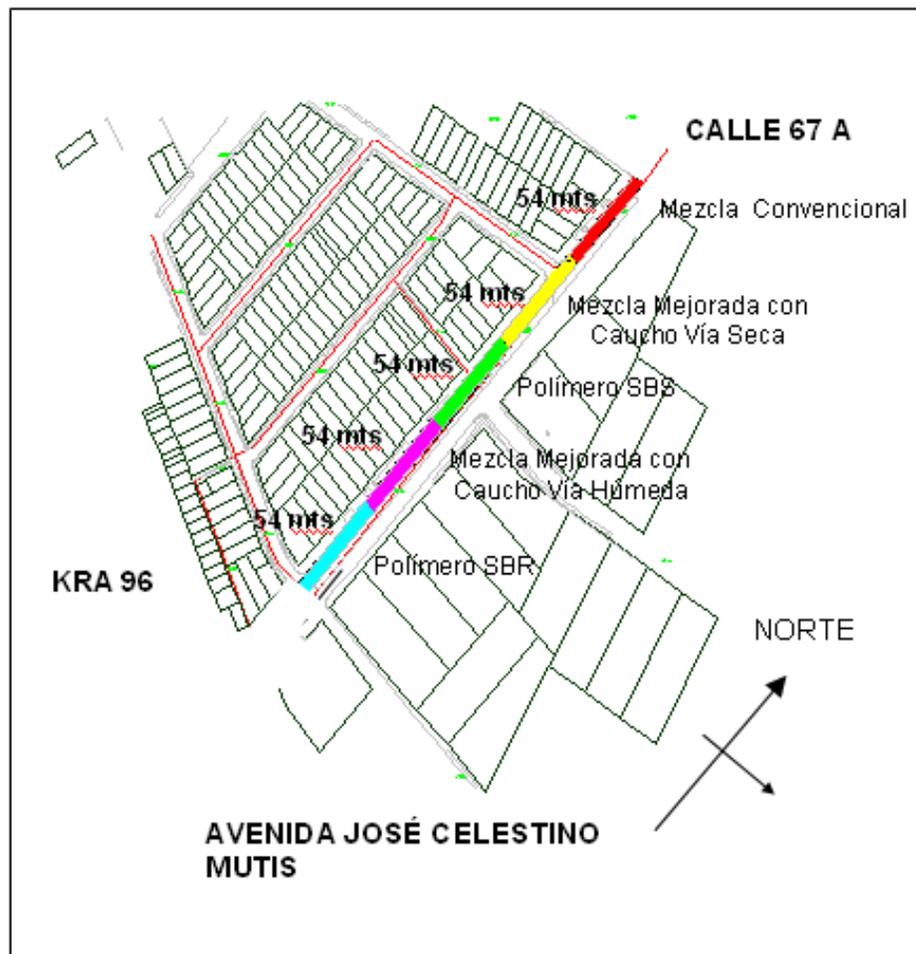
**Tabla 8.5. Condiciones generales de operación de planta piloto**

<b>DOSIFICACION y CONDICIONES DE MODIFICACION</b>	
Volumen Total Efectivo(gal)	55
Tiempo total / Batch (min)	60
Kg mod./batch neto (kg)	215
Kg de pérdida total de 3 días de operación(kg)	32
Batch totales de pérdida(No.)	0.15
Volumen asfalto /batch (gal)	47
Masa de asfalto/batch (kg)	182
Masa de caucho / batch (kg)	33
Densidad del asfalto caucho (Kg/m3)	1040
Numero batch requeridos	27



## 9. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA PISTA DE PRUEBA

El orden de colocación de las mezclas fue definido principalmente por el orden y facilidad en la producción en planta. La mezcla con asfalto caucho por proceso húmedo fue una de las últimas en extender sobre el tramo de prueba. La razón principal fue la capacidad de modificación con la que se contó, dado que se utilizó un reactor de 55 galones de capacidad, el asfalto fue modificado por bacheo, y almacenado hasta contar con la cantidad requerida para extender los 54 ml de mezcla que le correspondían a este subtramo.





## 9.1. ACTIVIDADES PREELIMINARES



Dentro de las actividades preeliminares al inicio de la obra se encuentran la implementación del plan de manejo de tráfico, acompañadas de los programas social y ambiental.

El plan de manejo social desarrollado en gran parte en la etapa previa al inicio de la obra; actividades como la elaboración de las actas de vecindad, la reunión de inicio de obra entre otras mas actividades fueron llevadas a cabo como requisito para el inicio de obra.



## 9.2.FASES DE CONSTRUCCIÓN

### 9.2.1. FRESADO



La primera etapa para la construcción de la pista de prueba fue el fresado, el cual consistió en cortar 17 cm del pavimento existente, mezclar 10 cm de material fresado con la base existente, y botar los 7cm restantes con el fin de mantener las cota iniciales de rasante.

### 9.2.2. EXTENSIÓN, SERIADO Y COMPACTACION





La etapa posterior al fresado fue la reconfiguración de la base granular mejorada con el material reciclado. El espesor de la capa de base mejorada fue de 10 cms, para la compactación de la misma se utilizó un compactador de rodillo liso vibratorio.

La densidad optima para el material mezclado fue de 1.93 ton/m<sup>3</sup>, con un contenido de humedad de 7.2%. Datos que se verificaron en campo mediante densímetro nuclear, alcanzándose una densidad del 95%.

### 9.3.MEDICIÓN DE DEFLEXIONES ANTES DE COLOCACIÓN DE MEZCLAS

Teniendo en cuenta los apiques realizados al inicio del proyecto, en los que se observó poca uniformidad de la estructura del pavimento a lo largo del tramo de prueba, y los diferentes tipo de subrasantes encontradas.

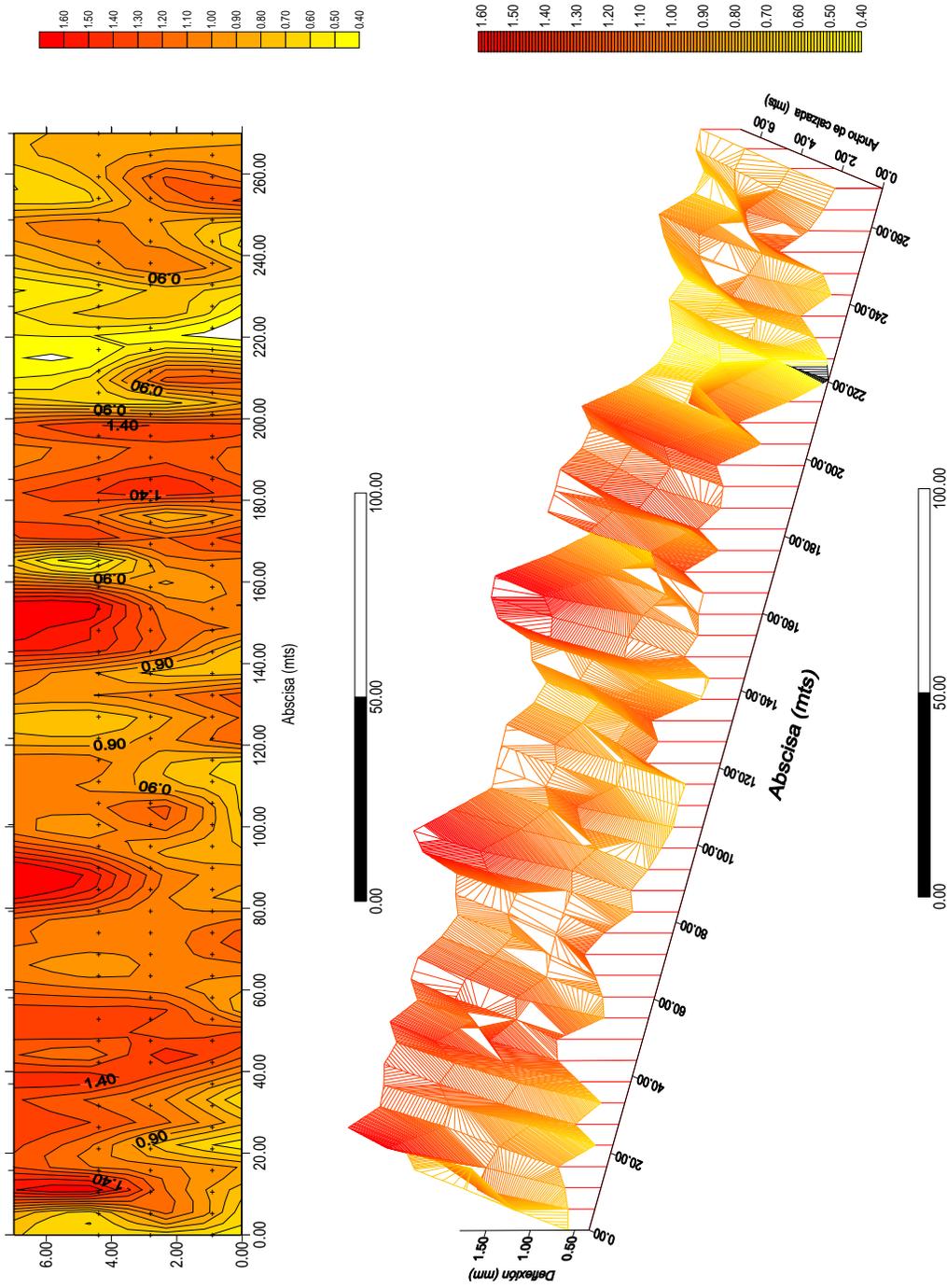
Se consideró pertinente realizar mediciones de deflexiones con viga Venkelman a la altura de la base mejorada. Estas mediciones se realizaron cada 5 metros a los largo de los ejes de las huellas de los vehículos. De esta forma contar con datos de deflexiones iniciales y tomarlos como referencia para la etapa de seguimiento de la pista de prueba.



Los resultados de las deflexiones obtenidas se muestran en la siguiente página.



# SUPERFICIE DE CONTORNO DE DEFLEXIONES MÁXIMAS BASE RECICLADA



Medidas tomadas mediante viga Benkelman Nov-04



### 9.3.1. COLOCACION DE MEZCLA CONVENCIONAL

Culminada la base mejorada con material reciclado, el paso a seguir fue la imprimación de la base. Teniendo imprimada esta última se procedió a colocar las diferentes mezclas.

La primera mezcla que se colocó fue la convencional con asfalto de barranca 80-100, cumpliendo con la longitud de los tramos acordados de 54 mts cada uno, al igual que el espesor de 7 cms para todos los tramos.



Para la colocación de todas las mezclas se utilizó una finisher de 3.5mts de ancho con capacidad para colocar mezcla a una velocidad de 5 km/h. Para la compactación de las mezclas se utilizaron dos compactadores; un vibrocompactador de rodillo liso que hacía las veces además de compactador estático, y un compactador de llantas el cual se utilizaba para dar el acabado final con la función de sellar la superficie. Para cada tramo fueron aplicadas tres pasadas de cada tipo de compactador, esto de acuerdo con el tren de carga practicado previa colocación de cada mezcla sobre la pista.



La temperatura de llegada de la mezcla fue de 144°C y la de compactación de 135°C.

### 9.3.2. COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA PROCESO VIA SECA



La temperatura de llegada de la mezcla fue de 160°C y la de compactación de 155°C.

Esta mezcla tuvo un tratamiento especial en cuanto a la compactación, debido a la elasticidad del GCR, se encuentra referenciado en la literatura que el GCR produce un efecto de recuperación, que contrarresta el grado de compactación obtenido, a medida que



la temperatura de la mezcla disminuye. Por esta razón es recomendable mantener el proceso de compactación hasta que la mezcla alcance bajas temperaturas (60°C). Razón por la cual requirió el paso del compactador hasta que alcanzó una temperatura de 60 °C.

### 9.3.3. COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA CON POLÍMERO SBS



Para esta mezcla la temperatura de llegada de la mezcla fue de 164°C y la de compactación de 154°C.

### 9.3.4. COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA PROCESO VIA HUMEDA





Para esta mezcla la temperatura de llegada de la mezcla fue de 168°C y la de compactación de 162°C.

### 9.3.5. COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA CON POLIMERO SBR



Para esta mezcla la temperatura de llegada de la mezcla fue de 161°C y la de compactación de 155.6°C.



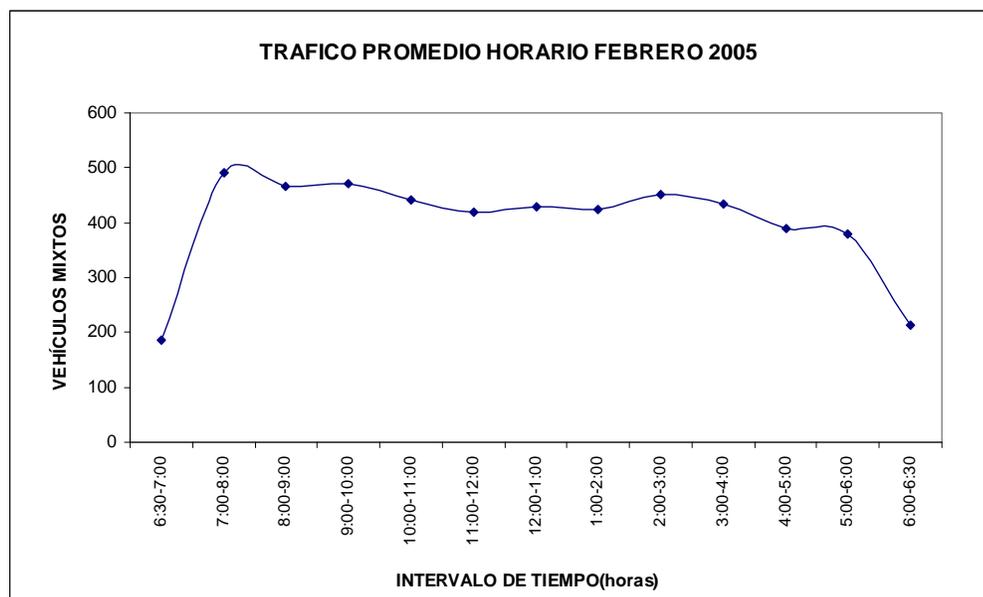
## 10. AUSCULTACIÓN DE LA PISTA DE PRUEBA

### 10.1. Medición de TPD

Las mediciones fueron realizadas cada tres meses discriminando los vehículos que pasaron en un periodo de 12 horas por la pista de prueba. La clasificación se realizó por tipo y número de vehículos en intervalos de 15 minutos. En total se llevaron a cabo 4 mediciones, los resultados se muestran a continuación.

#### 10.1.1. Medición Febrero de 2005

La medición fue realizada el día 23 de febrero de 2005.



**Figura10.1. Perfil de Volumen de Tráfico día hábil sentido N-S.**

En la figura 1 se observa que la hora pico se presenta entre 7 y 8 am alcanzando un volumen de 490 veh mixtos/hora. Durante el resto del día el volumen de tráfico se comporta de manera uniforme fluctuando entre 400 y 470 veh / hora.

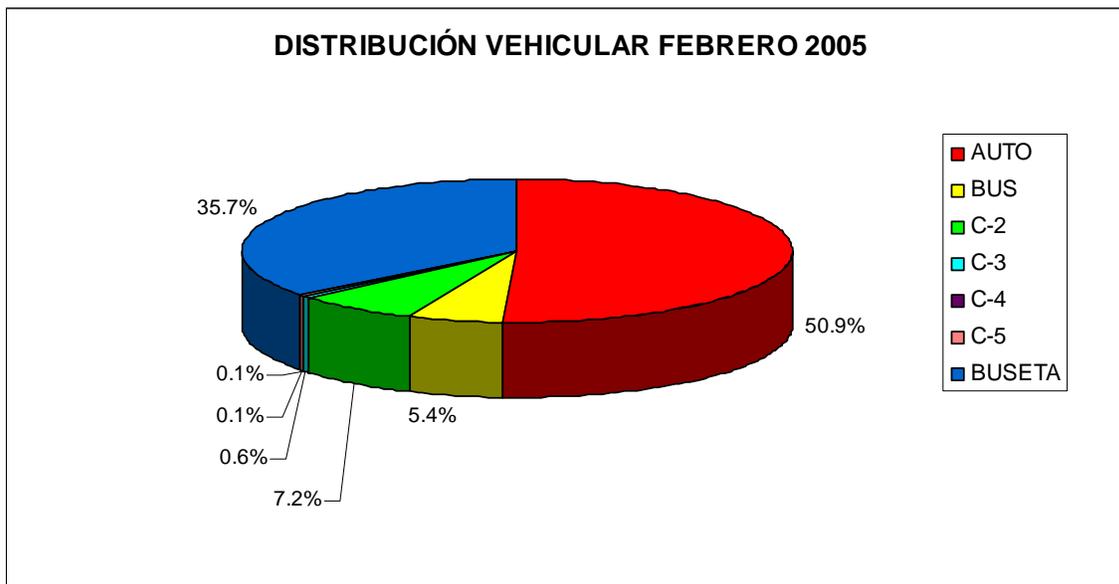


Desde las 6:30 am hasta las 6:30 pm pasaron por el corredor 5197 vehículos mixtos discriminados en los porcentajes que se presentan en la tabla 1 y figura 2.

**Tabla 10.3. Distribución vehicular día hábil sentido N-S.**

**DISTRIBUCIÓN VEHICULAR**

<b>AUTOS</b>	<b>50%</b>
<b>BUSES</b>	<b>6%</b>
<b>BUSETAS</b>	<b>36%</b>
<b>CAMIONES</b>	<b>8%</b>

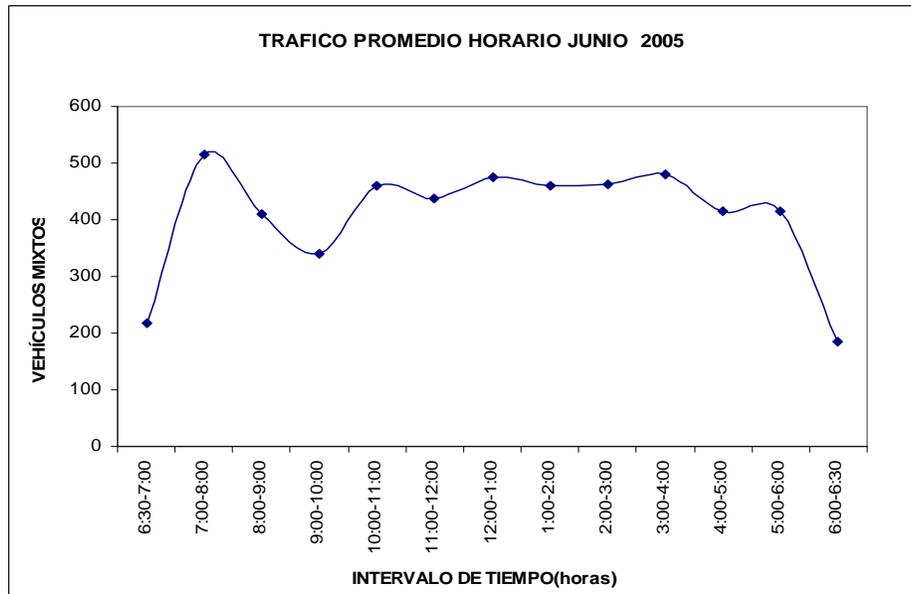


**Figura 10.2. Distribución vehicular día hábil sentido N-S.**



### 10.1.2. Medición 9 de Junio 2005

En la figura 3 se observa que la hora pico se presenta entre 7 y 8 am alcanzando un volumen de 515 veh mixtos/hora. Durante el resto del día el volumen de tráfico se comporta de manera uniforme, destacando un valle entre las 9 y 10 am que alcanza un valor de 341 veh /hora.



**Figura 10.3. Perfil de Volumen de Tráfico día hábil sentido N-S.**

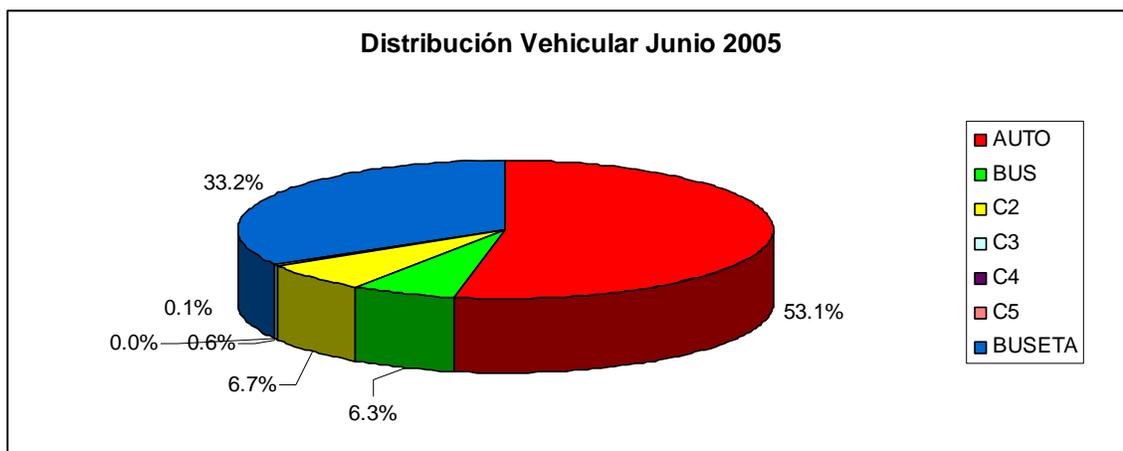
Desde las 6:30 am hasta las 6:30 pm pasaron por el corredor 5034 vehículos mixtos discriminados en los porcentajes que se presentan en la tabla 2 y figura 4.



**Tabla 10.4. Distribución vehicular día hábil sentido N-S.**

**DISTRIBUCIÓN VEHICULAR**

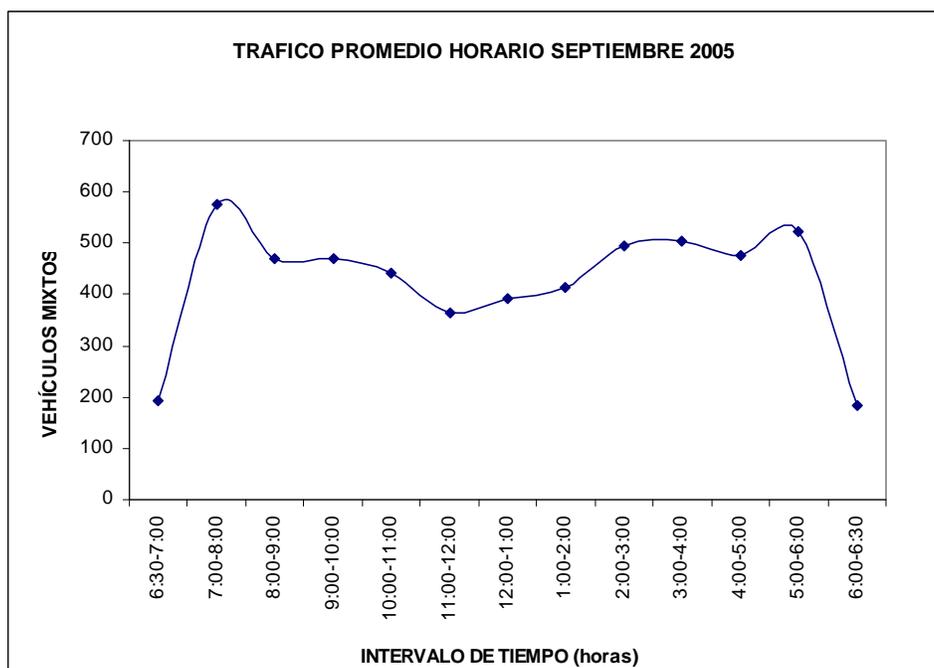
<b>AUTOS</b>	<b>53%</b>
<b>BUSES</b>	<b>6%</b>
<b>BUSETAS</b>	<b>33%</b>
<b>CAMIONES</b>	<b>7%</b>



**Figura 10.4. Distribución vehicular día hábil sentido N-S.**

**10.1.3. Medición 1 de Septiembre 2005**

En la figura 5 se observa que la hora pico se presenta entre 7 y 8 am alcanzando un volumen de 576 veh mixtos/hora. Durante el resto del día el volumen de tráfico se comporta de manera uniforme, destacando un valle entre las 11 y 12 am que alcanza un valor de 365 veh /hora. Al final de la tarde se presenta un pico de 524 veh /hora.



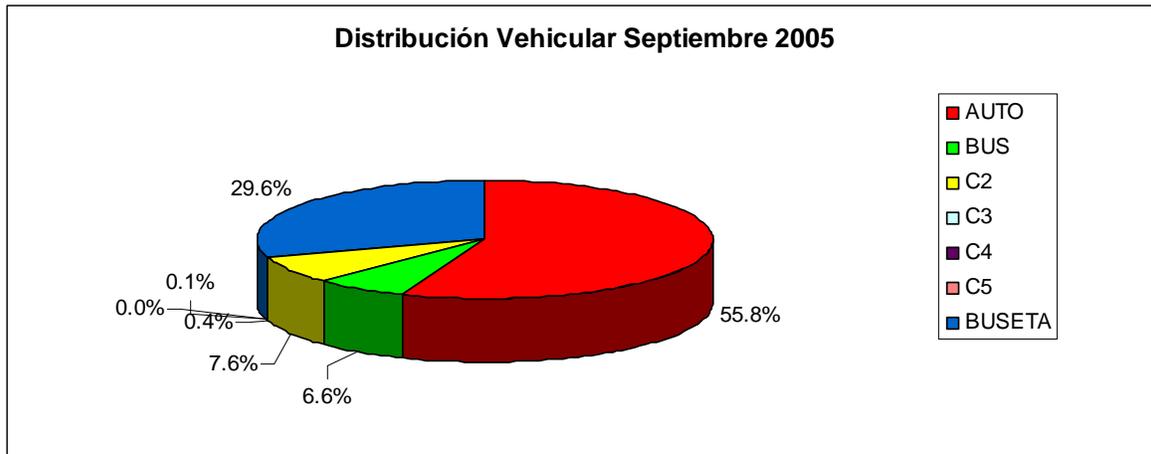
**Figura 10.5. Perfil de Volumen de Tráfico día hábil sentido N-S.**

Desde las 6:30 am hasta las 6:30 pm pasaron por el corredor 5336 vehículos mixtos discriminados en los porcentajes que se presentan en la tabla 3 y figura 6.

**Tabla 10.5. Distribución vehicular día hábil sentido N-S.**

**DISTRIBUCIÓN VEHICULAR**

<b>AUTOS</b>	<b>56%</b>
<b>BUSES</b>	<b>7%</b>
<b>BUSETAS</b>	<b>30%</b>
<b>CAMIONES</b>	<b>7%</b>

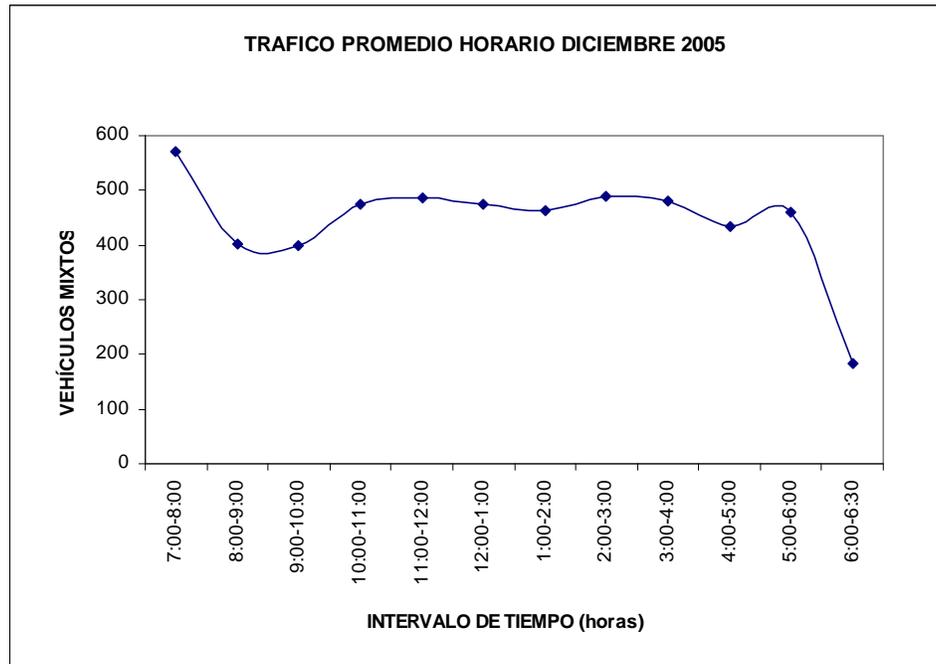


**Figura 10.6. Distribución vehicular día hábil sentido N-S.**

De los aforos de tráfico realizados hasta la fecha se puede observar que los vehículos livianos junto con las busetas representan más del 80% del volumen vehicular que transita por el corredor. Sin embargo se presenta un porcentaje considerable de vehículos pesados tipo C2 (7%).

#### **10.1.4. . Medición 1 de Noviembre 2005**

De manera similar con las anteriores medidas la hora pico se mantiene en el intervalo de 7 a 8am. Durante el resto del día el volumen de tráfico se comporta de manera uniforme, destacando un valle entre las 8 y 10 am que alcanza un valor de 402 veh /hora. En general se muestra un tráfico promedio horario de 450 veh/hora.



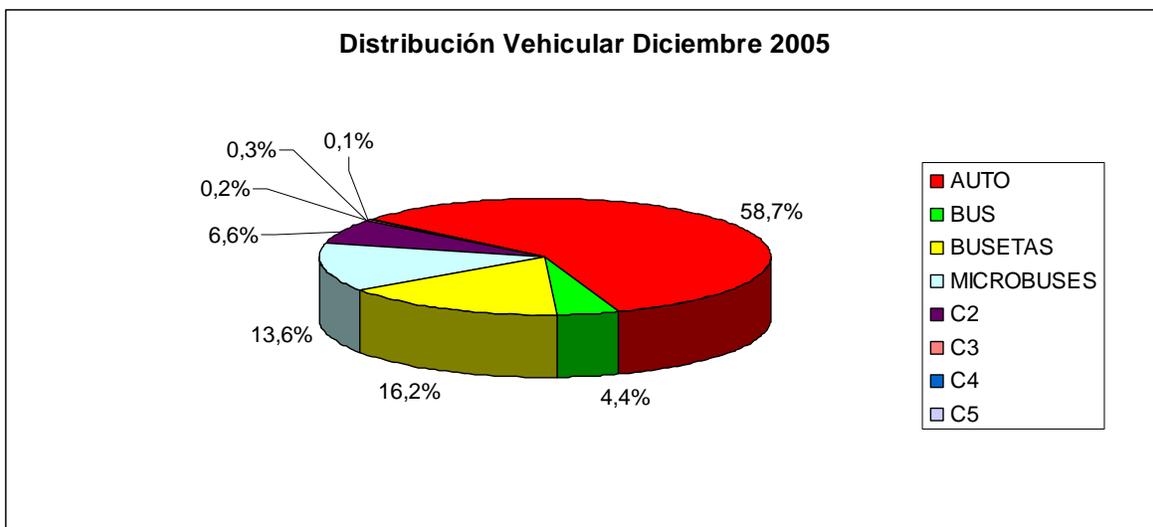
**Figura 10.7. Perfil de Volumen de Tráfico día hábil sentido N-S.**

Desde las 6:30 am hasta las 6:30 pm pasaron por el corredor 5550 vehículos mixtos discriminados en los porcentajes que se presentan en la tabla 10.4 y Figura 10.8. Se observa en la Tabla 10.4 que los vehículos de transporte público están compuestos por un 4% de buses, 14% de microbuses y 16% de busetas. El porcentaje de busetas (busetas + microbuses) en las mediciones anteriores se encuentra en promedio cercano al 30% del total de los vehículos, porcentaje similar al obtenido en esta última medición, de lo cual se puede concluir que esta distribución se ha mantenido, es decir del 30% de busetas contadas, el 15 % han sido microbuses .



**Tabla 10.4. Distribución vehicular día hábil sentido N-S.  
DISTRIBUCIÓN VEHICULAR**

<b>AUTOS</b>	<b>59%</b>
<b>BUSES</b>	<b>4%</b>
<b>MICROBUSES</b>	<b>14%</b>
<b>BUSETAS</b>	<b>16%</b>
<b>CAMIONES</b>	<b>7%</b>



**Figura 10.8. Distribución vehicular día hábil sentido N-S.**

De los aforos de tráfico realizados hasta la fecha se puede observar que los vehículos livianos junto con las busetas y microbuses representan más del 80% del volumen vehicular



---

que transita por el corredor. Sin embargo se presenta un porcentaje considerable de vehículos pesados tipo C2 (7%).

De acuerdo con las mediciones de tráfico realizadas durante el año de seguimiento se ha estimado que pasaron por la pista de prueba cerca de 1'500.000 de vehículos mixtos, distribuidos en los porcentajes antes mencionados.

## **10.2. Medición de Índice de Rugosidad Internacional IRI**

Las medidas de Índice de Rugosidad Internacional-IRI se determinaron mediante levantamiento topográfico sobre las cuatro huellas de la pista.

El procedimiento consistió en tomar medidas de nivel en los 270 mts de longitud que tiene la pista de prueba sobre cada huella longitudinal. Luego estas medidas fueron procesadas en un software diseñado por Universidad para realizar estos cálculos.

En la tabla 4 y en la figura 7 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de IRI en la pista de prueba dentro del primer mes de servicio de la pista.

De acuerdo con el RSV 2002 Título B, numeral B.7.3. Para obras nuevas al momento de la entrega, la vía debe presentar un IRI menor a 2.5 m/Km. Sin embargo teniendo en cuenta que el objeto del presente estudio es la evaluación de un tramo de prueba el cual por las diferentes mezclas que se aplicaron fue construido en 5 etapas realizando 4 juntas entre cada clase de mezcla colocada, es entendible que los IRI calculados sean mayores a lo establecido en el RSV 2002.

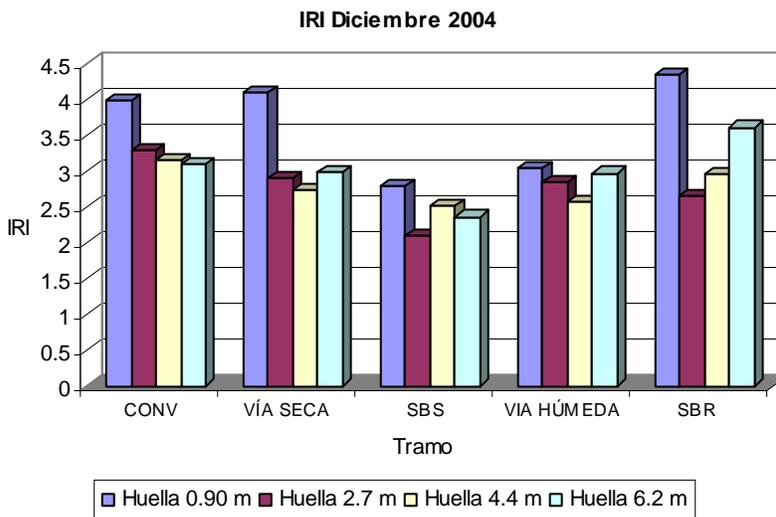
De la tabla se puede notar que las huellas que mejor regularidad presentan son las de 440 y 620 cm. El tramo con el IRI más bajo es el tramo de mezcla con polímero SBS.

En general los IRI se encuentran en rangos aceptables con las excepciones de la huella de 0.90 mts en el tramo de Vía seca y SBR.



**Tabla 10.5. Medición de IRI Diciembre de 2004.**

IRI 17 DIC 2004				
TRAMO	HUELLA 90 ANDEN	HUELLA 270	HUELLA440	HUELLA 620
CONV	3.9833	3.3	3.16	3.09
VÍA SECA	4.1	2.9	2.74	2.99
SBS	2.79	2.1	2.52	2.36
VIA HÚMEDA	3.05	2.84	2.58	2.97
SBR	4.34	2.66	2.96	3.61
Promedio	3.7	2.8	2.8	3.0
TOTAL	4.2	3.5	3.2	3.2



**Figura 10.9. Cuadro comparativo valores de IRI medidos por huella y tramo de estudio.**

La tabla 10.6 y figura 10.10, muestran los resultados de las mediciones de IRI en el mes de abril de 2005. Para el tramo convencional y vía seca se nota un leve incremento con

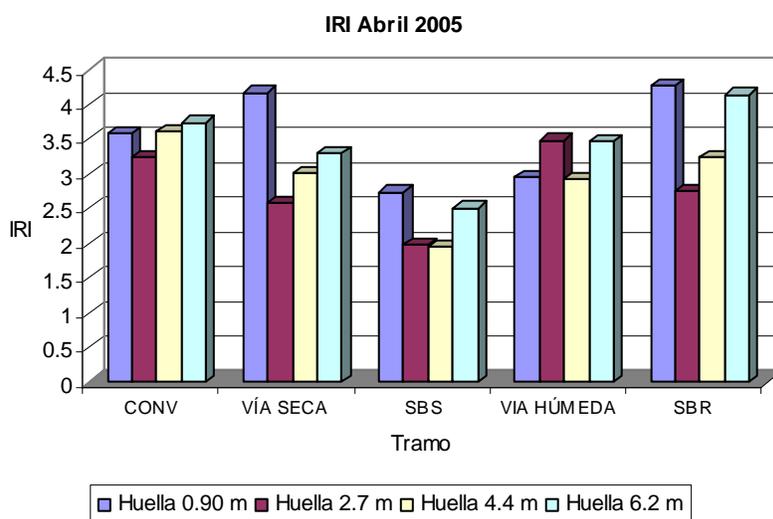


respecto a la medición anterior. Hecho que se puede interpretar como un ligero deterioro en la superficie de este tramo.

En el tramo de polímero SBS se aprecia una disminución en el IRI situando este tramo como el más confortable de toda la pista, con valores inferiores en su mayoría a 2.5 m/Km. A manera general y como es de esperar el IRI aumentó en promedio dos unidades con respecto a la primera medida, argumentando esto el continuo deterioro que ha tenido la pista de prueba como lo evidencian las fotografías a la fecha.

**Tabla 10.6. Medición de IRI Abril 2005.**

IRI 2 ABRIL 2005				
TRAMO	HUELLA 90 ANDEN	HUELLA 270	HUELLA440	HUELLA 620
CONV	3.59	3.25	3.62	3.74
VÍA SECA	4.17	2.59	3	3.29
SBS	2.74	1.97	1.95	2.51
VIA HÚMEDA	2.95	3.48	2.92	3.46
SBR	4.27	2.76	3.23	4.14
Promedio	3.5	2.8	2.9	3.4
TOTAL	3.96	3	3.40	3.74



**Figura 10.10. Cuadro comparativo valores de IRI medidos por huella y tramo de estudio.**

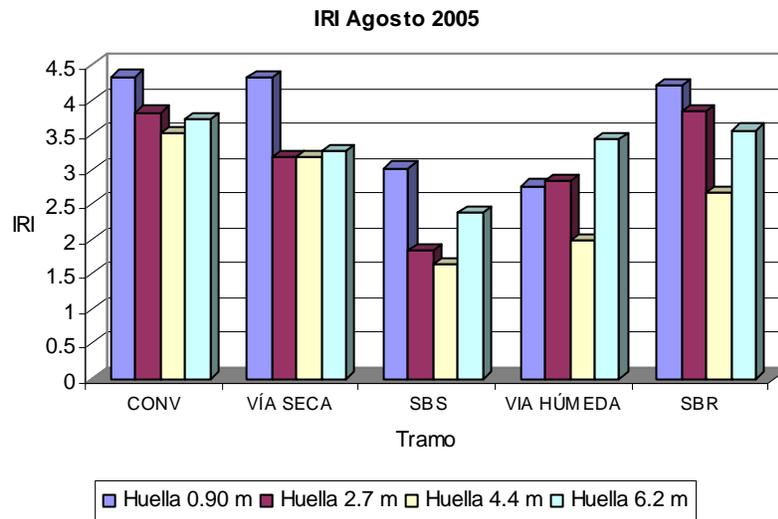


En la tabla 10.7 y en la Figura 10.11, se muestran los resultados de las mediciones de IRI en el mes de agosto de 2005. Para el tramo convencional y vía seca se nota un leve incremento con respecto a la medición anterior. Incremento que evidencia el deterioro que ha sufrido la rodadura del pavimento. En el tramo de polímero SBS se aprecia una disminución en el IRI situando este tramo como el más confortable de toda la pista, con valores inferiores en su mayoría a 3 m/Km, lo que muestra una clara tendencia hacia la disminución del IRI.

El tramo con asfalto caucho por vía húmeda al igual que el tramo con SBS ha experimentado una disminución en su rugosidad presentando valores destacables con un promedio de 2.8 m/Km. Para el tramo con polímero SBR, el IRI en las huellas vecinas al andén ha crecido, demostrando de esta manera deterioro. En el carril interno ha presentado una pequeña disminución mejorando de esta forma la rugosidad de la rodadura.

**Tabla 10.7. Medición de IRI agosto de 2005.**

<b>IRI Agosto 2005</b>				
<b>TRAMO</b>	<b>HUELLA 90 ANDEN</b>	<b>HUELLA 270</b>	<b>HUELLA440</b>	<b>HUELLA 620</b>
CONVENCIONAL	4.33	3.82	3.52	3.71
VÍA SECA	4.32	3.167	3.169	3.264
SBS	3.02	1.83	1.635	2.373
VIA HÚMEDA	2.766	2.84	1.98	3.44
SBR	4.192	3.828	2.673	3.563
Promedio	3.7	3.1	2.6	3.3
TOTAL	4.43	3.67	3.43	3.62



**Figura 10.11. Cuadro comparativo valores de IRI medidos por huella y tramo de estudio.**

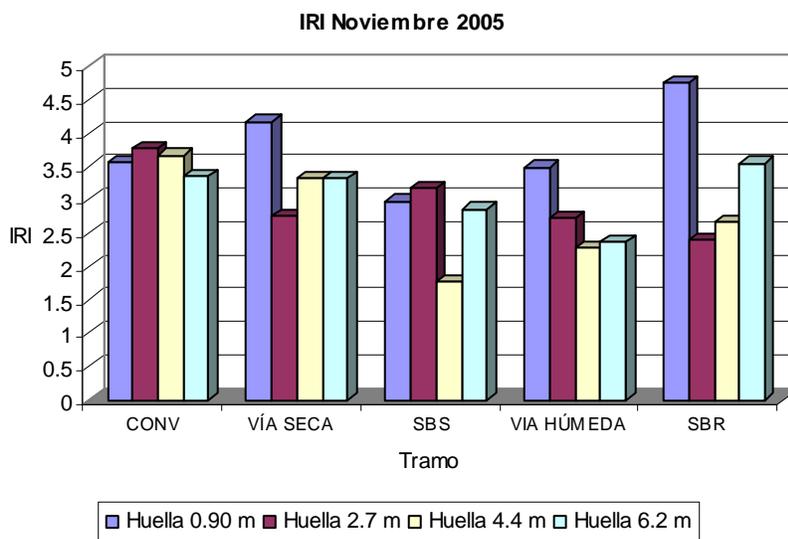
En la tabla 10.8 y en la Figura 10.12, se muestran los resultados de las mediciones de IRI en el mes de noviembre de 2005. Para el tramo vía seca, vía húmeda y con polímero SBR se observa que para estos tramos la huella a 90 cm del anden presenta los mayores valores, lo que indica que es la trayectoria con menor confort dentro del tramo de prueba. En contraste con lo anterior se observa para estos mismos tramos(vía seca, vía húmeda, SBR) que para las otras huellas los valores son bastante buenos, con valores inferiores en su mayoría a 3 m/Km, lo que muestra una clara tendencia hacia la disminución del IRI .

Lo que se puede inferir a partir de los resultados de esta última medición es que a pesar que los resultados del IRI a lo largo del periodo de seguimiento han oscilado dentro de cierto rango, evidenciando en algunos casos una tendencia hacia la disminución, los valores luego del periodo de seguimiento se encuentran dentro de un rango aceptable, en concordancia con el estado actual del pavimento



**Tabla 10.8. Medición de IRI noviembre de 2005.**

IRI Noviembre 2005				
TRAMO	HUELLA 90	HUELLA 270	HUELLA440	HUELLA 620
CONVENCIONAL	3.56	3.77	3.66	3.35
VÍA SECA	4.17	2.75	3.32	3.33
SBS	2.98	3.18	1.78	2.86
VIA HÚMEDA	3.48	2.73	2.28	2.37
SBR	4.75	2.4	2.66	3.54
Promedio	3.8	3.0	2.7	3.1
TOTAL	4.43	3.67	3.43	3.62

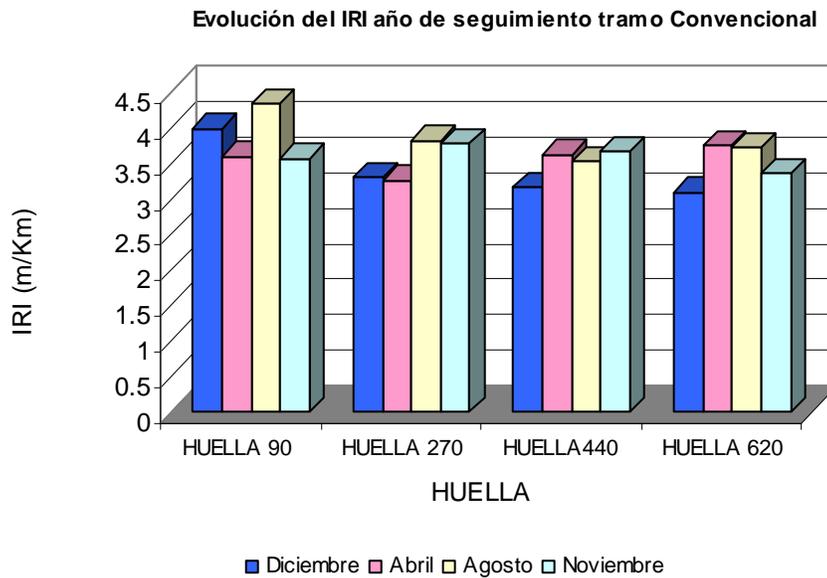


**Figura 10.12. Cuadro comparativo valores de IRI medidos por huella y tramo de estudio.**



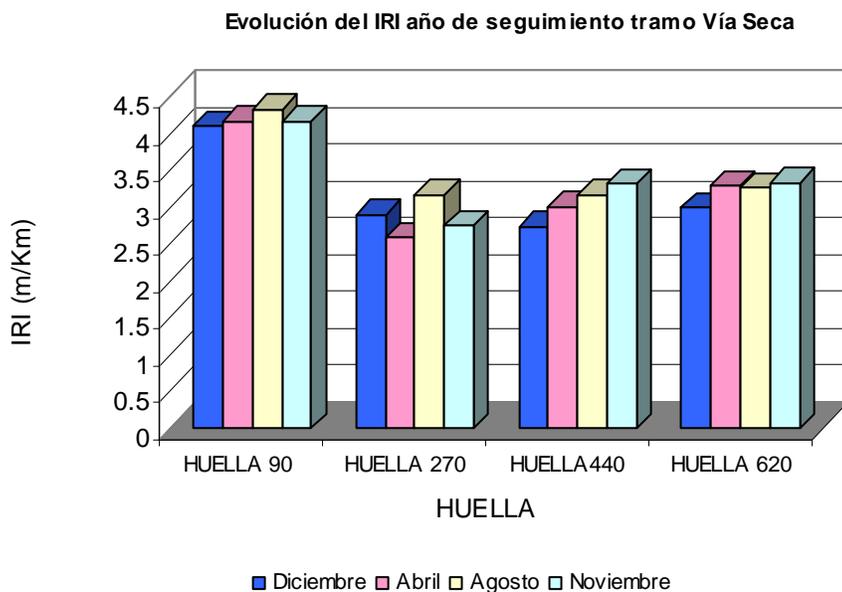
A continuación se presentan cuadros comparativos donde se observa la evolución de los índices de rugosidad durante el periodo de seguimiento (Figura 10.13 a 10.17).

Se observa en la figura 13 la evolución del IRI en cada huella evaluada durante el año de seguimiento. Se observa una leve disminución a lo largo de la huella que se encuentra 90 cm del andén, el resto de la huellas presentan un comportamiento uniforme.



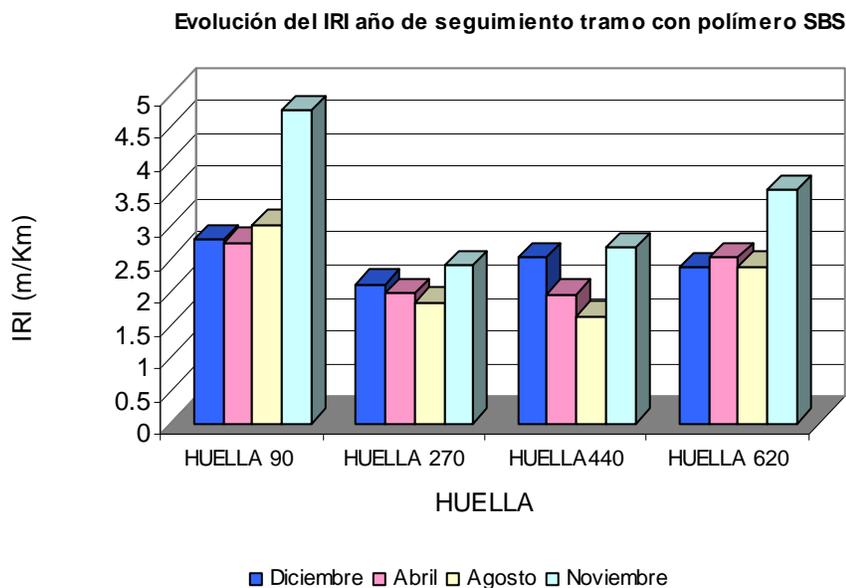
**Figura 10.13. Cuadro comparativo valores de IRI medidos por huella durante el periodo de seguimiento, tramo Convencional.**

En la figura 14, se observa el comparativo a lo largo del periodo de seguimiento para el tramo con asfalto caucho modificado con polímero vía seca. Se observa una tendencia incremental en todas las huellas evaluadas, destacándose la huella a 90cm del andén la cual presentó valores de 4.5 m/Km durante todo el periodo de seguimiento, la otras huella mostraron valores promedios de entre 3 y 3.5 m/Km.



**Figura 10.14. Cuadro comparativo valores de IRI medidos por huella durante el periodo de seguimiento, tramo Vía Seca.**

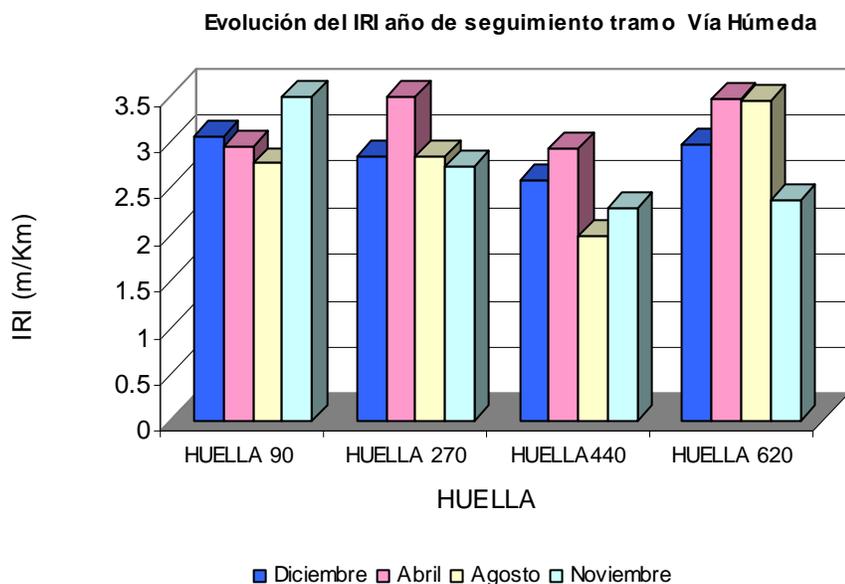
La figura 10.15 muestra el comparativo entre las huellas evaluadas del tramo con mezcla comercial modificada con SBS a lo largo del periodo de seguimiento. Se observa en forma general en todas las huellas un crecimiento considerable en el último periodo de mediciones. Los valores durante este último periodo fueron para la huella a 90 cm 4.5 m/Km, y para el resto de las huellas de 2.5 m/Km en promedio.



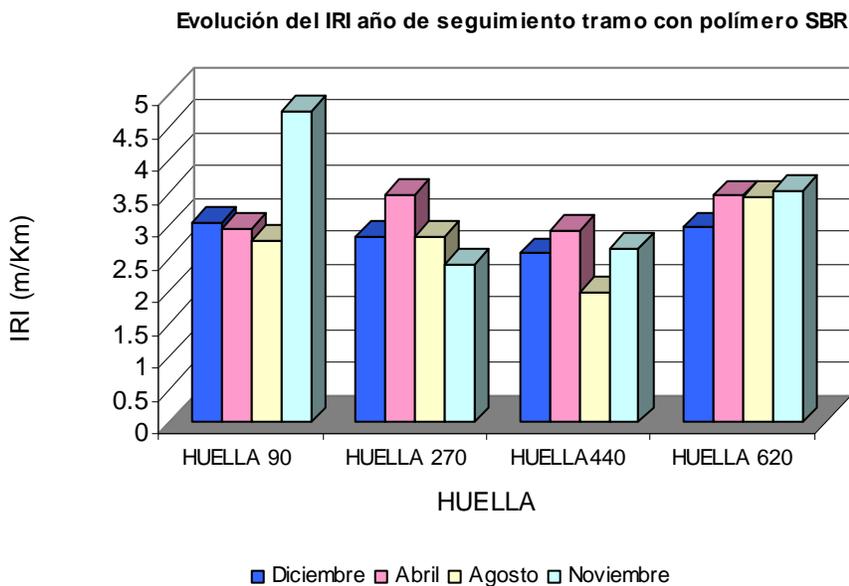
**Figura 10.15. Cuadro comparativo valores de IRI medidos por huella durante el periodo de seguimiento, tramo SBS.**

La figura 10.16 muestra el comparativo entre las huellas evaluadas del tramo con mezcla asfalto caucho modificada por proceso vía húmeda a lo largo del periodo de seguimiento. Los resultados observados muestran una tendencia hacia la disminución del IRI, en especial esta característica es observada en las huellas a 270, 440 y 620 cm. Los valores obtenidos se encuentran entre 2.5 y 3.5 m/Km para las huellas del carril externo, y entre 2 y 3 m/Km para el carril interno o contiguo al separador.

La figura 10.17 muestra el comparativo entre las huellas evaluadas del tramo con mezcla comercial modificada con SBR a lo largo del periodo de seguimiento. El comportamiento del IRI a lo largo del periodo de seguimiento para este tramo no presenta mayores diferencias, se observa un comportamiento estable durante las mediciones realizadas, es de resaltar el último valor obtenido sobre la huella de 90 cm que presenta para la medición de noviembre un IRI de 4.5 m/Km, en contraste, los demás valores en las huellas restantes presentan valores entre 2.5 y 3m/Km.



**Figura 10.16. Cuadro comparativo valores de IRI medidos por huella durante el periodo de seguimiento, tramo Vía Húmeda.**



**Figura 10.17. Cuadro comparativo valores de IRI medidos por huella durante el periodo de seguimiento, tramo SBR.**



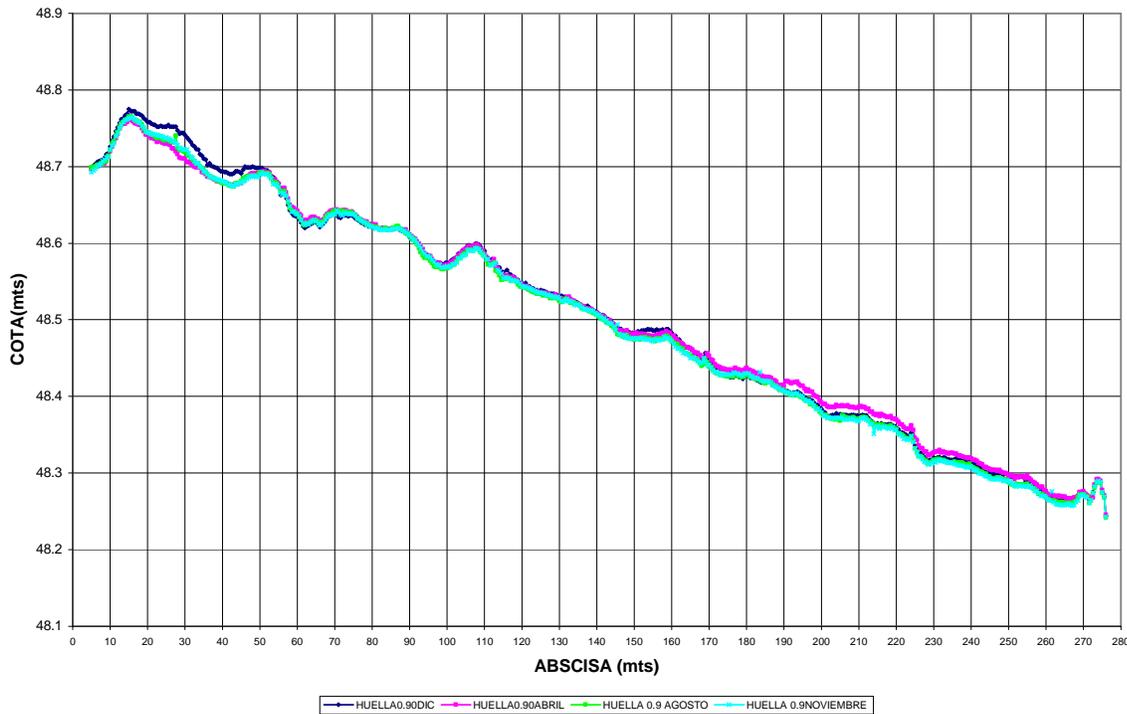
### 10.3. Perfiles Longitudinales

En esta parte se presentan los perfiles longitudinales medidos por cada huella en los meses de diciembre de 2004, abril, agosto y noviembre de 2005.

En los perfiles se observa la pendiente longitudinal que presenta el tramo de prueba. Es fácil detectar las irregularidades en la superficie que justifican los valores obtenidos de IRI. La figura 18, muestra el perfil longitudinal de la huella 0.90 mt en los cuatro periodos de mediciones realizados a la fecha, donde se observan los perfiles superpuestos. Este perfil presenta irregularidades del orden de 5 a 7 cm. También se observa que entre las abscisas K0+10 y K0+50 se ha presentado un asentamiento de aproximadamente 3 cm, el resto del perfil no ha mostrado irregularidades comparables. Se puede observar además que el perfil de la vía presenta irregularidades notables en las abscisas 40, 50, 95, cabe destacar que entre las abscisas 40 y 60 es la zona donde el pavimento ha presentado el deterioro más acelerado en relación con el resto de la pista, como se podrá observar en detalle en el inventario de fallas realizado que se muestra posteriormente.



PERFIL LONGITUDINAL HUELLA 0.90mts

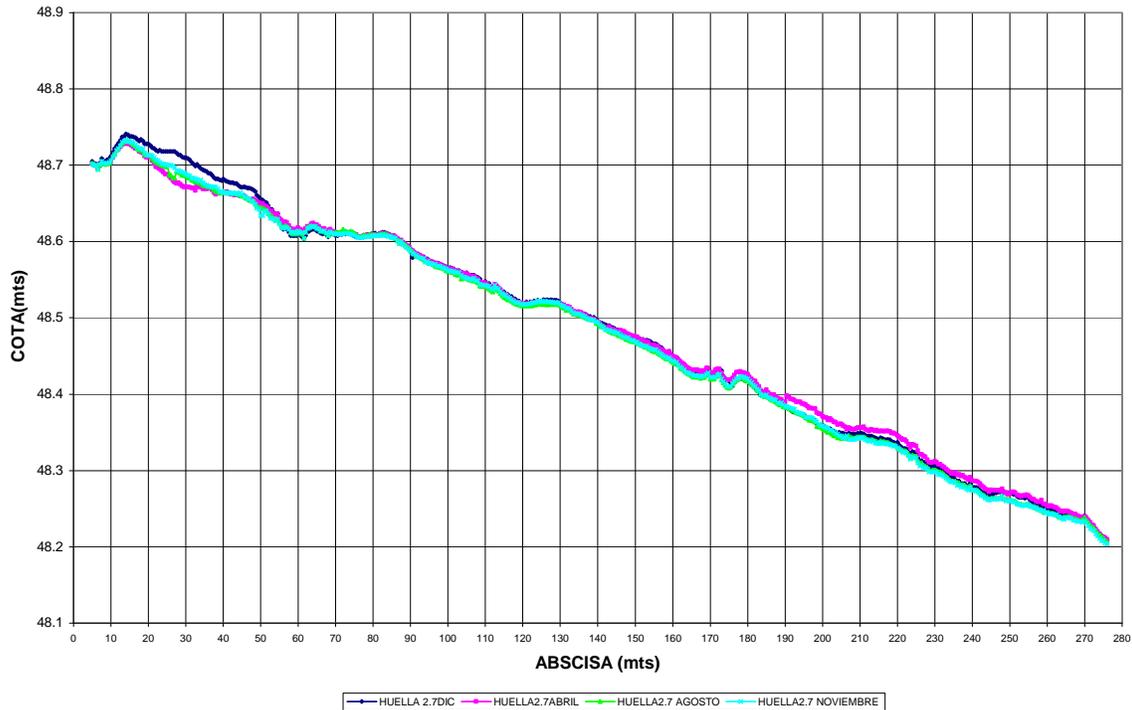


**Figura 10.18. Superposición de Perfiles Longitudinales Huella 0.9 mts, medidas diciembre 2004, abril, agosto y noviembre 2005.**

La figura 10.19, muestra el perfil longitudinal de la huella 2.7 mts en los cuatro periodos de mediciones realizados, donde se observan los perfiles superpuestos. Este perfil presenta una superficie más regular que la huella 0.90 mts. Sin embargo, el asentamiento en los primeros 50 mts longitud se presenta al igual que en la huella anterior.



PERFIL LONGITUDINAL HUELLA 2.7

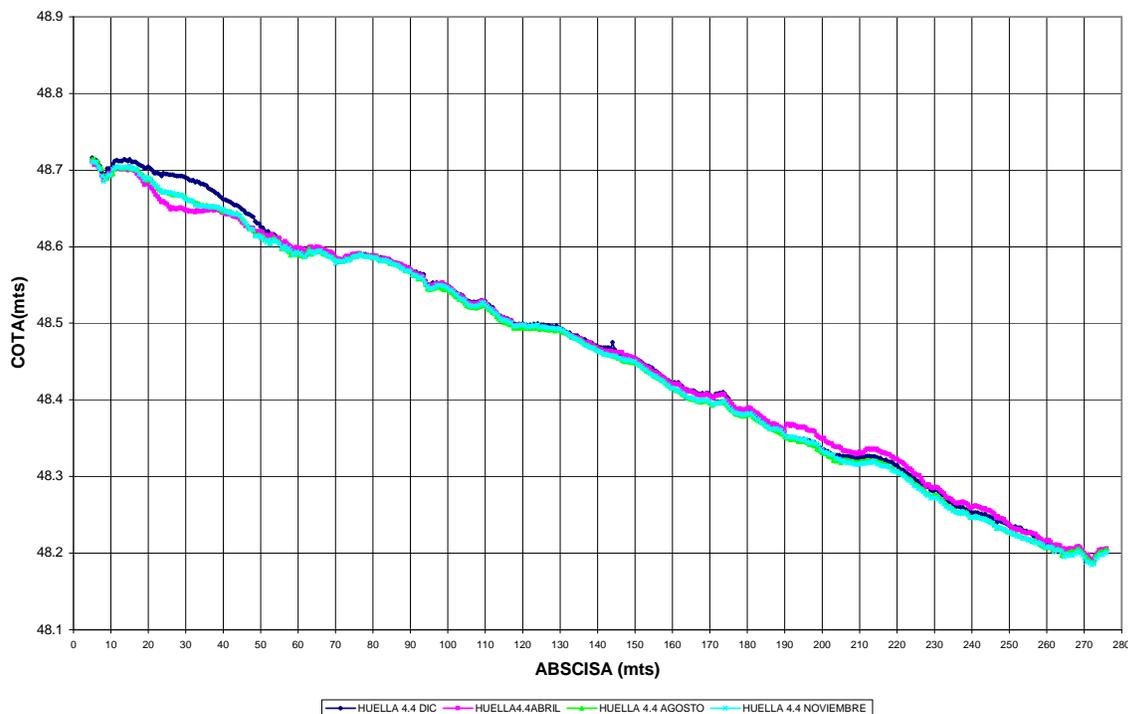


**Figura 10.19. Superposición de Perfiles Longitudinales Huella 2.7 mts, medidas diciembre, abril, agosto y noviembre de 2005.**

La figura 10.20, muestra el perfil longitudinal de la huella 4.40 mts en los cuatro periodos de mediciones realizados a la fecha, donde se observan los perfiles superpuestos. Este perfil al igual que el de la huella de 2.7 mts presenta un superficie bastante regular a lo largo de todo la pista. Pero es de notar el asentamiento en los primeros 50 mts del tramo el cual es común en todas las huellas.



PERFIL LONGITUDINAL HUELLA 4.40mts



**Figura 10.20. Superposición de Perfiles Longitudinales Huella 4.4 mts, diciembre, abril, agosto y noviembre de 2005.**

La figura 10.21, muestra el perfil longitudinal de la huella 6.20 mts en los cuatro periodos de mediciones realizados a la fecha, donde se observan los perfiles superpuestos. Este perfil presenta algunas irregularidades en su superficie p.e en las abscisas K0+95 y K0+135. De manera similar a las huellas anteriores es notable el asentamiento presentado en los primeros 50 mts, sin embargo en esta huella el asentamiento se observa de mayor magnitud. Se alcanza a observar a lo largo de todo el perfil que la rodadura se ha venido asentando aunque en muy baja magnitud.



PERFIL LONGITUDINAL HUELLA 6.20 mts

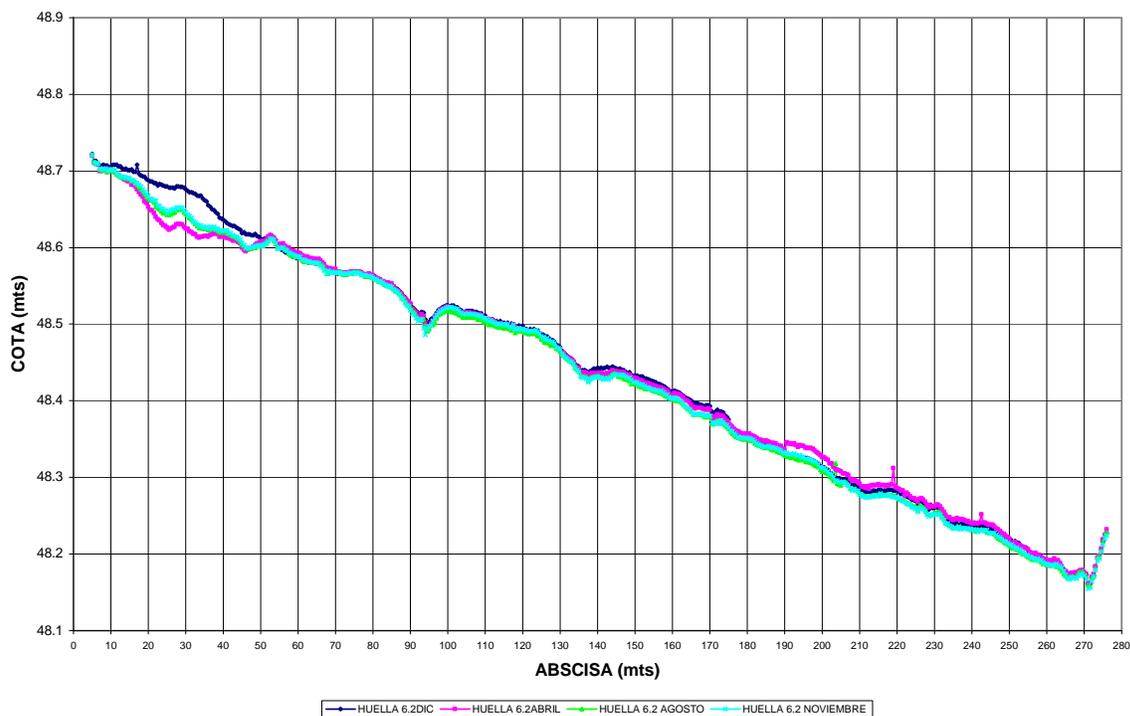


Figura10.21 Superposición de Perfiles Longitudinales Huella 6.2 mts, diciembre, abril, agosto y noviembre de 2005.

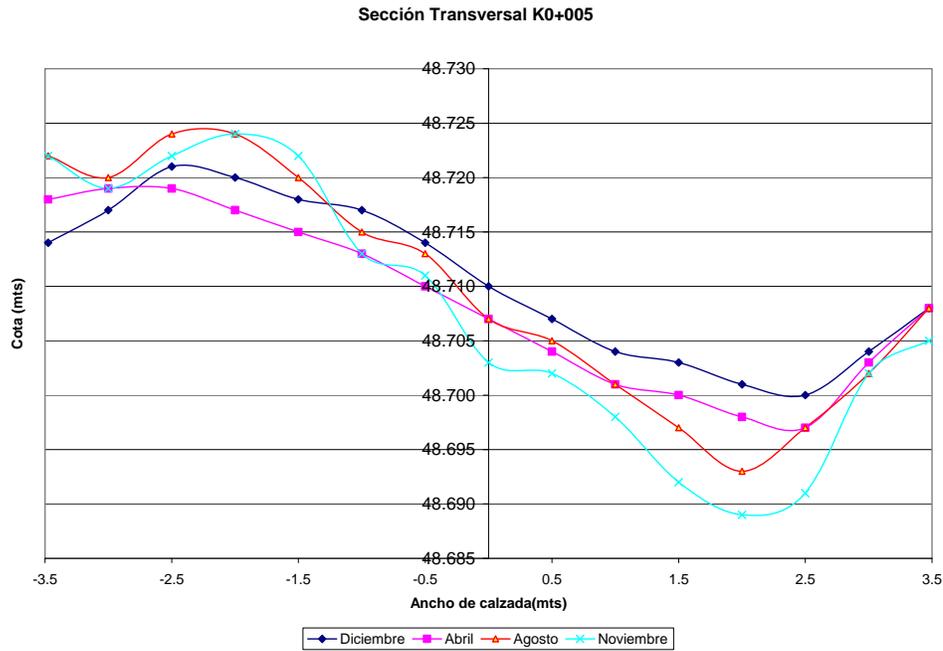


### 10.3.1 Secciones Transversales

En este numeral se presentan las secciones transversales medidas a lo largo de la pista de prueba durante el periodo de seguimiento. En las secciones se observa un claro bombeo a lo largo de la pista el cual se orienta hacia el separador de la calzada, lugar donde se encuentran los sumideros. Las secciones muestran una comparación de los cambios sufridos en la rodadura en el mes de diciembre, abril, agosto y noviembre. Los subtramos de prueba se encuentran abscisados de la siguiente manera: convencional K0+000 a K0+055, Vía seca K0+055 a K0+110, SBR K0+110 a K0+165, Vía húmeda K0+165 a K0+220, SBR K0+220 a K0+275.

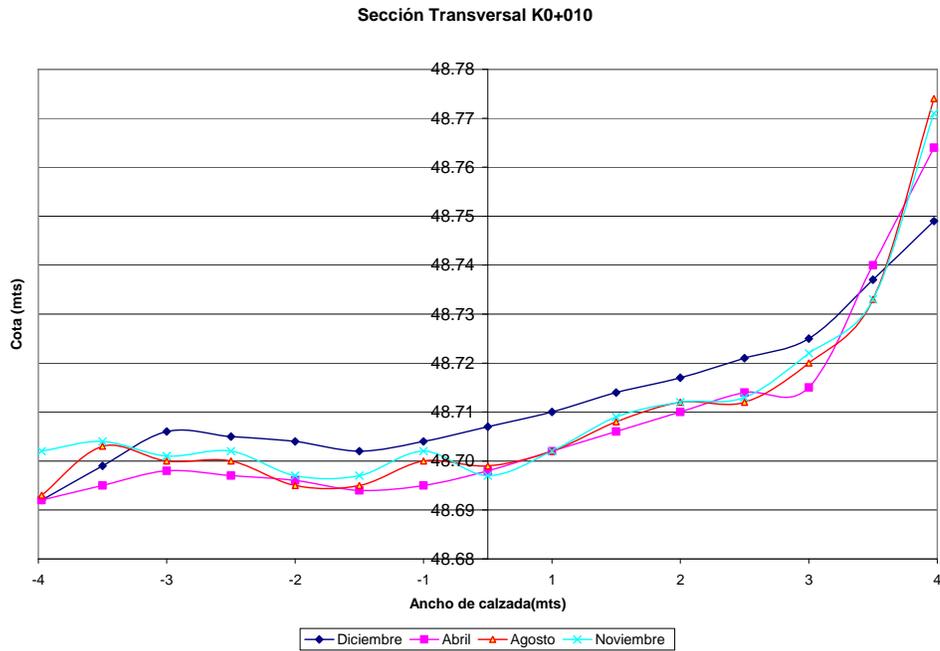
#### 10.3.1.1. Subtramo mezcla con asfalto convencional Barranca 80-100.

La sección K0+005 (figura 10.22) muestra la transición del bombeo de la calzada ubicada en la esquina de la carrera 96 con calle 67, con el tramo de prueba. Se observa que en el carril derecho se ha presentado ahuellamiento de 7 mm aproximadamente, sobre el carril derecho se presentó un leve asentamiento durante el mes de abril, que durante la medida del mes de noviembre fue confirmada con el aumento del asentamiento de más del 20%. Es importante tener en cuenta que esta abscisa se encuentra afectada por la transición del peralte de la intersección vecina a esta sección.

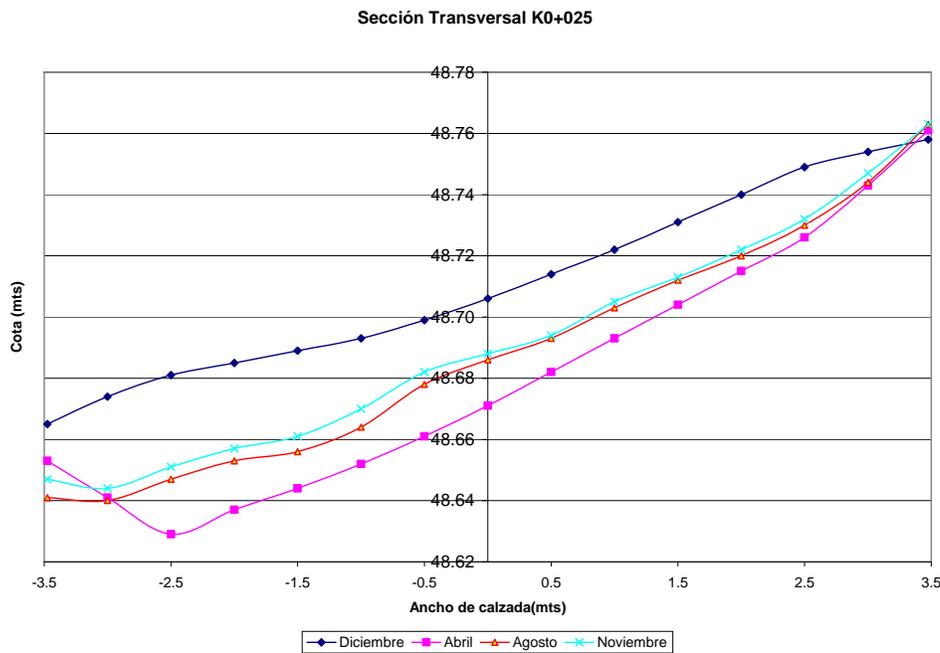


**Figura 10.22. Sección K0+005 meses enero, abril, agosto y noviembre.**

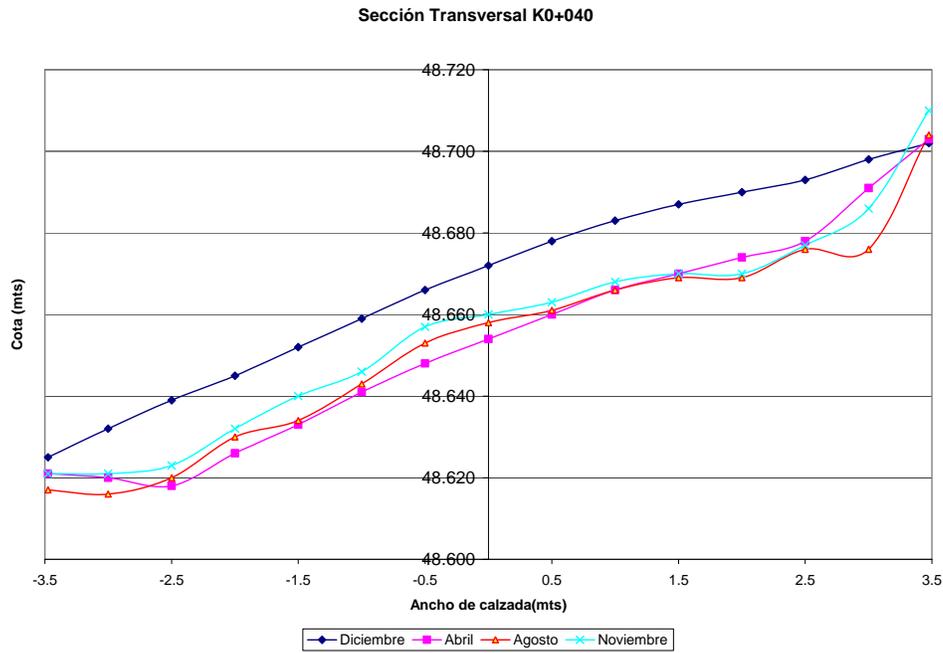
En el resto de los subtramos se observan hundimientos del orden de 1 cm en promedio. Entre los meses de abril y noviembre no se observan cambios importantes. En general los hundimientos se evidencian principalmente entre los meses de diciembre y abril.



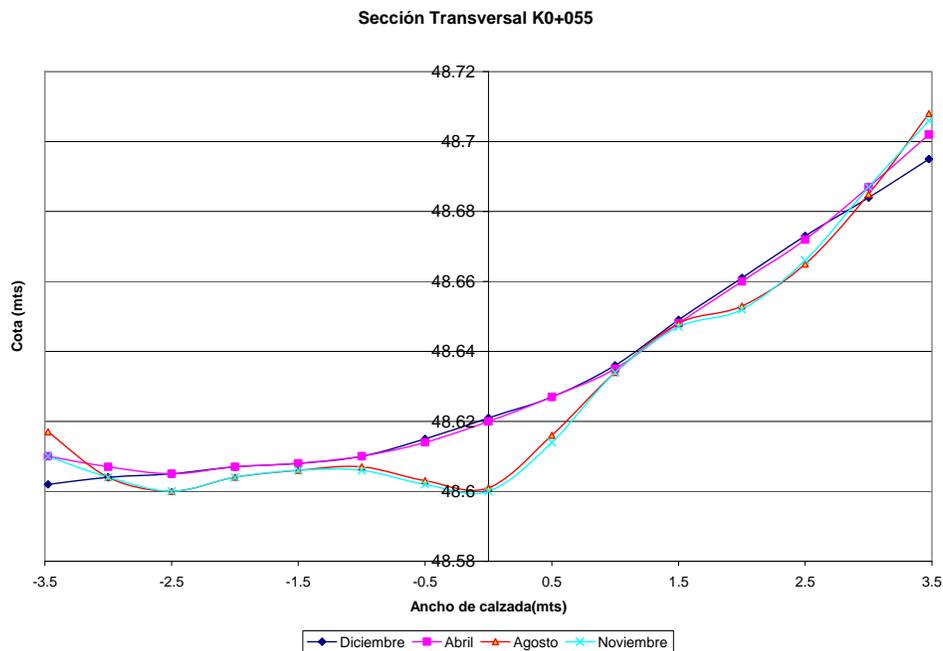
**Figura 10.23. Sección K0+010 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



**Figura 10.24. Sección K0+025 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



**Figura 10.25 Sección K0+040 meses enero, abril, agosto y noviembre.**

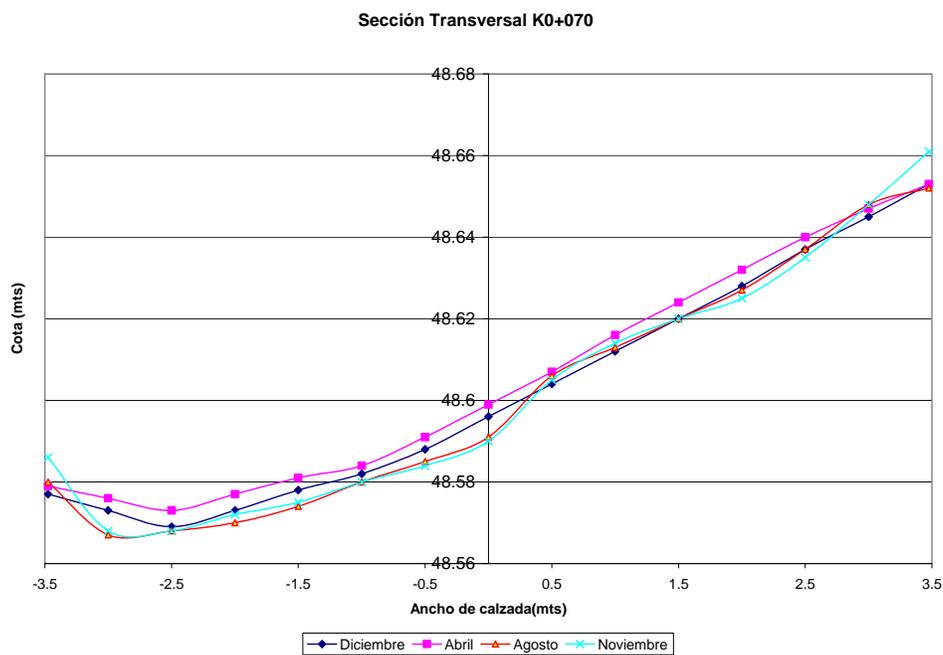


**Figura 10.26. Sección K0+055 meses enero, abril, agosto y noviembre.**

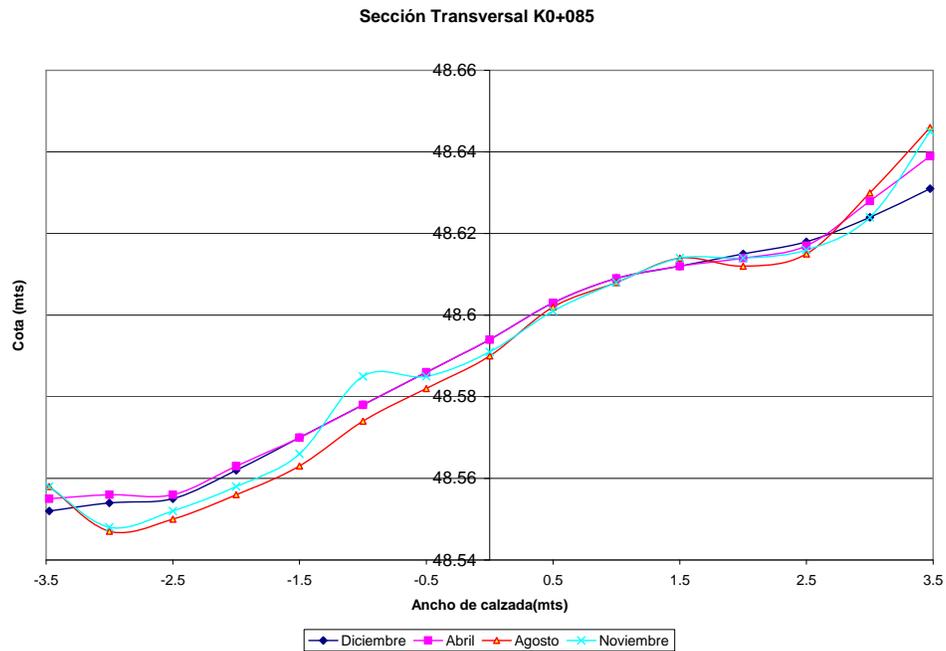


### 10.3.1.2. Subtramo mezcla con asfalto convencional modificada por proceso vía seca.

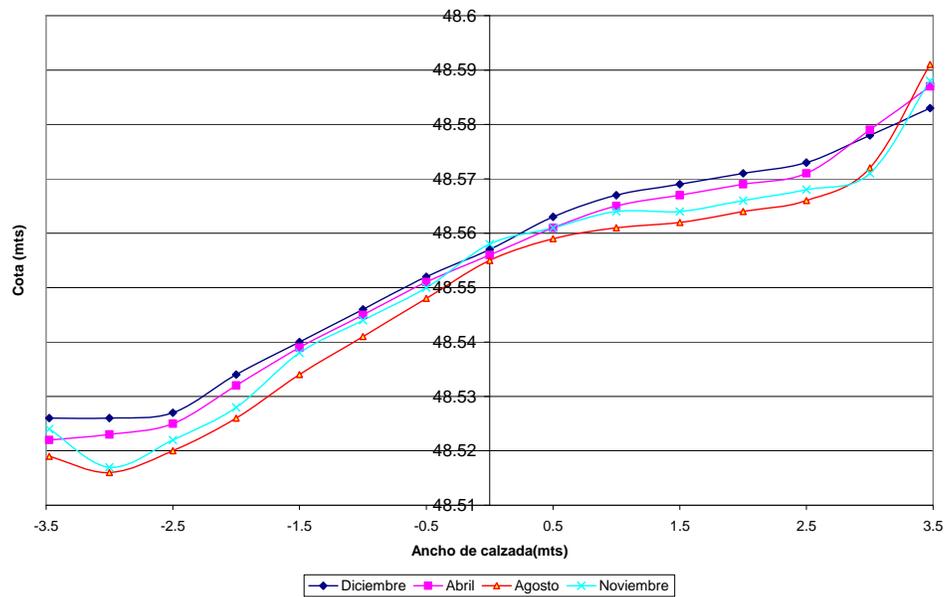
Entre las secciones K0+070, K0+085 no se aprecian cambios sustanciales en cuanto a los periodos de evaluación, se puede insinuar que presentan una subrasante estable. A partir de la sección K0+100 se empiezan a observar hundimientos de 1 cm aproximadamente.



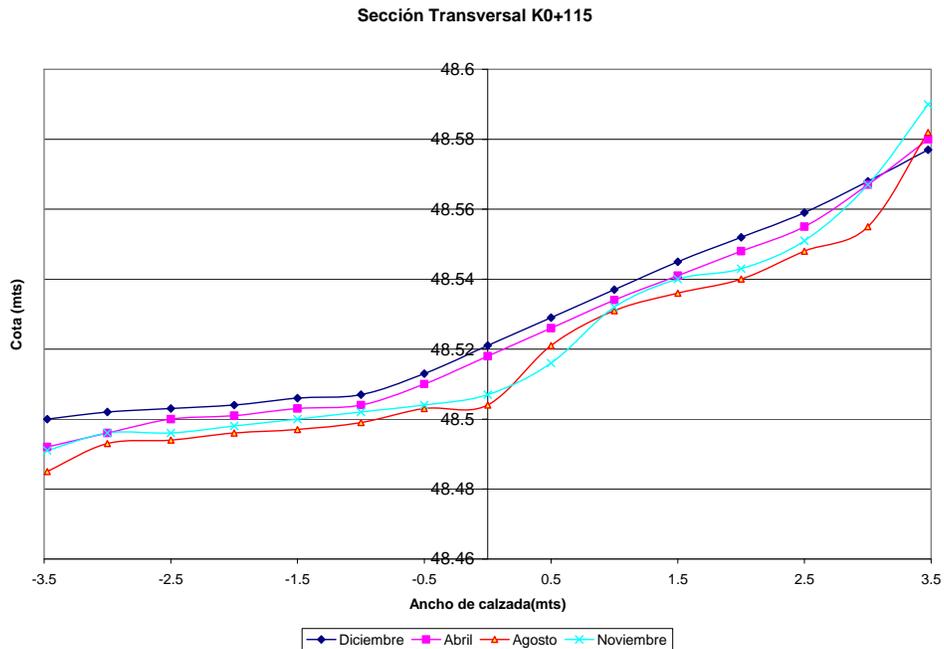
**Figura 10.27. Sección K0+070 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



**Figura 10.28 Sección K0+085 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



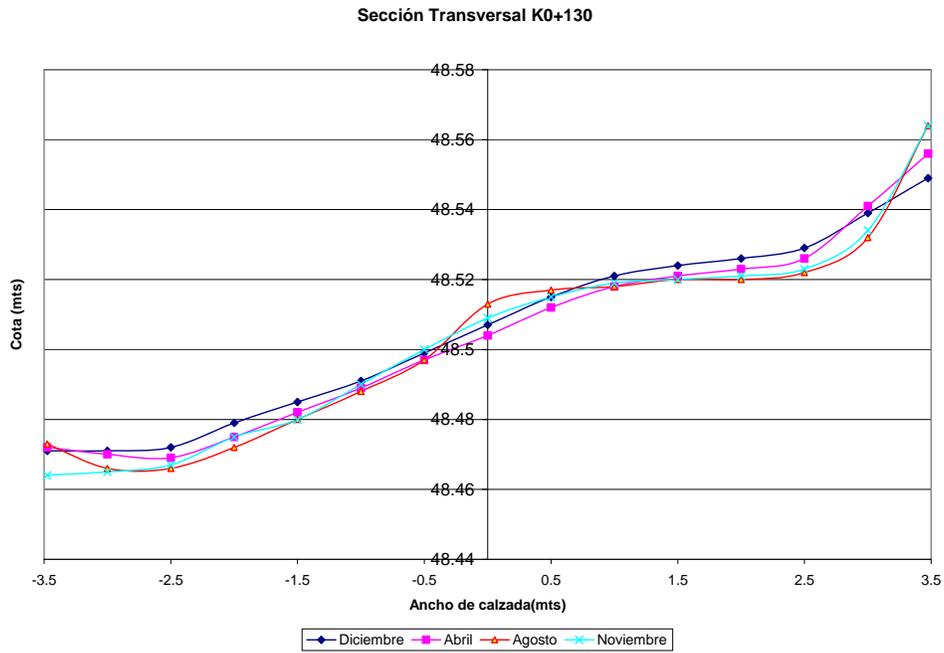
**Figura 10.29 Sección K0+100 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



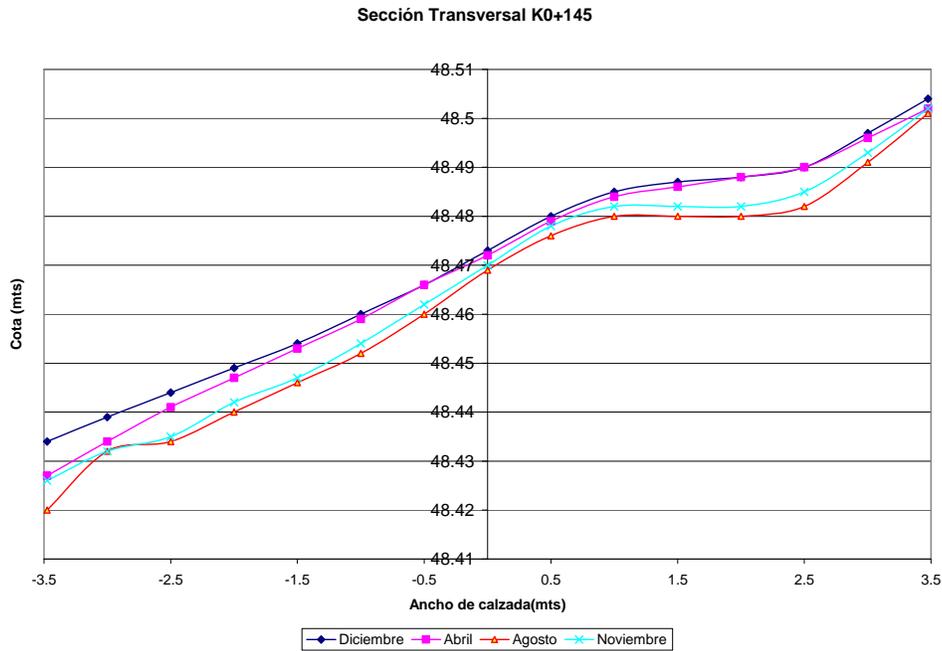
**Figura 10.30. Sección K0+115 meses enero, abril, agosto y noviembre.**

### 10.3.2. Subtramo con mezcla polímero modificado con SBS

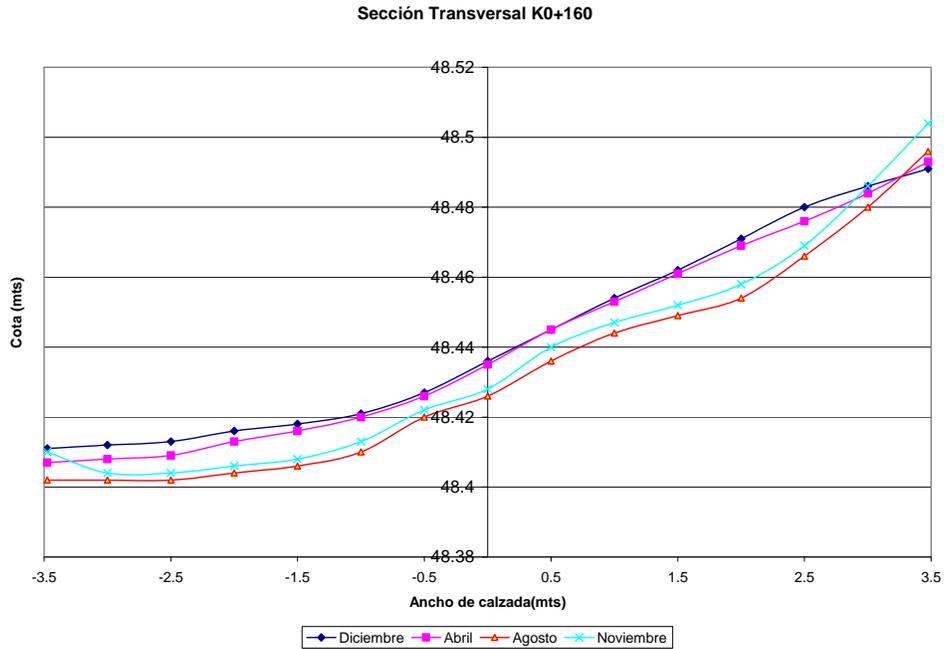
La sección K0+130 (Figura 10.31) evidencia la formación de una huella sobre el carril derecho, ubicada a 0.9 m del andén zona por la que se presentan las mayores repeticiones de carga y las paradas de los buses y busetas. Las secciones K0+145 (Figura 32) y K0+160 (Figura 33) presentan un hundimiento uniforme a lo ancho de la sección destacándose algunas huellas sobre el carril derecho. En las sección K0+160 se presentan los mayores hundimientos en el periodo de abril a noviembre, los cuales se encuentran en promedio cercanos a 1.5 cm.



**Figura 10.31. Sección K0+130 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



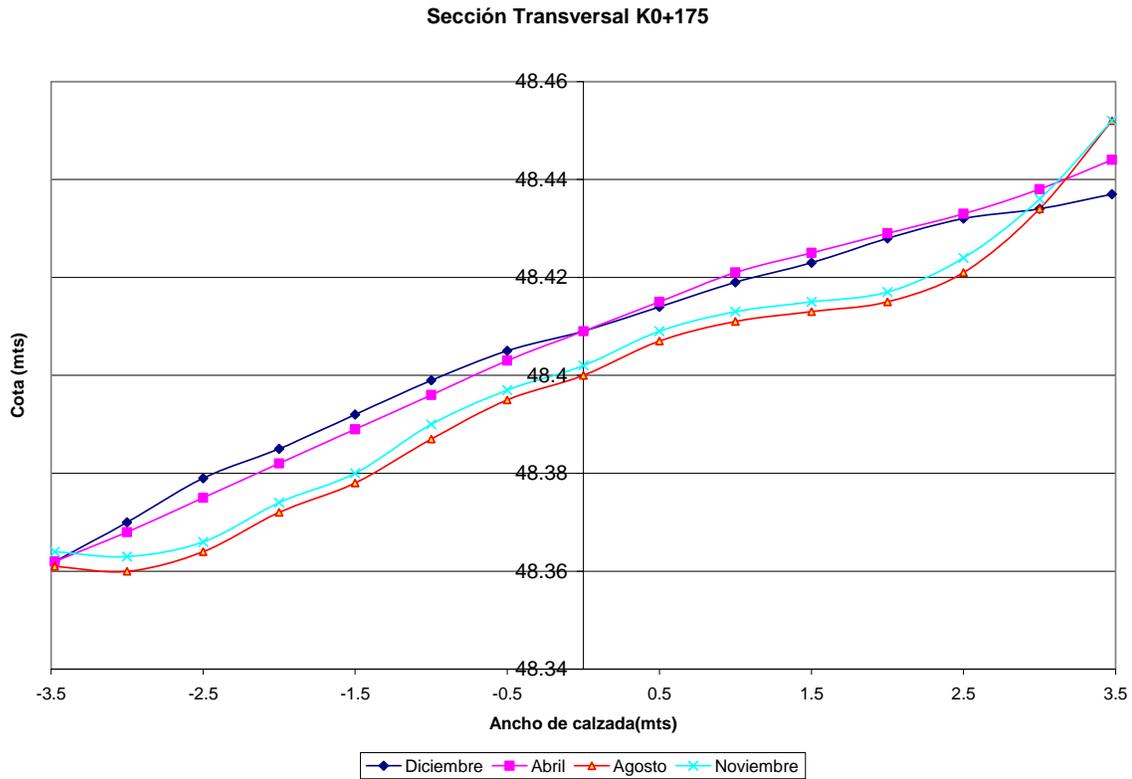
**Figura 9.32. Sección K0+145 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



**Figura 10.33 Sección K0+160 meses enero, abril, agosto y noviembre.**

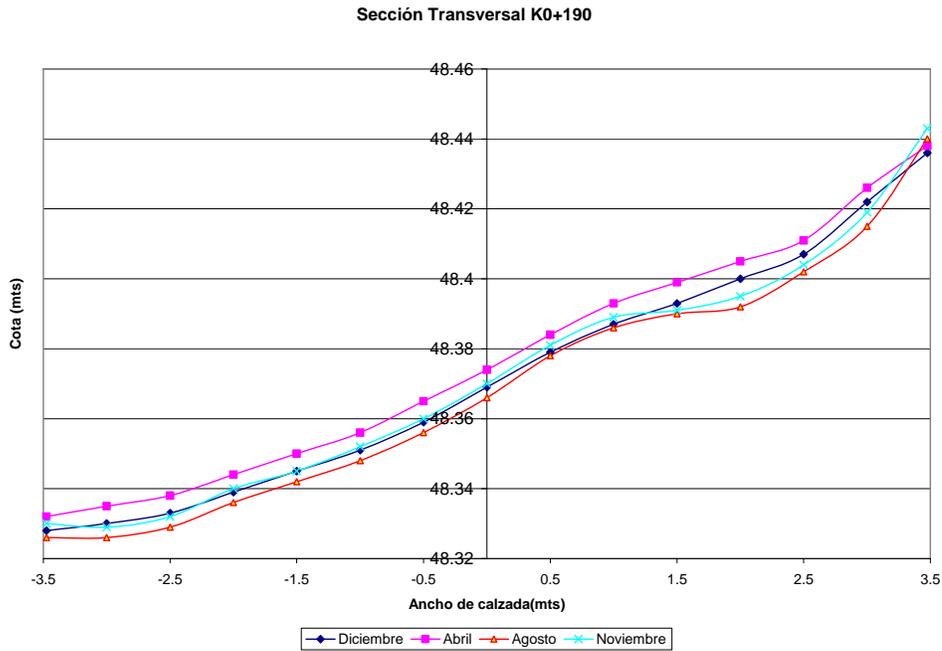
**10.3.3. Subtramo con mezcla con asfalto modificado por proceso vía húmeda.**

La sección K0+175 (Figura 10.34) muestra que se ha presentado durante el periodo abril-noviembre un hundimiento uniforme a lo ancho de la calzada, demostrando esto la acumulación de deformaciones permanentes a nivel de plataforma de soporte.

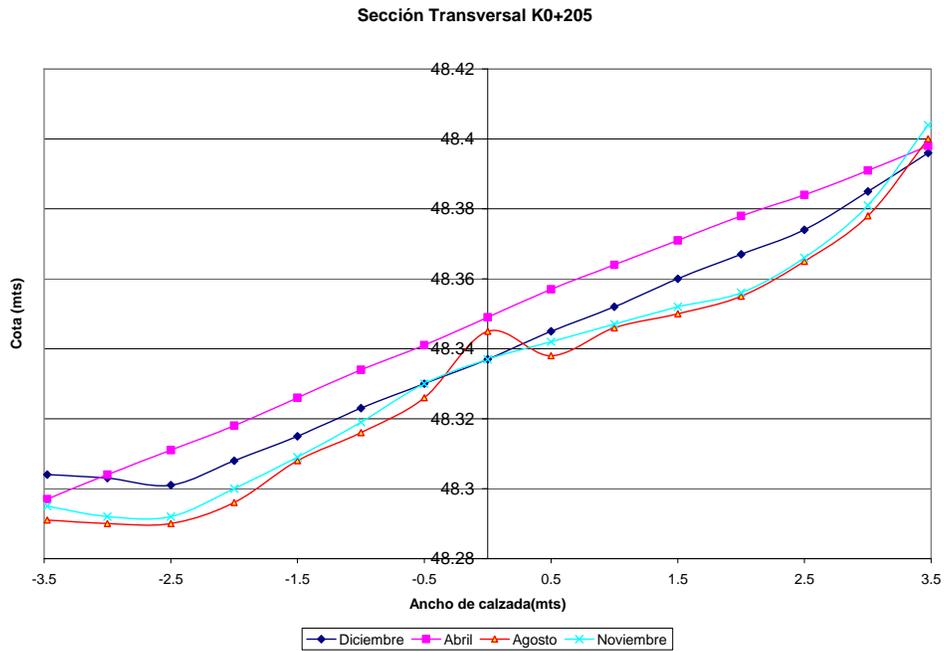


**Figura 10. Sección K0+175 meses enero, abril, agosto y noviembre.**

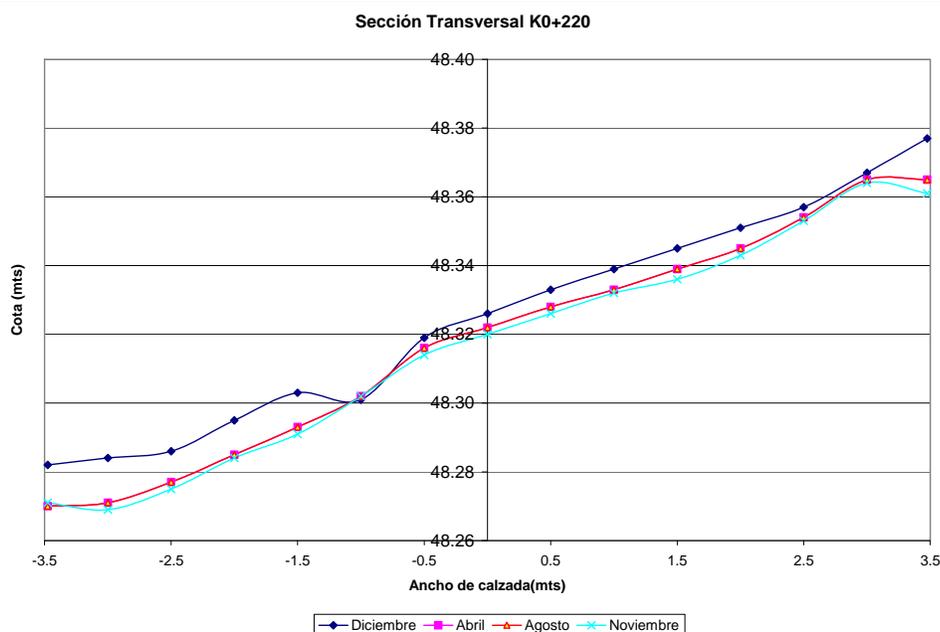
La sección K0+190 (Figura 10.35) contraria a la anterior sección no presenta cambios sustanciales a lo largo del periodo de seguimiento, sin embargo se observa una débil tendencia a la formación de hundimientos con el paso del tiempo. La sección K0+205 (Figura 10.36) presenta de manera similar un notable hundimiento durante el reciente periodo de medición, sin embargo para la medición de abril se observa una sección no válida, probablemente por desajustes presentados en el cálculo de la cartera topográfica. La sección K0+220 (Figura 10.37) presenta sobre el carril izquierdo un hundimiento importante del orden de 1 cm , en relación con el carril derecho el cual no presenta cambios notables en su sección.



**Figura 10.35. Sección K0+190 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



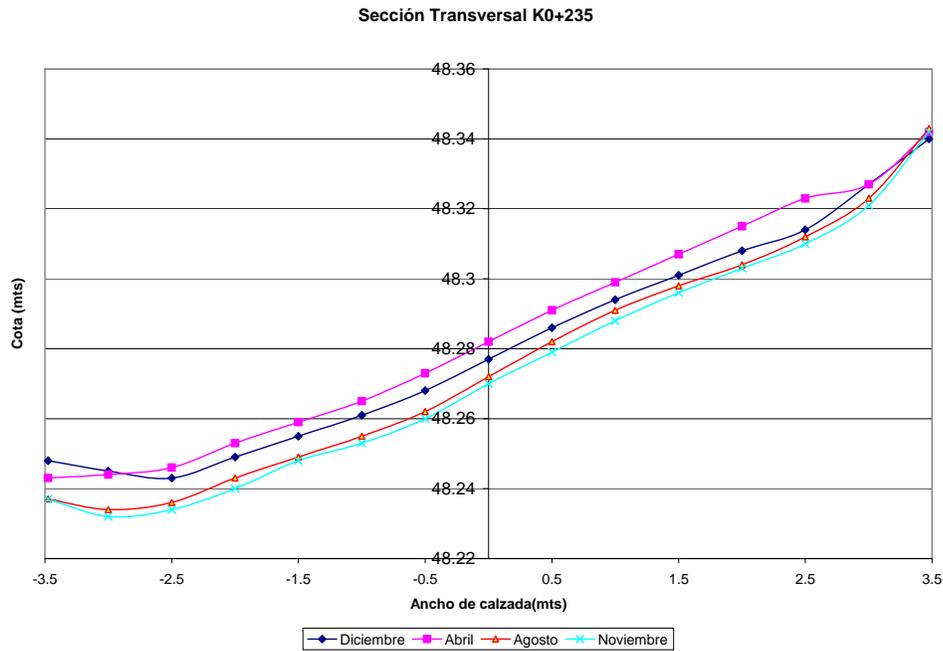
**Figura 10.36. Sección K0+205 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



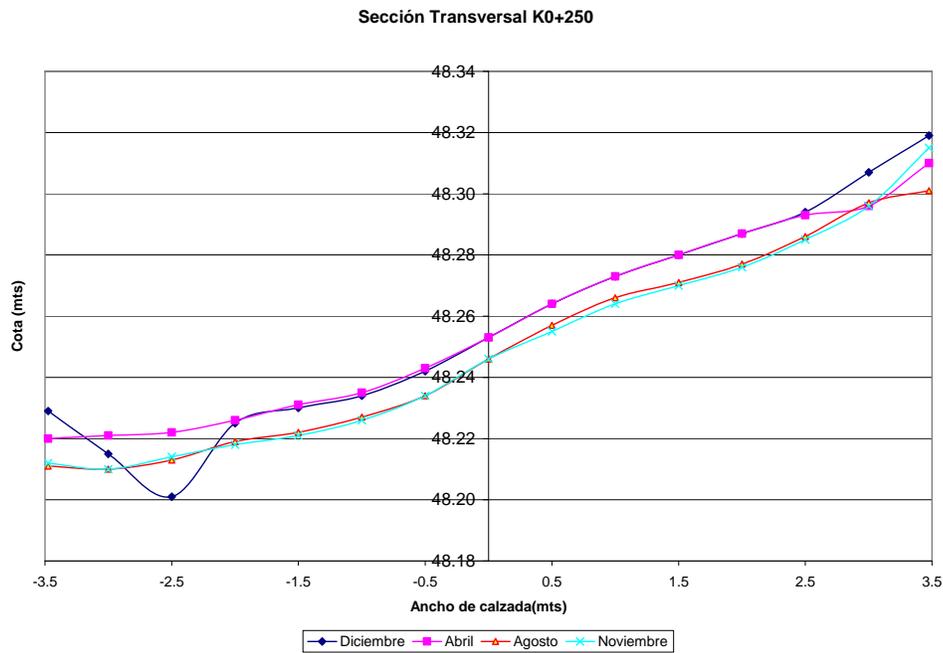
**Figura 10.37. Sección K0+220 meses enero, abril, agosto y noviembre.**

### 10.3.4. Subtramo con mezcla con asfalto modificado con polímero SBR.

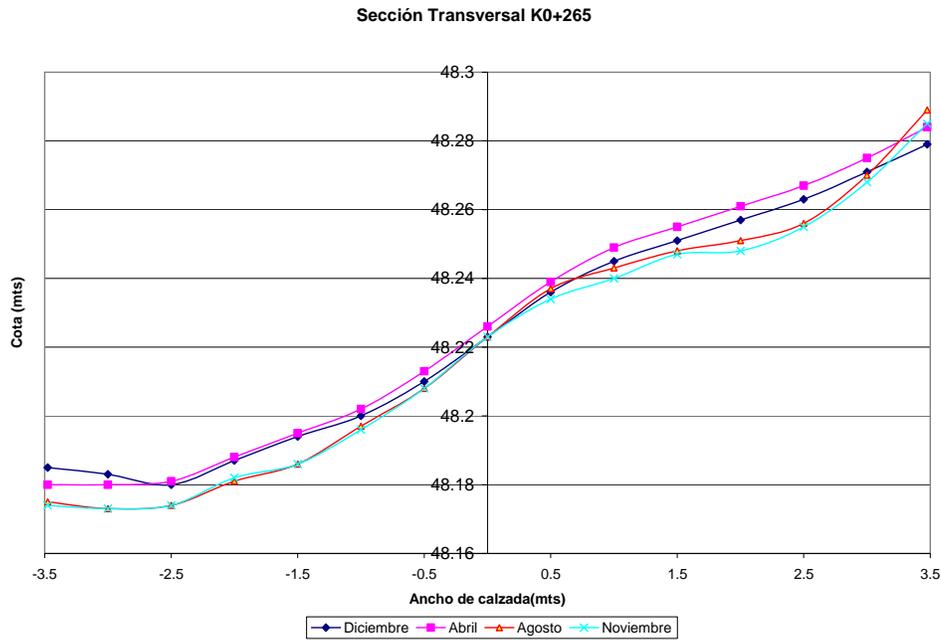
En las secciones correspondientes a este tramo (K0+235, K0+250, K0+265) se alcanza a observar una subrasante uniforme en virtud de los hundimientos presentados los cuales se encuentran dentro de un rango bastante conservador, sin embargo se evidencia durante la medición del mes de agosto una pequeña tendencia a la acumulación de deformaciones permanentes (Figuras 10.38, 10.39, 10.40).



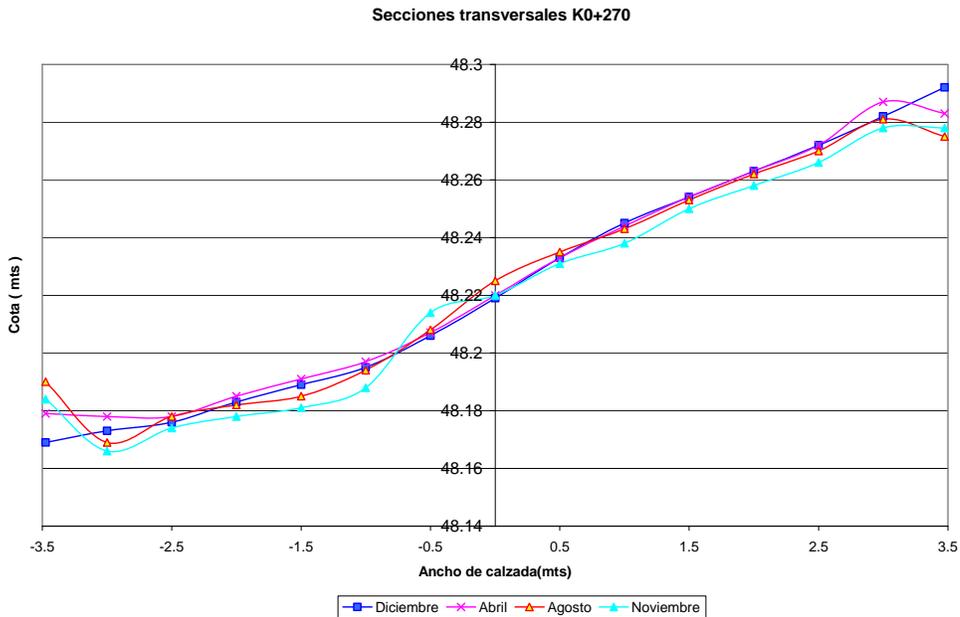
**Figura 10.38 Sección K0+235 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



**Figura 10.39. Sección K0+250 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



**Figura 10.40. Sección K0+265 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



**Figura 10.41 Sección K0+270 meses enero, abril, agosto y noviembre.**



#### **10.4. Caracterización Reológica de Asfaltos recuperados Pista de Prueba**

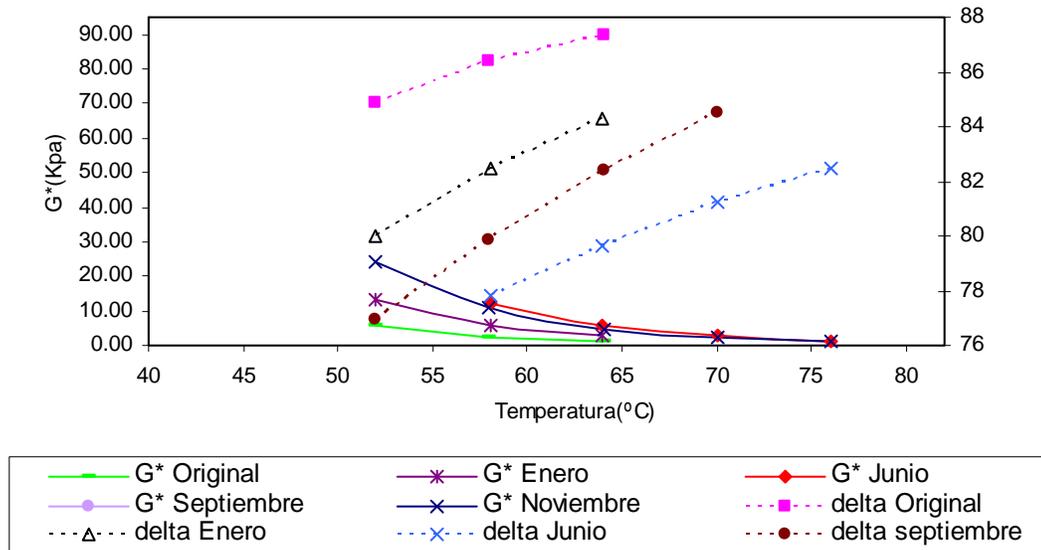
En este numeral se presentan los resultados de la caracterización reológica de los asfaltos extraídos de las mezclas colocadas sobre la pista de prueba. Los asfaltos fueron extraídos utilizando técnicas en centrifuga para separar los agregados del asfalto+solvente. Posteriormente la solución obtenida es sometida a procesos de destilación a través de un rotovapor y de esta manera obtener el asfalto recuperado sin alterar de forma significativa las propiedades físicas del asfalto, el procedimiento fue realizado siguiendo la norma INV-E 732, INV-E 759.

##### **10.4.2. Asfalto recuperado tramo con asfalto convencional.**

En la figura 40 se muestran los resultados de la caracterización reológica en un Reómetro de Corte Dinámico (DSR), del asfalto recuperado del tramo de mezcla con asfalto Barranca 80-100. La figura evidencia el proceso de envejecimiento del asfalto en la mezcla mostrando un incremento en el módulo de corte  $G^*$  a lo largo del barrido de temperatura realizado, este incremento se observa entre el mes de enero y junio presentando un incremento del 46% para 58°C. Para el mes de septiembre el comportamiento reológico indica que la mezcla ha mantenido el mismo grado de envejecimiento del mes de junio.



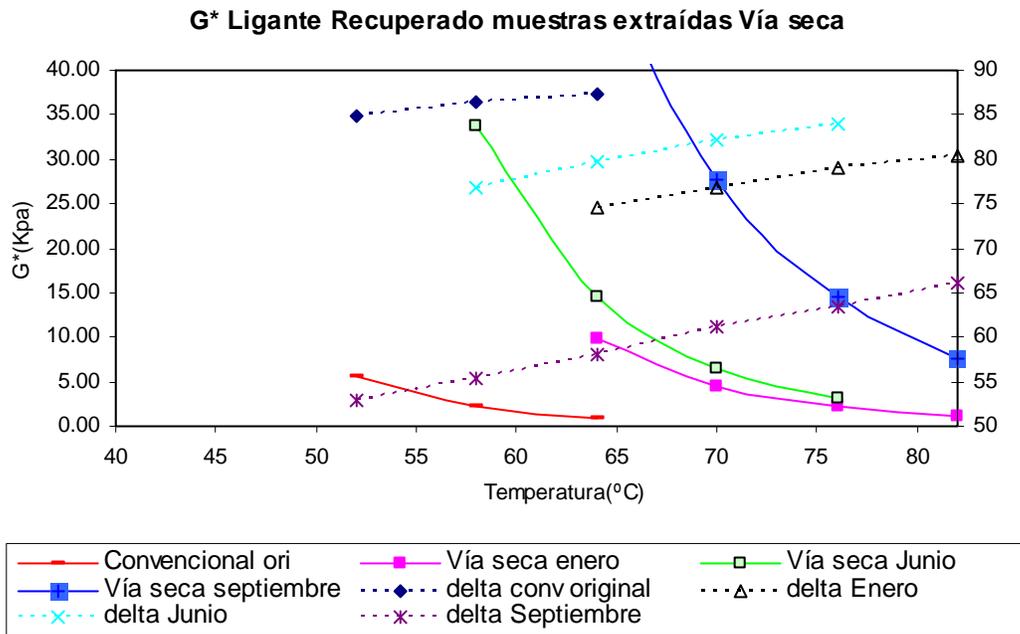
**G\* Ligante Recuperado muestras extraidas convencional**



**Figura 10.42. Caracterización reológica asfalto convencional recuperado en los meses enero, junio y septiembre.**

**10.4.3. Asfalto recuperado tramo de mezcla modificada con caucho proceso vía seca.**

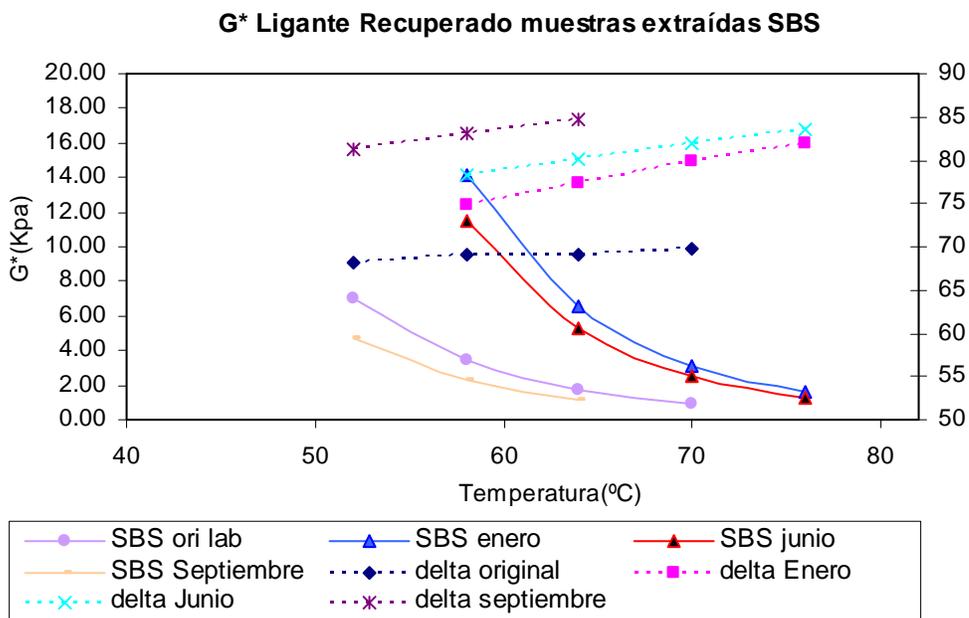
La caracterización reológica del asfalto recuperado de la mezcla por proceso vía seca se muestra en la figura 10.43, se observa un endurecimiento gradual entre el mes de enero y junio. EL módulo en estado original para 64° fue de 0.99 Kpa, para esa misma temperatura durante el mes de enero y junio presentó valores de 9.7 y 14.5 Kpa. Estos valores muestran el endurecimiento acelerado que sufrido este ligante, que en parte justifica el deterioro presentado hasta el momento.



**Figura 10.43 Caracterización reológica asfalto recuperado de mezcla modificada con caucho por proceso vía seca recuperado en los meses enero, junio y septiembre.**

**10.4.4. Asfalto recuperado tramo de mezcla con asfalto modificado con polímero SBS.**

En la figura 10.44 se muestra la caracterización del tramo con polímero SBS, se observa que el ligante en estado original presenta un  $G^*$  de 3.3 Kpa a 64°C , y para esta temperatura durante los meses de enero y junio presentan valores de 6.5. y 5.2 Kpa, estos valores por estar tan cercanos se pueden analizar como si el ligante para el mes de junio no hubiese presentado envejecimiento considerable.



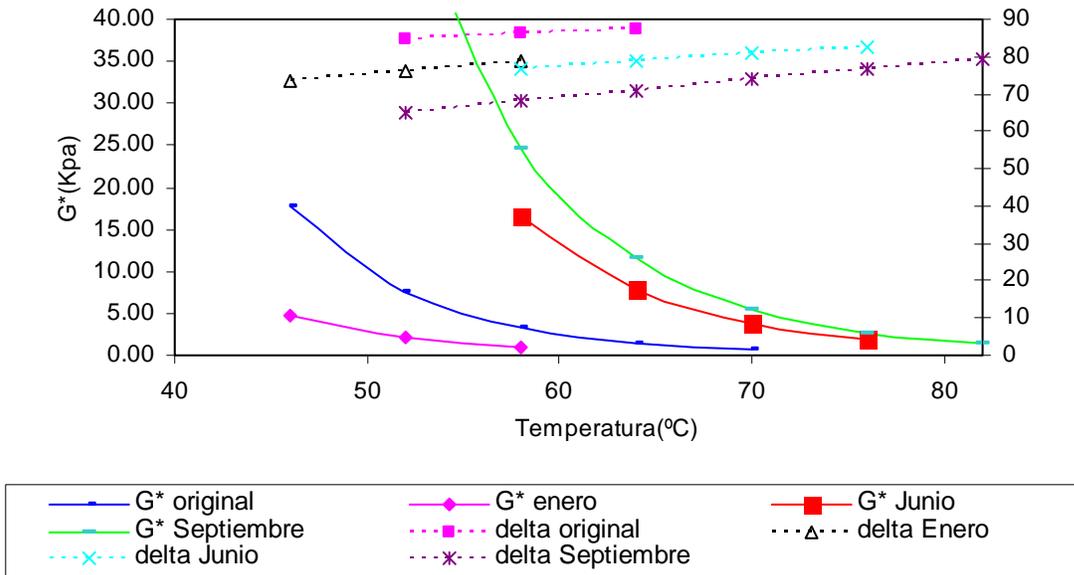
**Figura 10.44. Caracterización reológica asfalto recuperado de mezcla con asfalto modificado con polímero SBS recuperado en los meses enero, junio y septiembre.**

**10.4.5. Asfalto recuperado tramo de mezcla con asfalto modificado con caucho proceso vía húmeda.**

En la figura 41 se muestra la caracterización del tramo con caucho proceso vía húmeda, se observa que el ligante en estado original presenta un  $G^*$  de 3.3 Kpa a 58° C. Se observa en la figura que la caracterización del mes de enero presentó valores no válidos que se atribuían en el informe anterior a la reacción asfalto-caucho-solvente, pero las caracterizaciones de junio y septiembre contradicen esa hipótesis, mostrando un asfalto con mayor módulo. Tomando como referencia de análisis la temperatura de 58°C, el módulo alcanzado para los meses de junio y septiembre alcanza valores de 15 y 16 Kpa respectivamente que por su cercanía en magnitud sugieren que la rata de envejecimiento ha disminuido.



**G\* Ligante Recuperado muestras extraídas Vía Húmeda**



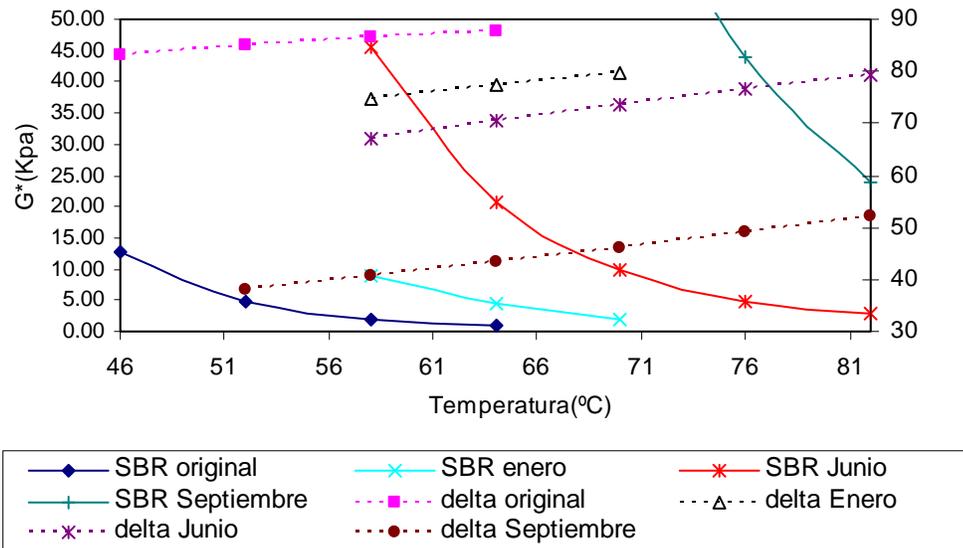
**Figura 10.45. Caracterización reológica asfalto recuperado de mezcla con asfalto modificado con caucho proceso vía húmeda recuperado en los meses enero, junio y septiembre.**

**10.4.6. Asfalto recuperado tramo de mezcla con asfalto modificado con polímero SBR.**

En la figura 10.46 se observa la caracterización reológica del ligante en mención. Los valores de los módulos muestran un endurecimiento gradual en función del tiempo de servicio, sin embargo se observa un incremento importante del módulo en la caracterización del mes de junio que alcanza a ser aproximadamente cuatro veces el módulo presentado para el mes de enero. La caracterización de junio sugiere un comportamiento estructural bastante rígido en esta mezcla, característica que puede generar agrietamientos dependientes de la temperatura.



**G\* Ligante Recuperado muestras extraídas SBR**



**Figura 10.46. Caracterización reológica asfalto recuperado de mezcla con asfalto modificado con polímero SBR recuperado en los meses enero, junio y septiembre.**

Los resultados obtenidos en las penetraciones para los asfaltos recuperados de las mezclas colocadas en la pista de prueba se muestran en la tabla 10.1. En dicha tabla se observa en términos generales los asfaltos se han envejecido en algunos casos en 80% de su penetración original. Al analizar el asfalto por proceso vía seca se aprecia que al igual que en la caracterización reológica este asfalto es uno de los más endurecidos. Los asfaltos convencional y vía húmeda presentan un cambio en la penetración cercano al 50%. Sin embargo se esperaría que el asfalto por vía húmeda presentara un menor grado de afectación frente a la penetración, dado el comportamiento mostrado en la caracterización reológica en la que se evidencia un claro ablandamiento del material luego del proceso de recuperación de la mezcla.



**Tabla 10.9. Penetraciones realizadas a los ligantes en estado original, residuo RTFO y asfalto recuperado de la mezcla.**

PRUEBA	Convencional	AC(VIA HUMEDA)	SBS	SBR	VIA SECA
Penetración Original(dmm)	92	90	49	62	92
Penetración RTFO(dmm)	33	70	34	41	-
Penetración mes Enero (dmm)	46	46	30	50	22
Penetración mes Junio (dmm)	41	31	30	21	20
Penetración mes Septiembre (dmm)	43.67	26.67	21	24	26.67
Penetración mes Diciembre(dmm)	33.6	23.67	35.67	19	33

## 10.5. Inventario de Fallas

### 10.5.2. Inventario Junio

Realizado el inventario de fallas el día 9 de junio, se puede observar que el corredor en general presenta un estado aceptable exceptuando el tramo de vía seca. Que ha evidenciado desde el mes de enero una tipología de falla de piel de cocodrilo. En la actualidad como se muestra en las fotografías y en la densidad de fisuración presenta una severidad alta (Figura 10.47).



**Figura 10.47. Se observa piel de cocodrilo e inicio de desprendimiento de material.**



Contrario a este tramo el Asfalto modificado con caucho por vía húmeda ha tenido un buen desempeño como se muestra en la tabla 10.1 (Figura 10.48). De acuerdo con el inventario realizado en este tramo se presentan en un bajo grado las siguientes fallas:

- Peladuras
- Piel de cocodrilo
- Fisuramiento transversal



**Figura 10.48. Tramo de pista Vía Húmeda. A izquierda se observa peladuras.**

En el tramo con polímero SBR, se ha presentado un grado considerable de deterioro evidenciando fallas de piel de cocodrilo, fisuramiento transversal y longitudinal. Sin embargo las fallas se encuentran localizadas de manera uniforme en una longitud de 20 mts aproximadamente.



**Figura 10.49. Tramo de pista con polímero SBR, se observan fisuras en forma de piel de cocodrilo.**

El tramo con polímero SBS a pesar de presentar en la mayor parte del área una tipología de fallas de peladuras, se puede destacar que no evidencia fallas de tipo estructural.



**Figura 10.50. Fisura de tipo transversal atraviesa toda la calzada SBR**



**Tabla 10.10. Densidad de fisuración por tramo de estudio**

TRAMO	DENSIDAD DE FISURACIÓN	RANKING
CONVENCIONAL	3.3%	4
ASFALTO CAUCHO VIA SECA	27.8%	5
POLIMERO SBS SHELL	PELADURAS	2
ASFALTO CAUCHO VIA HUMEDA	0.4%	1
POLIMERO SBR AGUILAR	2.6%	3

El tramo convencional según se muestra en la tabla 10.9 es uno de los que ha presentado un desempeño aceptable, viéndose afectado en la zona vecina al tramo de vía seca por fallas de piel de cocodrilo en un área cercana a 6 m<sup>2</sup> lo que podría suponer una posible mala compactación en la base o baja portancia de le subrasante. Es importante tener en cuenta que esta zona presentaba antes de la intervención el peor estado de todo el corredor como se muestra en la figura 10.51.



**Figura 10.51. Fotografías Febrero de 2004 entre calle 67<sup>a</sup> y calle 67, hoy ubicación del tramo vía seca.**



### 10.5.3. Inventario Septiembre de 2005

Durante la primera semana del mes de septiembre se llevó a cabo el inventario de fallas sobre la pista prueba. La pista de prueba de manera similar a lo encontrado en el inventario anterior se encuentra en estado aceptable de servicio, esto es respaldado por los valores de los índices de rugosidad, en contrastes con el anterior inventario, en general en todos los tramos se empiezan a observar pequeñas fisuras en algunos casos, y en otros se confirman ciertas tendencias hacia el deterioro del tramo. Las densidades de fisuración s pueden observar en la tabla 10.10.

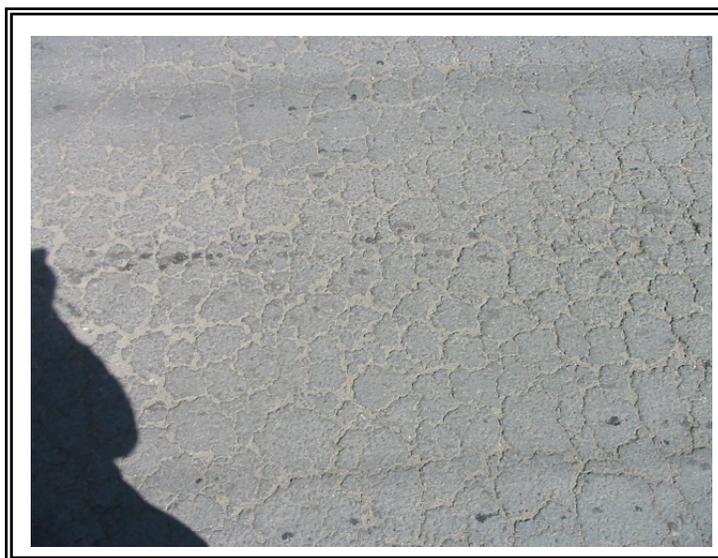
Para el tramo convencional se ha observado la formación de piel de cocodrilo en ambos extremos del tramo, en el extremo vecino a la calle 67 se puede observar en la figura 48 el mallado que ha venido evolucionando con el paso del tiempo, y el otro mallado se encuentra en las vecindades del tramo vía seca el cual se encuentra unido con la inmensa piel de cocodrilo que presenta el tramo vía seca.



**Figura 10.52. Fotografía Junio de 2005 tramo convencional.**



El tramo vía seca como se ha observado desde principio del periodo de seguimiento ha presentado piel de cocodrilo, que ha venido evolucionando con el tiempo, a la fecha se pueden observar sobre esta el inicio de pequeños baches (Figura 10.53 y 10.54).



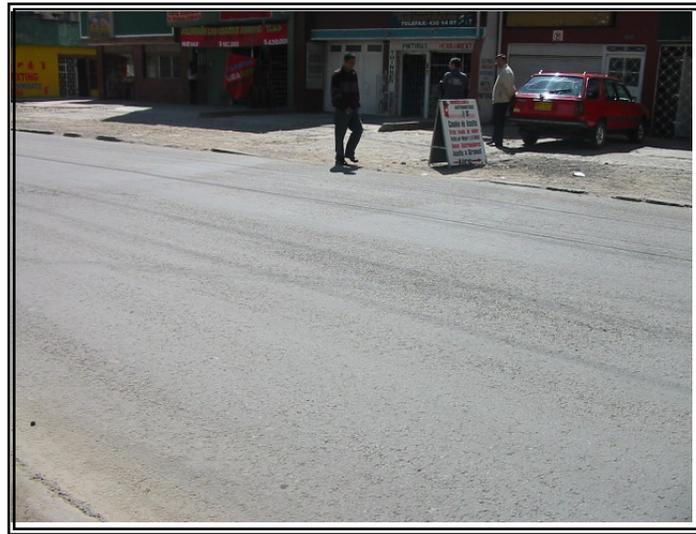
**Figura 10.53. Fotografía Junio de 2005 tramo vía seca, se aprecia mallado denso de fisuras.**



**Figura 10.54. Fotografía Junio de 2005 tramo vía seca, se aprecia formación de bache.**



El tramo de mezcla con polímero SBS, ha presentado un comportamiento aceptable, en cuanto a que su mayor defecto ha sido la presencia de peladuras o excesiva rugosidad en la textura. A nivel estructural o mecánico no ha presentado fallas de consideración. En la figura 10.55 se observa la textura de su rodadura. En la figura 10.56 se presentan las pequeñas fisuras que se han empezado a formar.



**Figura 10.55. Fotografía Junio de 2005 tramo con polímero SBS, se aprecia texturizado de la rodadura.**

El tramo de mezcla modificada con caucho por proceso vía húmeda ha experimentado el mejor comportamiento similar al tramo con polímero SBS, y la tipología de fallas observada ha sido parecida. En las figuras 10.57 y 10.58 se observa el texturizado de la rodadura, y el inicio de la formación de grietas.



**Figura 10.56. Fotografía Junio de 2005 tramo con polímero SBS, se aprecia agrietamiento con tendencia a formación de mallas.**



**Figura 10.57 Fotografía Junio de 2005 tramo vía húmeda, la rugosidad de la rodadura.**

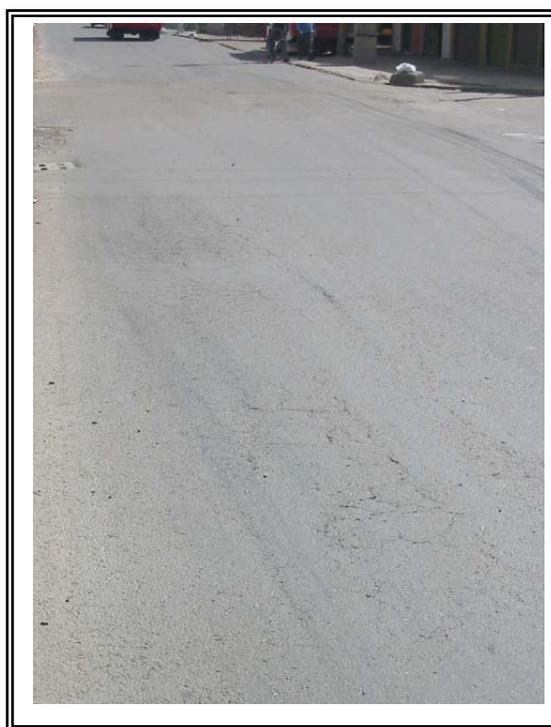


**Figura 10.58. Fotografía Junio de 2005 tramo vía húmeda, mallado de grietas.**

De los tramos con polímeros es el tramo que mayor evidencia de deterioro ha mostrado, presenta fisuramiento transversal, fisuramiento longitudinal y pieles de cocodrilo en algunos sectores. Sin embargo sus fisuramiento no ocupa áreas importantes de la calzada, y sugiere como causas de estos agrietamientos la rigidez que mostrado esta mezcla, como se pudo observar en el parte de reología de ligantes. Algunas de las fallas presentadas se pueden observar en las figuras 10.59 y 10.60. La Tabla 10.12 muestra un cuadro comparativo de las densidades de fisuración, durante los dos inventarios de fallas realizados hasta la fecha.



**Figura 10.59. Fotografía Junio de 2005 tramo con polímero SBR, se aprecia fisuramiento transversal a lo ancho de la calzada.**

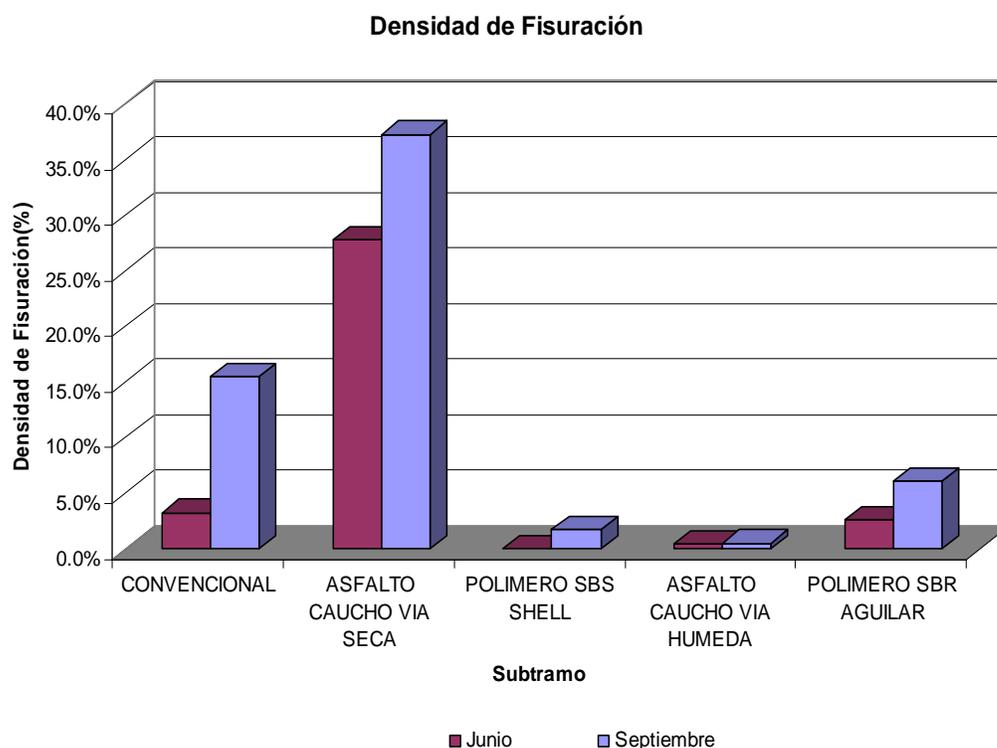


**Figura 10.60. Fotografía Junio de 2005 tramo con polímero SBR, se aprecia fisuramiento longitudinal sobre la huella del carril izquierdo.**



**Tabla 10.11. Densidades de Fisuración Junio 2005.**

TRAMO	DENSIDAD DE FISURACIÓN	RANKING
CONVENCIONAL	15.5%	4
ASFALTO CAUCHO VIA SECA	37.3%	5
POLIMERO SBS SBR	1.7%	2
ASFALTO CAUCHO VIA HUMEDA	0.5%	1
POLIMERO SBR SBR	6.1%	3



**Figura 10.61. Cuadro comparativo de densidades de fisuración por subtramo.**



#### 10.5.4. Inventario Noviembre de 2005

En las figuras a continuación, se presentan algunas fotografías correspondientes al último periodo de auscultación. Como se puede observar en las fotografías, el estado de la pista en general es aceptable. Los resultados obtenidos en el sector construido con mezcla asfalto-caucho mediante proceso húmedo son bastante alentadores, teniendo en cuenta que ha presentado la menor densidad de fisuración. Este tramo como lo evidencian los resultados mostrados, ha superado en cuanto a desempeño a los tramos construidos con asfalto comerciales modificados con polímeros. Es claro que el tramo construido con mezcla asfalto caucho mediante proceso seco no arrojó los resultados esperados. Es así como luego de un año de servicio el tramo vía seca experimenta el mayor deterioro en relación con todos los tipos de mezclas estudiados. Sin embargo estos resultados fueron previamente pronosticados mediante las pruebas de desempeño que se realizaron al momento de evaluar el desempeño de la mezclas en laboratorio.



**Figura 10.62 Tramo convencional.**

El tramo convencional Figura 10.62, presenta en pocas cierto mallado de fisuras tendientes a formar piel cocodrilo. Es de destacar que la zona con mezcla convencional vecina al tramo vía seca muestra evidencias de una mezcla bastante envejecida, que en conjunto con



una zona de subrasante blanda, han producido el acelerado deterioro que presenta el sector comprendido entre las abscisas K0+045 y el K0+070(Figura 10.63).

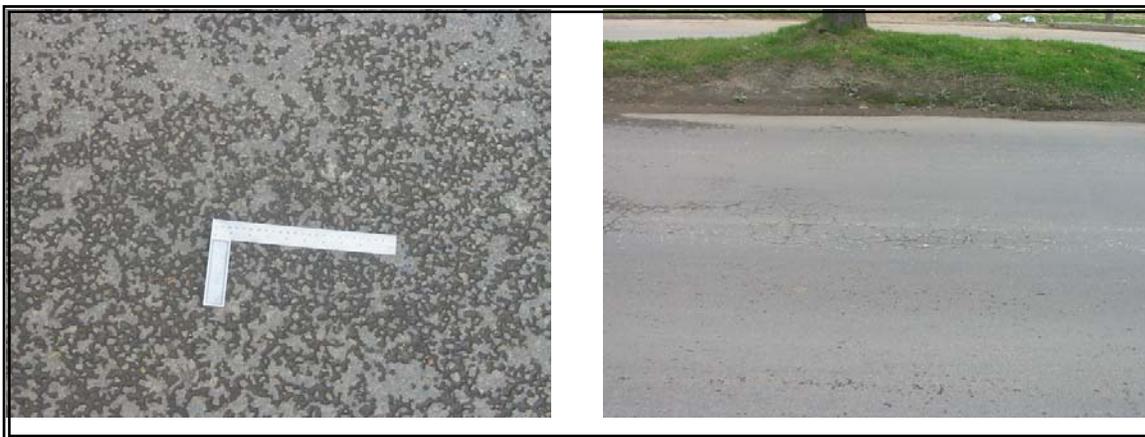
Las figuras 10.63, 10.64, 10.65 y 10.66 resumen el estado de los diferentes subtramos luego de un año de servicio.



**Figura 10.63. Tramo con asfalto caucho modificado por proceso vía seca.**



**Figura 11. Tramo de mezcla modificada por proceso vía seca**



**Figura 12. Tramo con asfalto modificado comercial con polímero SBS.**



**Figura 10.66. Tramo de mezcla modificada por proceso vía húmeda.**



**Figura 10.67. Tramo con asfalto modificado comercial con polímero SBR.**

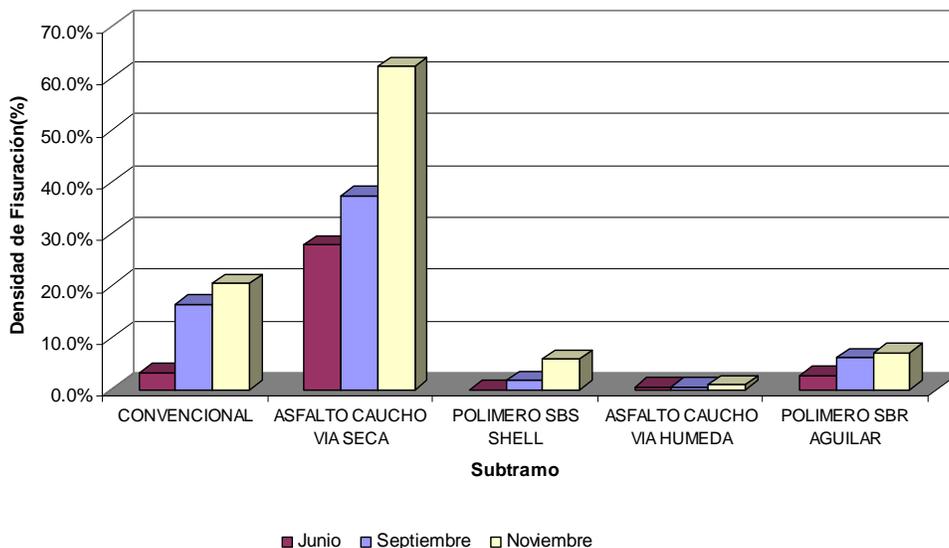
Como se puede observar en la Tabla 10.12 las mezclas modificadas a excepción de la mezcla vía seca exhiben poco deterioro (menor del 10%). Sin embargo, un valor importante en cuanto a resultados es el primer lugar que ocupa la mezcla modificada con caucho mediante proceso húmedo (0.9% en densidad de fisuración).

**Tabla 10.12. Densidad de fisuración de la pista de prueba luego de 12 meses de servicio.**

TRAMO	DENSIDAD DE FISURACIÓN	RANKING
CONVENCIONAL	20.5%	4
ASFALTO CAUCHO VIA SECA	62.2%	5
POLIMERO SBS	5.9%	2
ASFALTO CAUCHO VIA HUMEDA	0.9%	1
POLIMERO SBR	7.1%	3



### Densidad de Fisuración



**Figura 10.68. Densidad de fisuración a lo largo del periodo de seguimiento**

### 10.5.3. Evaluación del Deterioro superficial

La evaluación del deterioro superficial se llevó siguiendo la metodología establecida en el documento maestro IDU – TNM contrato 834 de 1999.

El documento define a la metodología desarrollada por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos PAVER 2 como la metodología a seguir para evaluar el deterioro superficial de un pavimento.

Esta metodología establece dos indicadores:

OPI: Overall Pavement Index, Índice de Condición Global del pavimento

MDR: Modified Distress Rating, referido a las fallas superficiales.

Estos indicadores se relacionan a través de la siguiente expresión:



$$OPI = MDR * ((5 * e^{(0.198 - 0.261 * IRI)} / 5)^{0.12})$$

$$\text{Donde } MDR = 100 - \sum (pn_i^2)^{1/2}$$

“*pn*” es el peso de ponderación del daño según su severidad y extensión, Este cálculo se basa en los valores obtenidos de las respectivas curvas o pesos en función del grado de severidad y de la extensión del daño de acuerdo con el sistema PAVER.

Los tipos de fallas y los códigos utilizados en muestran en la tabla 10.13

**Tabla 10.13. Códigos de los Tipos de fallas**

PAVIMENTO FLEXIBLES Y MIXTOS	
DENOMINACIÓN	CODIGO DE INVENTARIO
Peladuras	14
Exudación de asfalto	15
Baches Descubiertos	16
Desintegración de bordes	17
Hundimiento	18
Corrugaciones y desplazamientos	19
Ahuellamiento	20
Fisuramiento longitudinal	21
Fisuramiento transversal	22
Fisuramiento de Borde	23
Fisuramiento de Bloque	24
Fisuramiento piel de cocodrilo	25
Fisuramiento por reflexión de juntas	26

Considerando el inventario de fallas realizado durante el mes de noviembre de 2005, es decir al final del año de seguimiento de la pista de prueba y utilizando las curvas consignadas en el documento maestro mencionado en la parte superior se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 10.14. MDR y OPI calculados para el tramo de mezcla convencional**



Tramo con mezcla convencional (asfalto Barranca 80-100)

Tipo de falla	severidad	%area	pn	pn2	MDR	IRI (m/km)	OPI
21	m	0.6	4	16	43.2461455	3.56	39.613458
22	a	0.13	10	100			
22	m	0.08	4	16			
24	a	0.6	8	64			
25	a	12	55	3025			
				$\sum p n_i^2$	3221		

**Tabla 10.15. MDR y OPI calculados para el tramo de mezcla asfalto caucho mediante proceso vía seca.**

Tramo con mezcla modificada por proceso vía seca

Tipo de falla	severidad	%area	pn	pn2	MDR	IRI (m/km)	OPI
16	a	1.32	24	576	9.19801764	4.17	8.26594107
21	m	0.14	4	16			
21	b	0.05	1	1			
24	b	0.58	4	16			
24	m	0.1	4	16			
25	a	43.64	70	4900			
25	m	2.76	52	2704			
22	m	0.03	4	16			
				$\sum p n_i^2$	8245		

**Tabla 10.16. MDR y OPI calculados para el tramo de mezcla modificada con polímero SBS**

Tramo de mezcla con polímero SBS

Tipo de falla	severidad	%area	pn	pn2	MDR	IRI (m/km)	OPI
25	m	5.84	25	625	74.8206434	2.98	69.7920585
16	m	0.03	3	9			
				$\sum p n_i^2$	634		

**Tabla 10.17. MDR y OPI calculados para el tramo de mezcla asfalto caucho mediante proceso húmedo.**

Tramo con mezcla modificada por proceso vía secavía húmeda

Tipo de falla	severidad	%area	pn	pn2	MDR	IRI (m/km)	OPI
21	b	0.5	1	1	97.5505103	3.48	89.5804136
22	b	0.08	1	1			
24	b	0.23	2	4			
				$\sum p n_i^2$	6		

**Tabla 10.18. MDR y OPI calculados para el tramo de mezcla modificada con polímero SBR.**

Tramo de mezcla con polímero SBR

Tipo de falla	severidad	%area	pn	pn2	MDR	IRI (m/km)	OPI
21	b	2.14	1	1	71.8930614	4.45	64.043706
21	m	0.36	4	16			
22	b	0.13	1	1			
22	m	0.36	4	16			
24	m	0.16	4	16			
25	b	0.17	8	64			
25	m	2.6	26	676			
				$\sum p n_i^2$	790		

**Tabla 10.19. Valores de MDR, OPI e IRI pista de prueba.**

TIPO DE MEZCLA	MDR	IRI (m/km)	OPI
Tramo de mezcla con polímero SBR	71.89	4.45	64.04
Tramo con mezcla modificada por proceso vía húmeda	97.55	3.48	89.58
Tramo de mezcla con polímero SBS	74.82	2.98	69.79
Tramo con mezcla modificada por proceso vía seca	9.198	4.17	8.26
Tramo con mezcla convencional (asfalto Barranca 80-100)	43.246	3.56	39.61

**Tabla 10.20. Clasificación del estado de pavimentos de acuerdo al manual de diagnóstico.**

Rango de IRI	Rango de MDR	Rango de OPI	Calificación	Clasificación
0-4	79-100	71-100	Excelente	Verde
5-6	59-78	51-70	Bueno	Amarillo
7-9	40-58	31-50	Regular	Naranja
> 10	0-39	0-30	Malo	Rojo

Como se puede observar en la tabla 10.19, los tramos con valores superiores a 71 en el MDR son en primer lugar el tramo con asfalto-caucho por proceso húmedo, seguido por el tramo con polímero SBS y SBR respectivamente. El tramo con mezcla convencional



---

merece una calificación de estado regular y el tramo con mezcla asfalto-caucho por proceso seco una calificación de malo. De acuerdo con el manual de diagnóstico del IDU, una calificación de estado malo en conjunto con un estado estructural deficiente (número estructural bajo) indican que el pavimento requiere una rehabilitación, si embargo se determinación se sale del alcance del presente proyecto.

De acuerdo con la tabla 10.20, el único tramo que merece calificación excelente es el tramo de asfalto caucho por proceso húmedo.

La calificación excelente quiere decir que el tramo vía húmeda en relación con los tramos con polímero de SBS y SBR, presenta mayor durabilidad y por consiguiente mayor vida útil, incluso que un asfalto modificado comercial.



---

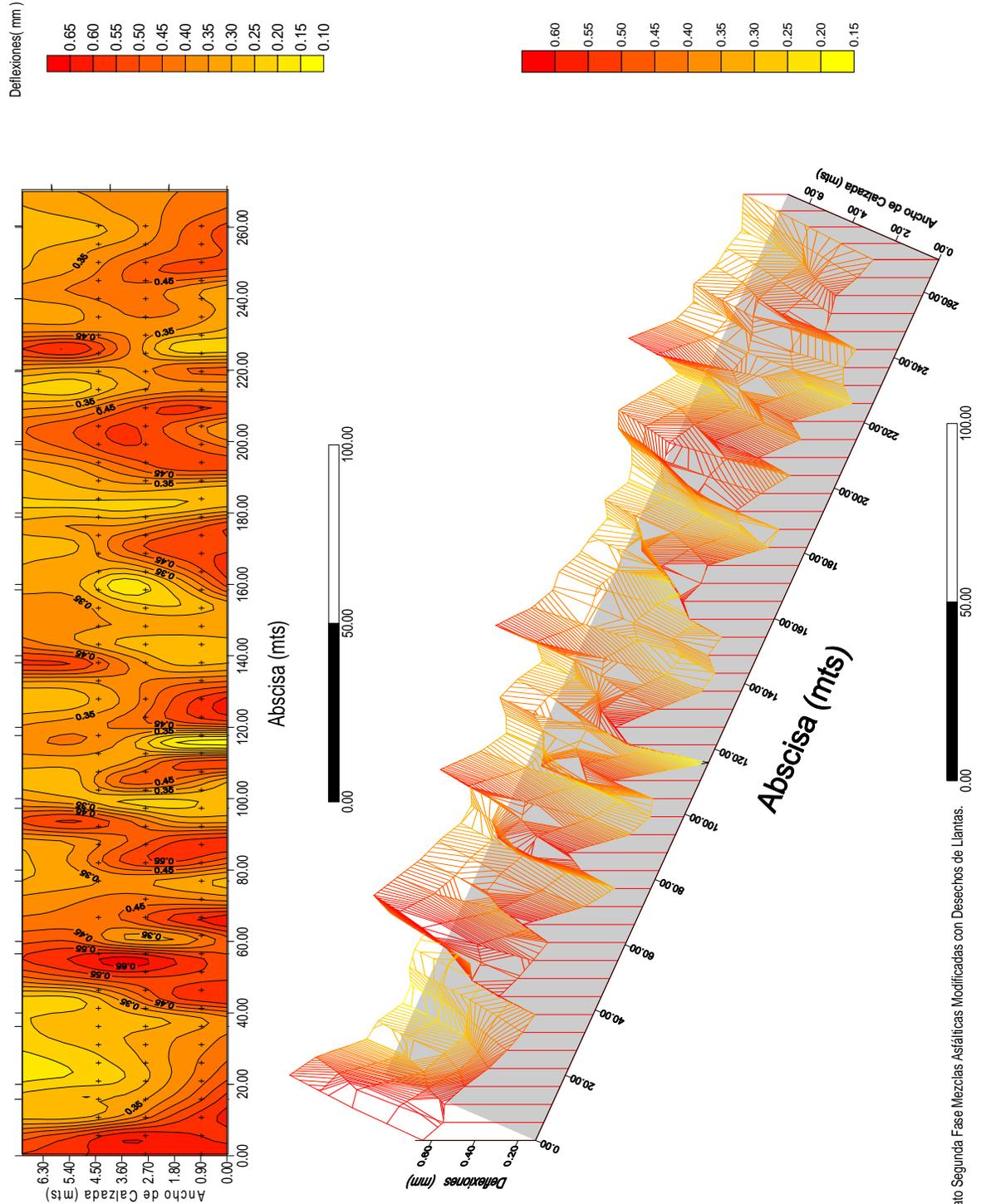
## 10.6. Deflexiones Máximas pista de prueba barrio Los Álamos

En las páginas siguientes se presentan las superficies de contorno de las deflexiones medidas sobre la pista de prueba, en la primera superficie se observan las deflexiones medidas sobre la base reciclada, como es de esperar son bastante altas del orden 1.5 mm, en ellas se alcanza a observar la diversidad en las deflexiones a lo largo de la pista de prueba. Se puede observar sobre esta capa algunas zonas en donde se encuentra localizadas las mayores deflexiones, dentro de estas zonas se pueden citar las abscisas K0+050, lugar donde se encuentran ubicados los tramos vía seca y convencional, la abscisa k0+085 que coincide con el tramo vía seca y en donde hoy en día se presenta el mayor deterioro de todo el tramo.

Posterior a la base reciclada se encuentran las superficies de contorno de los cuatro periodos siguientes de medición. En estas figuras las deflexiones por obvias razones son menores a las medidas sobre la base reciclada. Sobre estas superficies se puede confirmar la poca homogeneidad de la subrasante, dado que se observan puntos donde se presentan altas deflexiones en relación con el tipo de estructura colocada. De la misma manera quedan en evidencia las zonas de baja portancia en la subrasante, justificadas en la incidencia de estas zonas en los mismos puntos a lo largo del periodo de las mediciones. Teniendo presente la variabilidad en los valores de las deflexiones, se puede despreciar el efecto de la subrasante en la pista de prueba, esto es para variadas condiciones de subrasante y diferentes tipos de mezclas, el tramo que mayor deterioro presentó fue el tramo vía seca. Por el contrario para la misma variabilidad en subrasante, el tramo con mezcla modificada mediante proceso húmedo, presentó mínimo deterioro.



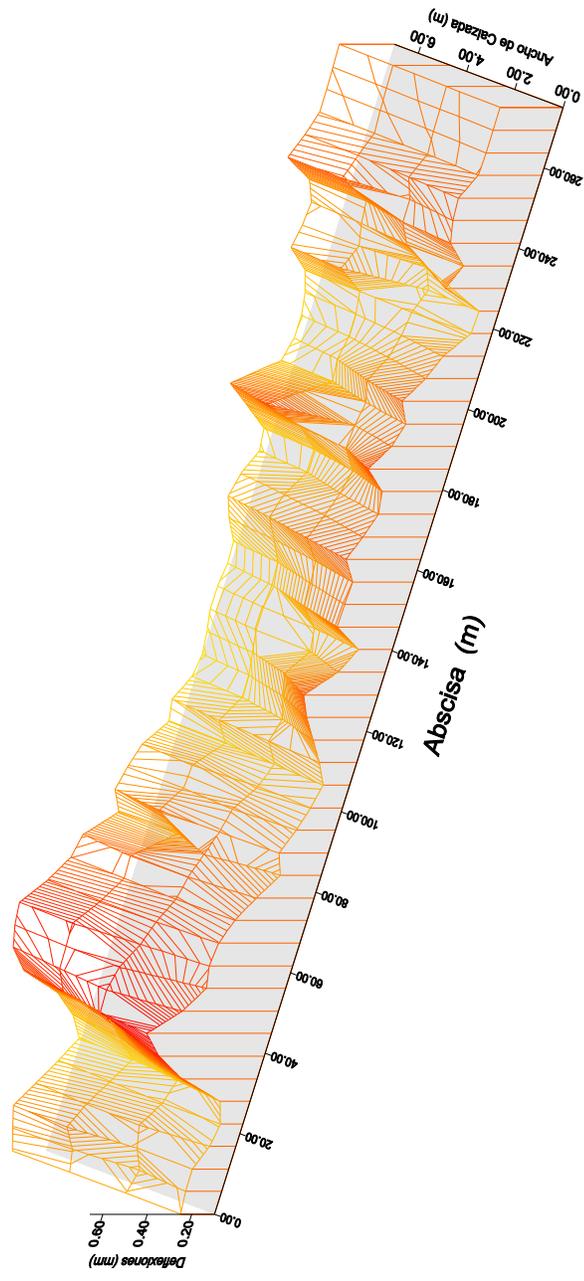
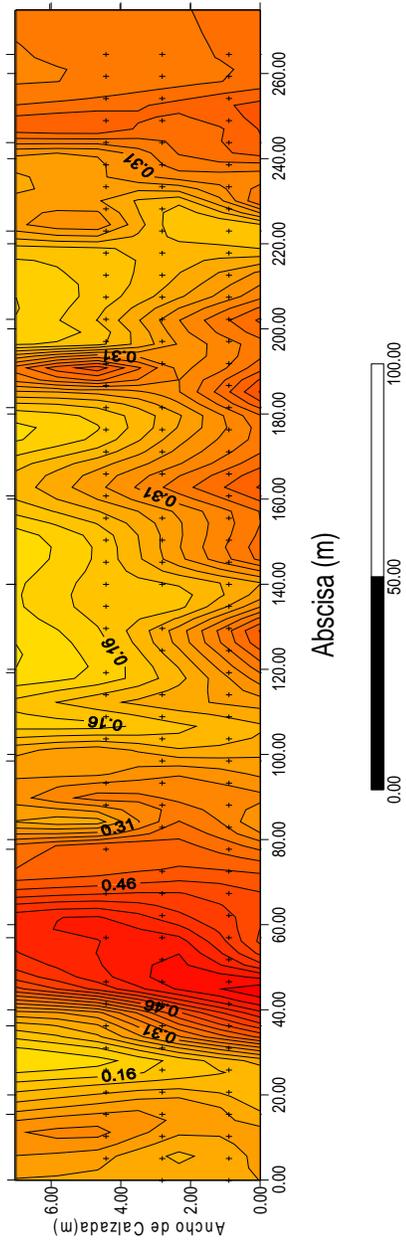
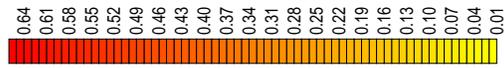
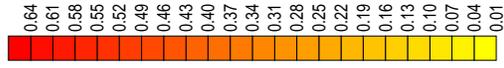
# SUPERFICIE DE CONTORNO DE DEFLEXIONES MÁXIMAS-PISTA DE PRUEBA ÁLAMOS DIC-04



Contrato Segunda Fase Mezclas Asfálticas Modificadas con Desechos de Llantas.



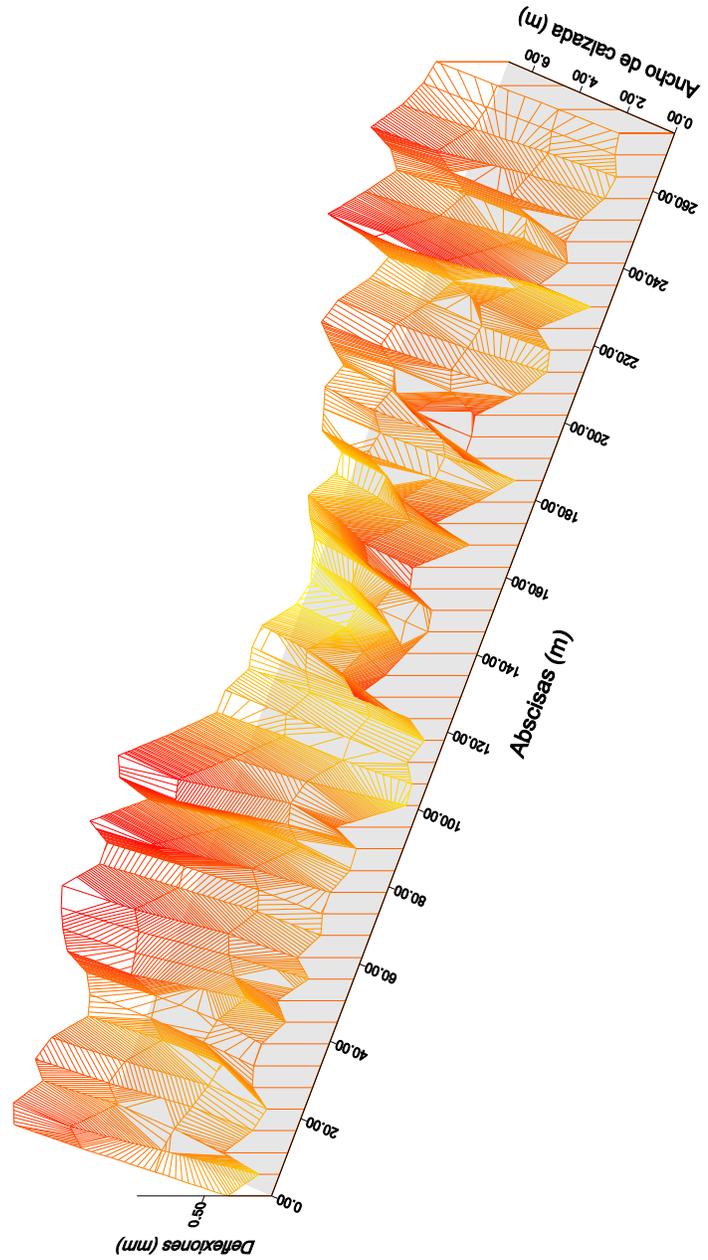
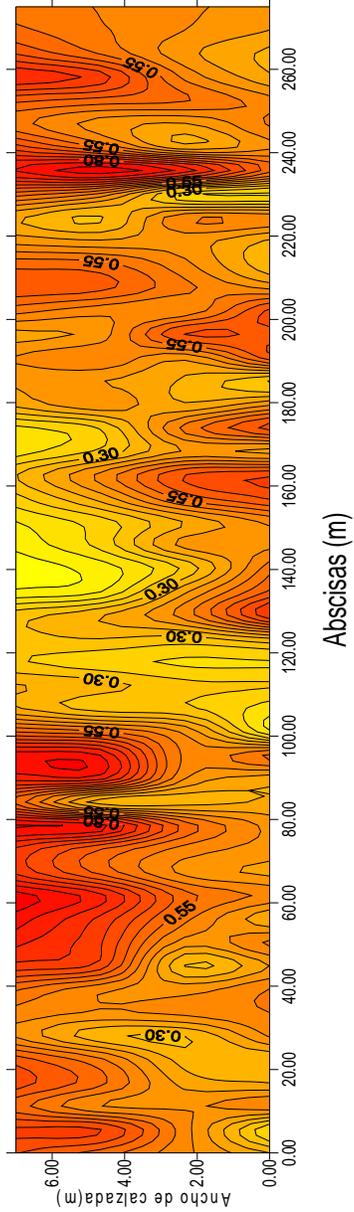
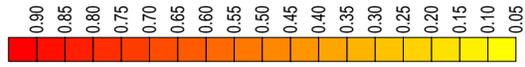
# DEFLEXIONES MÁXIMAS PISTA DE PRUEBA MEDICIÓN MES DE ABRIL

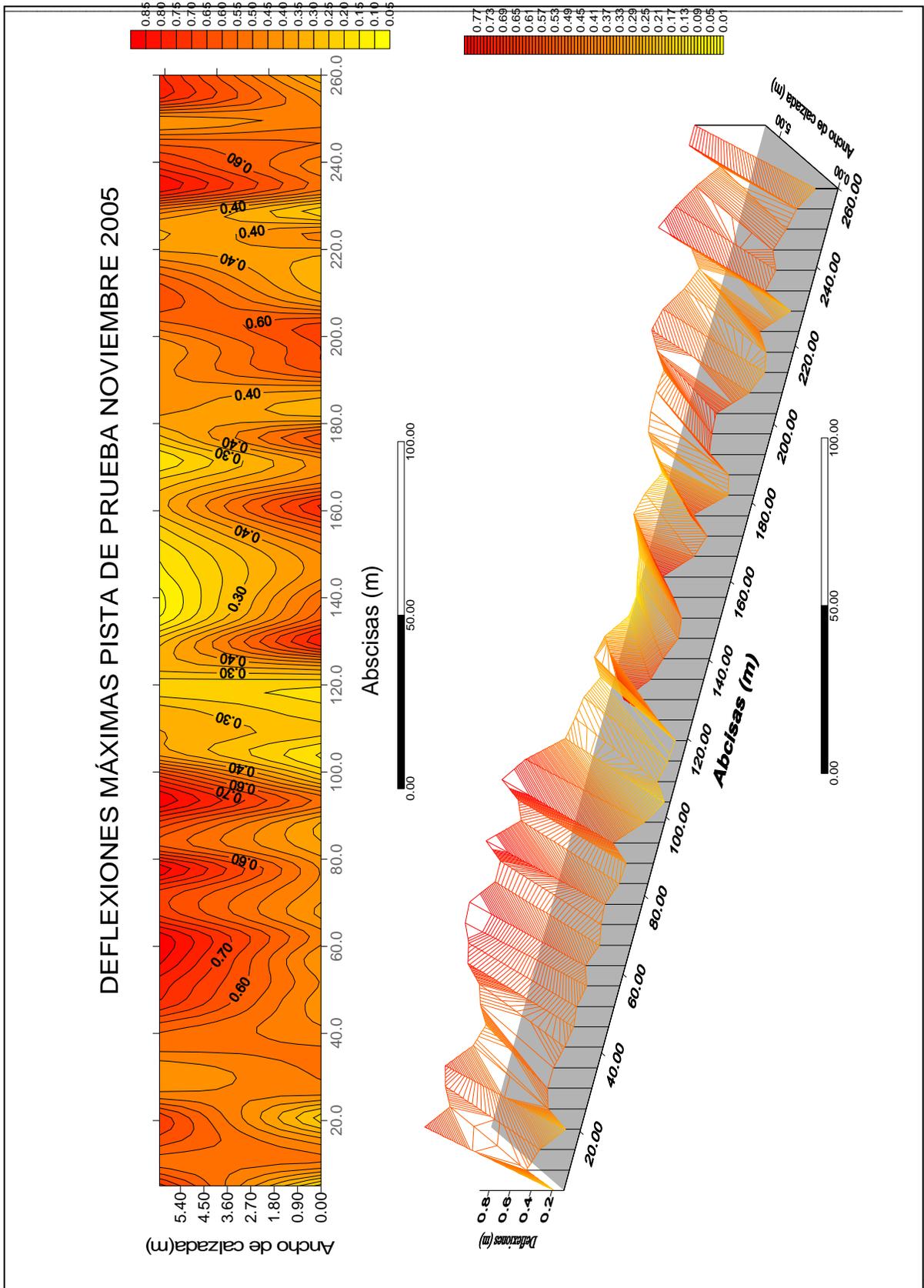


Medidas tomadas mediante viga Benkelmana Abril 05.



# DEFLEXIONES MÁXIMAS PISTA DE PRUEBA ÁLAMOS AGOSTO







## 11. CONCLUSIONES

### 11.1. GENERALES

- El grano de caucho reciclado (GCR) obtenido de llantas usadas puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un modificador del ligante (proceso húmedo).
- Los resultados obtenidos mediante el proceso por vía seca no fueron los esperados, este tipo de mezcla se caracterizó por tener baja adherencia, y poca resistencia durante los ensayos de desempeño practicados. Se recomienda profundizar en este tipo de mezclas en especial en el tema de granulometría de la mezcla.
- Entre menor sea el tamaño máximo del GCR que se utilice para mejorar las mezclas asfálticas ó modificar el ligante serán mejores los resultados obtenidos, esto por el hecho que facilita la homogenización de la mezcla y disminuye los tiempos de reacción durante el proceso de modificación.
- El GCR utilizado para el proceso húmedo mejora la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas, sin embargo hace que los módulos dinámicos disminuyan.
- La deformación plástica en ciertos casos es incrementada por la incorporación de caucho como modificador de ligante ó como modificador de la mezcla, sin embargo para las mezclas modificadas mediante proceso húmedo los valores de velocidad de deformación se mantienen dentro del rango admisible ( $< 30$  um/min.). Para la mezcla modificada por proceso seco la velocidad de deformación no cumplió con el rango admisible, ocupando las peores resistencias al ahuellamiento en conjunto con los ligantes no modificados.



- Se puede trabajar con husos granulométricos convencionales para la fabricación de mezclas asfálticas mejoradas con caucho.
- El empleo del GCR incrementa la vida útil de un pavimento.
- Los costos de una mezcla asfáltica mejorada con GCR son mayores que los de una mezcla asfáltica convencional.
- Luego de haber construido un tramo de prueba a escala real, sometido al clima y a las cargas reales, se puede concluir que la metodología por proceso húmedo es mucho más confiable que la metodología por proceso seco.
- Los ligantes y mezclas con asfalto caucho se postulan como una excelente alternativa ambiental en la disposición de desechos de llantas, de la misma manera se abren paso como el ligante modificado del futuro a corto plazo en Colombia.

## 11.2. ESPECÍFICAS

### 11.2.1. Respecto al cemento asfáltico modificado con caucho

- El contenido de GCR óptimo para modificar el ligante Barrancabermeja fue de 18% en relación al peso del mismo.
- El grado de desempeño para el ligante de Barrancabermeja tanto 70-90 como 80-100 de penetración es incrementado por lo menos 2 grados Superpave esto de 58-22 a 70-22. Este incremento se traduce desde el punto de vista de reología en mayor resistencia en el factor de ahuellamiento  $G^*/\sin \delta$  y el factor de fatiga  $G^* \sin \delta$ .
- El desempeño del ligante modificado mediante proceso húmedo es similar al de los asfaltos comerciales modificados con polímeros SBR y SBS, y en algunos casos el desempeño del asfalto caucho es mejor que el modificado con polímeros.



- Dentro de las propiedades reológicas generadas al modificar el cemento asfáltico con GCR se incrementan la rigidez (módulo viscoelástico) y la componente elástica (menor ángulo de fase).
- La viscosidad Brookfield de los ligantes modificados con GCR son mucho más altas que las de los ligantes sin modificar, esto se debe a que el caucho cambia las propiedades de la mezcla resultante. En el proceso de mezclado el GCR absorbe parte de los Maltenos del cemento asfáltico, adicional a esto el ligante pierde volátiles por el proceso de modificación al someterlo a altas temperaturas por largos periodos de tiempo. Este aspecto puede proporcionar una interfase más robusta del nuevo ligante, con la consecuente mejora en la durabilidad de la mezcla asfáltica.
- El GCR en el ligante aumenta el punto de ablandamiento, y disminuye la ductilidad y la penetración, aspecto éste relacionado con el incremento de la viscosidad.
- En un cemento asfáltico modificado con caucho el GCR tiende a separarse del ligante cuando este se encuentra en reposo, por lo que el almacenamiento debe hacerse manteniendo la agitación.
- Los resultados obtenidos en la medida de la viscosidad de Brookfield no fueron los esperados de acuerdo con la literatura en el tema (1500 cP y 3000 cP), a pesar de esto los resultados son bastante positivos, y durante la modificación en planta no presentaron problemas de bombeo, relacionados con los valores de viscosidad por fuera del rango establecido.

Debe aclararse que los resultados obtenidos en las mezclas asfalto-caucho seleccionadas se lograron con un porcentaje determinado de GCR. Es posible que la tendencia de los resultados cambie con cantidades diferentes de GCR o con las características del ligante.



### 11.2.2. Respecto a las mezclas asfálticas mejoradas con caucho

- Al utilizar un tipo de mezcla con granulometría tipo IDU 0/14 se obtienen resultados aceptables en mezclas modificadas con ligante asfalto-caucho mediante proceso húmedo. Las principales ventajas se evidencian en el incremento de la resistencia a la fatiga, en la disminución de la velocidad de deformación en el ensayo de ahuellamiento, y en una mejor susceptibilidad al agrietamiento por temperatura.
- La modificación de mezclas mediante proceso húmedo mejora la resistencia a la fatiga de las mezclas en relación con los ligantes no modificados. El comportamiento de las mezclas modificadas mediante proceso húmedo en cuanto a fatiga es muy similar al obtenido con mezclas elaboradas con ligantes comerciales modificados con polímeros (SBR, SBS).
- En general el contenido de asfalto tanto para mezclas asfalto caucho como para las mezclas convencionales se encontró entre 6 y 7%.
- El contenido óptimo de ligante en una mezcla asfáltica aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de adición de GCR, debido a la absorción de ligante que éste produce.
- El ensayo de deformación permanente indica que las mezclas con caucho son más deformables, lo que se corresponde con el valor de los módulos dinámicos.
- Los valores de módulos dinámicos señalan menos susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica, lo cual favorece que no se fisure fácilmente a bajas temperaturas, ni haya un excesivo riesgo de deformabilidad a elevadas temperaturas.
- Las pruebas de adherencia mediante el ensayo de inmersión compresión mostraron que la incorporación de caucho disminuye la adherencia en las mezclas. En la mezcla mediante proceso seco se encontró la menor resistencia al agua. Los ligantes más duros (Apiay 60-70) mostraron la mejor adherencia.



- Se encontró que el ligante Apiay 60-70 se comportó entre las mejores mezclas al ser modificado mediante proceso húmedo en todas las pruebas de desempeño. Mostrando esto buena afinidad entre el caucho y los ligantes de bajas penetraciones.
- La fabricación de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho no requiere de grandes cambios en la planta asfáltica, resultando muy sencillo el proceso de elaboración de la misma.

### **11.2.2. Respecto a las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con caucho y colocadas en el tramo de prueba de los Álamos.**

De la experiencia obtenida en la construcción de la pista de prueba con un tramo de mezclas con ligante convencional, dos tramos de mezclas con ligante comercial modificado con polímeros (SBR, SBS), un tramo con mezcla con ligante modificado con caucho por proceso húmedo y la mezcla modificada mediante proceso seco se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

- Todos los tramos fueron construidos utilizando técnicas y equipos convencionales de construcción de pavimentos. La energía de compactación fue determinada en campo a través trenes de carga. Solo el tramo con mezcla elaborada mediante proceso seco requiere un tiempo de compactación mayor hasta alcanzar los 60°C.
- A lo largo de la pista de prueba durante el periodo de seguimiento pasaron 1'500.000 vehículos mixtos distribuidos en: vehículos livianos 59%, buses 4%, microbuses 14%, busetas 16% y camiones 7%.
- El análisis de deflexiones muestra que el tramo de prueba en general presenta una alta variabilidad en capacidad estructural. En especial el tramo con mezcla por proceso seco, que se encuentra ubicado en una zona de subrasante blanda. Como se pronosticó en los ensayos de desempeño de mezclas en laboratorio, la mezcla por proceso seco experimentó el deterioro más avanzado y prematuro en relación con



los otros tramos. Este deterioro se ve justificado en los indicadores de estado superficial del pavimento  $MDR = 9.1$  y  $OPI = 8.26$ , en este respecto el manual de diagnóstico del IDU establece que un OPI entre 0 y 30 indica un estado malo del pavimento.

- El tramo con mayor deterioro después del tramo con mezcla asfalto-caucho por proceso seco fue el tramo con mezcla convencional con ligante Barranca 80-100.
- El tramo con mezcla con ligante asfalto-caucho modificado por proceso húmedo presentó un excelente desempeño mostrando los menores índices de fallas  $MDR=97.5$  y  $OPI= 89$ .
- Los tramos con mezclas con ligantes comerciales modificados SBR ( $MDR=71.8$ ,  $OPI=64$ ), y SBS ( $MDR=74.8$ ,  $OPI=69$ ), experimentaron un buen desempeño a lo largo del año del seguimiento, sin embargo como se puede observar en los valores de MDR y OPI no alcanzan a superar el desempeño de la mezcla con ligante modificado por proceso húmedo.
- Como se puede evidenciar luego de un año, el tramo con mezcla con ligante asfalto-caucho ha presentado los mayores índices de durabilidad en relación con la mezcla no modificada, y los tramos con polímeros, por lo tanto ha quedado evidenciada la mayor durabilidad que ofrece la modificación de ligantes con desechos de llantas en un ejercicio a escala real.



## 12. RECOMENDACIONES

- La fabricación de ligante con caucho por proceso húmedo puede realizarse en un reactor convencional de producción de ligantes modificados. El control en el bombeo del ligante debe llevarse a cabo mediante el chequeo de la viscosidad de Brookfield.
- El ligante modificado con GCR debe diseñarse controlando la viscosidad Brookfield, la penetración y el punto de ablandamiento. Las mezclas asfálticas elaboradas con ligante modificado con GCR se deben diseñar mediante evaluación de módulos dinámicos y contenido de vacíos con aire.
- En caso de que se quiera conservar la mezcla asfalto-caucho a altas temperaturas para un posterior uso, es necesario mantenerla en agitación constante, y no debe ser utilizada después de haber transcurrido 48 horas de su fabricación.

Puesto que la calidad de los ligantes nacionales cambia constantemente, se recomienda efectuar los ensayos de laboratorio requeridos para determinar el comportamiento de los mismos con la adición de GCR, para lo que se sugiere seguir el programa metodológico desarrollado en la presente investigación. Cuando cambien las propiedades de los materiales se debe procurar diseñar nuevamente las mezclas asfálticas.

Se deben buscar nuevos husos granulométricos para elaborar mezclas asfálticas con asfalto modificado con GCR que cumplan con las propiedades mecánicas especificadas, considerando criterios de diseño y granulometrías especificadas por las entidades estatales competentes para tal fin.



---

En la modificación de ligantes con caucho es conveniente estudiar los beneficios que se pueden obtener al emplear tamaños de grano mucho más fino al utilizado en este estudio.

Es importante empezar a considerar sobrecapas asfálticas con mezclas con asfalto-caucho en los contratos de mantenimiento de la malla vial de la ciudad, como una alternativa con bastante potencial en cuanto durabilidad y disminución de espesores.



### 13. BIBLIOGRAFÍA

ASPHALT RUBBER 2000. (1° : 2000 : Vilamoura). Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference. Braga : Barbosa & Xavier, 2000. 711 p.

COLOMBIA, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usadas generadas por el parque automotor de Bogotá. En Gestión de residuos en Bogotá. Bogotá D.C. : DAMA, 2000. p. 51-69

COLOMBIA, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogotá D.C. : Impreandes Presencia S.A, 1998.

COLOMBIA, Instituto Nacional de Vías. Normas de ensayo de materiales para carreteras, Tomo II. Bogotá D.C. : Impreandes Presencia S.A, 1998.

COLOMBIA, Instituto Nacional de Vías. Normas de ensayo de materiales para carreteras, Tomo III. Bogotá D.C. : Impreandes Presencia S.A, 1998.

COLOMBIA, Instituto de Desarrollo Urbano. Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D. C.. Bogotá : Universidad de Los Andes, 2000. 188 p.

ESTADOS UNIDOS. Federal Highway Administration. Crumb rubber modifiers (CRM) in asphalt pavements : Structural design of pavements containing CRM materials interim report. Corvallis : FHWA, 1995. 88 p. ISBN FHWA-95-00035-XX.



ESTADOS UNIDOS. Federal Highway Administration. State of the practice – Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. Washington : FHWA, 1992. 118 p. ISBN FHWA-92-022

ESTADOS UNIDOS. California Department of Transportation. California special provision : Gap-graded Asphalt Rubber. En : Federal Highway Administration. FHWA, 1995.

Asphalt Rubber Conference (Sebaaly et al., 2000, Leite et al., 2000).

Charles E. Dougan, , Jack E. Stephens, James Mahoney, Gilbert Hansen. E\* - DYNAMIC MODULUS, Test Protocol – Problems and Solutions, Report Number CT-SPR-0003084-F-03-3. University of Connecticut, Date, April, 2003.

<http://tti.tamu.edu/researcher/v34n2/pavecure.stm>. Ultima visita Febrero de 2002.

<http://www.allstatesasphalt.com/nf-sv-6.htm>. Ultima visita Octubre de 2001.

<http://www.asphalt.com/emulsions/rubber.html>. Ultima visita Febrero de 2002.

<http://www.autoreporte.com.ar/michelin.htm>. Última visita Junio de 2002.

<http://www.bei-emulsions.com/rubber.htm>. Ultima visita Noviembre de 2001.

[http://www.carreteros.org/pg3/articulos/5/iv/a\\_542b.htm](http://www.carreteros.org/pg3/articulos/5/iv/a_542b.htm). Ultima visita Julio de 2002.

[http://www.carreteros.org/firmes/6\\_1y2ic/apartados/3\\_1.htm](http://www.carreteros.org/firmes/6_1y2ic/apartados/3_1.htm). Ultima visita Julio de 2002.



<http://www.ces.clemson.edu/arts/>. Ultima visita Octubre de 2002.

<http://www.consulpav.com/AR2000/>. Ultima visita Febrero de 2002.

<http://www.dama.gov.co/publnw/plaz/plaz5.htm>. Ultima visita Octubre de 2001.

<http://www.dot.state.tx.us/insdot/orgchart/gsd/recycle/projects.htm>. Ultima visita Febrero de 2002.

<http://www.e-asfalto.com/aditivos/aditivos.htm>. Ultima visita Marzo de 2002.

<http://www.ecopetrol.com.co/ecop/catalogo/index.htm>. Ultima visita Mayo 2002.

[http://www.enviroaccess.ca/fiches\\_4/F4-04-95a.html](http://www.enviroaccess.ca/fiches_4/F4-04-95a.html). Ultima visita Noviembre de 2001.

<http://es.epa.gov/new/contacts/newsltrs/ctc/ctc0794.html>. Ultima visita Septiembre de 2002.

<http://www.graniterock.com/products/technotes/tn744.htm>. Ultima visita Octubre de 2001.

<http://www.infratech.com/rubarb.htm>. Ultima visita Octubre de 2002.

<http://www.isri.org/industryinfo/rubber.htm>. Ultima visita Noviembre de 2002.

[http://www.lds.com/productserv/recovery/asphalt\\_rubber.htm](http://www.lds.com/productserv/recovery/asphalt_rubber.htm). Ultima visita Enero de 2002.



---

<http://www.miexamen.com.mx/Materiales%20compuestos.htm>. Ultima visita Noviembre de 2002.

<http://www.recycle.net/assn/rs000199.html>. Ultima visita Mayo de 2002.

<http://www.rilaic.com/puertos.htm>. Ultima visita Noviembre de 2001.

[http://www.rubberpavements.org/library/sacramento\\_noise\\_study/outside.html](http://www.rubberpavements.org/library/sacramento_noise_study/outside.html). Ultima visita Febrero de 2002.

<http://www.rubberpavements.org/>. Ultima visita Abril de 2002.

[http://www.rubberpavements.org/library/lcca\\_australia/](http://www.rubberpavements.org/library/lcca_australia/). Ultima visita Febrero de 2002.

[http://www.rubberpavements.org/library/fp25\\_index.asp](http://www.rubberpavements.org/library/fp25_index.asp). Ultima visita Mayo de 2002.

<http://www.tfhr.gov/pubrds/spring97/crum.htm>. Ultima visita Mayo de 2002.

<http://www.tfhr.gov/pubrds/pr97-10/p52.htm>. Ultima visita Febrero de 2002.

<http://www.uc.org.uy/edi0499.htm>. Ultima visita Octubre de 2002.

[http://www.upc.es/op/castella/noticias/acinvestigacion/1997/Neumaticosrecicladosasfaltado\\_carreteras.html](http://www.upc.es/op/castella/noticias/acinvestigacion/1997/Neumaticosrecicladosasfaltado_carreteras.html). Ultima visita Marzo de 2002.

<http://www.uwm.edu/Dept/CBU/abstracts/1995-02.html>. Ultima visita Abril de 2002.



---

<http://www.wsdot.wa.gov/ppsc/research/onepages/wa-rd4451.htm>. Ultima visita Febrero de 2002.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 38 p. (NTC 1486).

\_\_\_\_\_ Documentación. Numeración de divisiones y subdivisiones en documentos escritos. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 4 p. (NTC 1075).

\_\_\_\_\_ Documentación. Citas y notas de pie de página. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 7 p. (NTC 1487).

\_\_\_\_\_ Documentación. Referencias bibliográficas para libros, folletos e informes. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 15 p. (NTC 1160).

\_\_\_\_\_ Documentación. Referencias bibliográficas para publicaciones seriadas. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 20 p. (NTC 1308).

\_\_\_\_\_ Documentación. Referencias bibliográficas para normas. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 6 p. (NTC 1307).

INSTITUTO PANAMERICANO DE CARRETERAS. Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE. Lexington : IPC, 1994. 89 p

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 2 ed. Santa Fe de Bogotá: Brandar, 1993. 349 p.



## ANEXO A. DEFINICIONES

**Agregado:** Es cualquier material duro, material mineral como la grava, roca triturada, arena, escoria, etc.

**Ahuellamiento:** El ahuellamiento es una falla muy común en climas cálidos, y resulta de la deformación permanente por flujo lateral de tipo plástico de la mezcla asfáltica bajo las huellas de las llantas de los vehículos. El diseño de la mezcla y la consistencia del cemento asfáltico que se utiliza son factores determinantes en la prevención de este fenómeno que puede atentar contra la seguridad del usuario y acelerar el deterioro estructural.

**Asfalto modificado:** El asfalto modificado es el cemento asfáltico al cual se altera su composición química mediante la utilización racional y técnica de modificadores. Los modificadores son frecuentemente sustancias macromoleculares que tienen un efecto directo sobre el cemento asfáltico. Las sustancias que se utilizan con mayor frecuencia son elastómeros SBS, los plastómeros EVA y el caucho molido. Estas modificaciones tienen por objeto reducir la susceptibilidad térmica del asfalto y mejorar sus características de resistencia a la fatiga.

**Caucho modificante:** Conocido como GCR, Grano de Caucho Reciclado, es el caucho molido proveniente de llantas desechadas usado en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y en otras aplicaciones de pavimentación.



**Cemento asfáltico:** Conocido también como asfalto ó ligante, es un material cementante refinado de color café a negro que es ampliamente usado en la industria de la pavimentación. Es un material semisólido a temperatura ambiente y líquido a altas temperaturas.

**Cemento asfáltico modificado con caucho:** Denominado como asfalto-caucho, se elabora mediante el proceso húmedo, y es definido por la American Society for Testing Materials, ASTM D8-88, como: “una mezcla de cemento asfáltico, caucho reciclado de llantas, y ciertos aditivos en la cual los componentes de caucho son por lo menos el 15% del peso total de la mezcla y han reaccionado en el cemento asfáltico caliente lo suficiente para causar el hinchazón de las partículas de caucho”.

**Desprendimiento superficial de partículas:** El desprendimiento superficial de partículas de agregado en una mezcla asfáltica en algunos casos puede estar ligado a la composición química del cemento asfáltico utilizado. Los ligantes pueden sufrir alteraciones durante el proceso de mezclado en planta, aunque se haya realizado un excelente control de calidad. Lo anterior, unido a un alto contenido inicial de vacíos hace que el asfalto se envejezca prematuramente, perdiendo parte de su poder cohesivo y tenacidad para evitar que las partículas se separen de la superficie.

**Fisuramiento:** El fisuramiento puede o no estar relacionado a las cargas del tránsito. El fisuramiento asociado a las cargas se denomina fisuramiento por fatiga o piel de cocodrilo, y está relacionado con el grado de rigidez del asfalto a temperaturas medias y bajas de servicio, y son ocasionadas por la repetición de cargas que inducen esfuerzos a tracción mayores a la capacidad del material. El fisuramiento no asociado a las cargas del tránsito se manifiesta por una fisura transversal en la capa de rodadura que se inicia en la superficie, y con el tiempo se propaga hacia abajo. Se generan por altos gradientes de temperaturas entre la parte superior e inferior de la capa a temperaturas bajas de servicio, lo que hace que se desarrollen grandes



esfuerzos de tensión al contraerse. Si la magnitud de esos esfuerzos excede la capacidad de la mezcla, se generan las fisuras transversales para disiparlos. En nuestro país son muy comunes los casos de fisuramiento en capas de rodadura que no han sido sometidas a la acción vehicular relacionadas con este fenómeno.

Por lo general, las fallas a bajas temperaturas son debidas a una combinación de estos dos tipos de fisuramiento, que dependerán de las características reológicas del cemento asfáltico y de su composición química, sin dejar a un lado el manejo que se le ha dado durante el proceso de mezclado en planta.

**Mezcla asfáltica:** Es la combinación de agregados y cemento asfáltico, la cual es usada como un material de pavimentación.

**Mezcla asfáltica mejorada con caucho:** Es la combinación de agregados, cemento asfáltico y grano de caucho reciclado, la cual es usada como un material de pavimentación.

**Polímero:** un polímero es un compuesto formado por adición sucesiva de unidades químicas, moléculas, denominados monómeros. Los materiales plásticos y las gomas son ejemplos de polímeros.

**Proceso húmedo:** El proceso húmedo es cualquier método en el cual se mezclan las partículas de caucho con el cemento asfáltico antes de adicionar la mezcla resultante a los agregados.



**Proceso seco:** En el proceso seco se mezcla el caucho con los agregado pétreos antes de adicionar el cemento asfáltico.

BIBLIOGRAFÍA