



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN

“PROPUESTA DE REHABILITACIÓN DE  
CARRETERAS CON PAVIMENTOS BASADOS EN  
EL RECICLAMIENTO DE LLANTAS (CAUCHO)”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A :

**GRACIELA ALBA ROMÁN**

A S E S O R :

ING. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GONZÁLEZ



MÉXICO

2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN  
DIRECCIÓN

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Graciela Alba Román

FECHA: 11-Feb-04

FIRMA: [Handwritten Signature]

GRACIELA ALBA ROMÁN  
PRESENTE.

En contestación a la solicitud de fecha 6 de septiembre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GONZÁLEZ pueda dirigirle el trabajo de tesis denominado "PROPUESTA DE REHABILITACIÓN DE CARRETERAS CON PAVIMENTOS BASADOS EN EL RECICLAMIENTO DE LLANTAS (CAUCHO)", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México, 11 de octubre de 2004  
LA DIRECTORA

[Handwritten Signature]  
ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ



- C p Secretaría Académica.
- C p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Civil.
- C p Asesor de Tesis.

LTG/AIR/la.

[Handwritten Initials]

[Handwritten Initials]

A ti mamá:

Gracias por todo lo que me has dado, por estar siempre conmigo y por ser mi ejemplo a seguir para luchar por lo que uno quiere. Te dedicó este trabajo por que sin ti no lo hubiera logrado.

A ti hermana:

Gracias por ser la alegría y luz de mi vida, por ser mi hermanita y estar conmigo.

A mi asesor:

Gracias por compartir sus conocimientos conmigo, por todo su apoyo y paciencia.

A Dios:

Gracias por darme la fuerza necesaria para seguir el camino correcto y por todas las bendiciones que me has dado.

A ti papá:

Tú anhelo se realizó en mí, donde quiera que estés has de estar orgulloso y feliz por realizar tú sueño de querer ser ingeniero civil.

A mis amigos:

Gracias por estar junto a mí tanto en las buenas como en las malas. Gracias por su apoyo, alegría, consejos cuando los he necesitado y por todos los buenos momentos que hemos pasado juntos.

A la universidad y maestros:

Gracias por darme la formación académica y ética para enfrentarme a la vida profesional. Gracias por ser mi segundo hogar en el que pase grandes momentos.

	<i>Página</i>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II. ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO ASFÁLTICO CON AGREGADOS DE HULE</b>	<b>3</b>
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	3
2.2 ANTECEDENTES	6
2.3 TERMINOLOGÍA	8
2.4 DESPERDICIO DE CAUCHO MODIFICADO	9
2.5 PROPIEDADES MODIFICADA	11
2.5.1 CEMENTANTE MODIFICADO	12
2.5.2 AGREGADO DE CAUCHO	14
2.6 PROCESOS Y TECNOLOGÍAS PARA LAS APLICACIONES DEL ASFALTO AHULADO	15
2.6.1 PROCESO HÚMEDO	15
2.6.1.1 TECNOLOGÍA DE McDONALD	16
2.6.2 PROCESO SECO	18
2.6.2.1 DOSIFICACIONES RUMAC	19
2.6.2.2 PROCESO SECO GENÉRICO	19
2.6.2.3 TECNOLOGÍA PLUSRIDE	20
2.6.3 SELLADORES DE GRIETAS Y JUNTAS	21
2.6.4 MEMBRANA ABSORBENTE DE TENSIÓN	22
2.6.5 MEMBRANA ABSORBENTE DE TENSIÓN DE INTERCAPA	23
2.7 NORMAS Y ESPECIFICACIONES	25
<b>III. EVALUACIÓN DEL DESPERDICIO DE CAUCHO EN PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFÁLTICO</b>	<b>28</b>
3.1 MÉTODO DE PROCESAMIENTO DEL CAUCHO	28
3.2 TAMAÑO DE LA PARTÍCULA DE CAUCHO	29

	<i>Página</i>	
3.3	EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE MASA DE CAUCHO QUE PODRÍA INCORPORARSE EN EL ASFALTO	31
3.4	CEMENTO ASFÁLTICO	33
3.5	ACEITE EXTENDEDOR	34
3.6	CATALIZADOR	35
3.7	AGENTE ADHESIVO	35
3.8	EQUIPO DE MEZCLADO	36
3.8.1	MÓDULO MEZCLADOR DE ASFALTO AHULADO (HTM-14T/ME-1)	36
3.8.2	MÓDULO PARA MEZCLAR ASFALTO AHULADO (HA-3001)	37
3.9	VISCOSIDAD	39
3.10	PROPIEDADES REOLÓGICAS EN TEMPERATURAS ALTAS, INTERMEDIAS Y BAJAS DE PAVIMENTOS	41
3.10.1	RESISTENCIA CONTRA LA DEFORMACIÓN PERMANENTE A TEMPERATURAS ALTAS (ZURCAMIENTO)	42
3.10.2	RESISTENCIA CONTRA LA ROTURA A LA FATIGA A TEMPERATURAS INTERMEDIAS	42
3.10.3	RESISTENCIA CONTRA LA ROTURA DE TEMPERATURA BAJA	43
3.11	PRUEBA DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO MODIFICADO	44
3.12	PRUEBA DE FUERZA DE DUCTILIDAD	45
3.13	PRUEBA DE DUREZA/TENACIDA	47
3.14	PRUEBA DE LA PELOTA CAYENDO	49
3.15	RECUPERACIÓN DE DESLIZAMIENTO DE RESPUESTA-ELÁSTICA	49
3.15.1	RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR DUCTILÍMETRO	50
3.15.2	PRUEBA DE RECUPERACIÓN TORSIONAL	51
3.15.3	RECUPERACIÓN ELÁSTICA CON EL REOMETRO ARRB	52
3.15.4	DISPOSITIVO DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA DEKKER	52

	<i>Página</i>	
3.16	PROBLEMAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PAVIMENTO	53
3.16.1	FUNCIONAMIENTO DEL PAVIMENTO	54
3.16.2	RESISTENCIA A LA FATIGA	54
3.16.3	MÓDULO ELÁSTICO	57
3.16.4	DEFORMACIÓN PERMANENTE	59
3.16.5	DISEÑO DE PROPIEDADES DE LA DOSIFICACIÓN MARSHALL	60
3.16.5.1	HMA DE CAUCHO MODIFICADO	61
3.16.5.2	HMA DE ASFALTO AHULADO	62
3.17	PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN PAVIMENTO QUE CONTIENE ASFALTO AHULADO	63
3.17.1	MANEJO DEL CEMENTANTE	63
3.17.2	MEZCLADO DEL ASFALTO CON EL AGREGADO	64
3.17.3	ALMACENAMIENTO DEL CEMENTANTE DEL ASFALTO AHULADO	65
3.17.3.1	EFFECTO DEL DESPERDICIO DE CAUCHO	66
3.17.3.2	EFFECTO DEL ACEITE EXTENDEDOR	66
3.17.3.3	EFFECTO DEL CATALIZADOR	67
3.17.3.4	LAS VENTAJAS DEL ALMACENAMIENTO DEL CEMENTANTE DEL ASFALTO AHULADO	71
3.17.4	TRANSPORTE DE LA MEZCLA CALIENTE DE ASFALTO AHULADO	72
3.17.5	COLOCACIÓN DE LA MEZCLA CALIENTE DE ASFALTO AHULADO	73
3.17.6	CONSOLIDACIÓN	73
3.18	EXPERIENCIAS RECIENTES EN NUESTRO PAÍS	74
3.18.1	CARRETERA MÉXICO-TOLUCA, TRAMO CUAJIMALPA-SAN MATEO	74
3.18.2	CARRETERA SAN SALVADOR EL SECO-AZUMBILLA, TRAMO SAN SALVADOR EL SECO-LA ESPERANZA	76
3.18.3	CARRETERA STA. BÁRBARA-IZÚCAR DE MATAMOROS, TRAMO LIBRAMIENTO CUAUTLA	77
<b>IV.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE SOBRE LAS TECNOLOGÍAS DEL CONCRETO ASFÁLTICO CON AGREGADOS DE HULE</b>	<b>79</b>
4.1	ANTECEDENTES	79
4.2	LEY DE TRANSPORTE SUPERFICIAL INTERMODAL (ISTEA). UN PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN NACIONAL	81

	<i>Página</i>
4.3 CALTRANS – REHABILITACIÓN DE PAVIMENTO USANDO CONCRETO ASFÁLTICO AHULADO	83
4.4 FLORIDA – USANDO MASA DE CAUCHO DE NEUMÁTICO EN DOSIFICACIONES DE CONCRETO ASFÁLTICO	85
4.5 CAROLINA DEL SUR – UTILIZACIÓN DE DESPERDICIO DE CAUCHO EN DOSIFICACIONES DE CONCRETO ASFÁLTICO	86
4.6 BARRERAS MAYORES PARA EL USO DEL ASFALTO AHULADO	87
4.7 ADELANTOS EN LA TECNOLOGÍA DEL CEMENTANTE DEL ASFALTO AHULADO (PROCESO HÚMEDO)	88
4.7.1 MÉTODO DE INCORPORACIÓN DE LA MASA DE CAUCHO EN EL CEMENTO ASFÁLTICO (PROCESO HÚMEDO)	89
4.7.2 BARRERAS DE PRODUCCIÓN	91
4.7.3 BARRERAS TÉCNICAS	92
4.8 ADELANTOS EN LA TECNOLOGÍA DE CONCRETO ASFÁLTICO DE CAUCHO MODIFICADO (SISTEMA SECO)	93
4.8.1 BARRERAS DE LA PRODUCCIÓN DEL PLUSRIDE	93
4.8.2 BARRERAS TÉCNICAS DEL PLUSRIDE	94
4.8.3 SISTEMA TAK DEL CONCRETO ASFÁLTICO DE CAUCHO MODIFICADO	94
4.9 EL EFECTO DE LA MASA DE CAUCHO DE NEUMÁTICO EN LA PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO (PARA CONTROL DE CALIDAD)	97
<b>V. CONCLUSIONES</b>	<b>100</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>103</b>
<b>GRÁFICAS E IMAGENES</b>	<b>I</b>

## I. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es presentar la información necesaria para la rehabilitación de carreteras con pavimentos construidos con concreto asfáltico ahulado, técnica que se basa en la evaluación del uso de la masa de caucho en el cemento asfáltico, así como los criterios de funcionamiento de dicha mezcla, identificándose los aspectos positivos y negativos.

Una de las finalidades de aplicar esta propuesta, es el reciclamiento de los neumáticos para disminuir los problemas ambientales que estos pueden ocasionar a la hora de su manejo y disposición, debido a sus características físicas y químicas (contaminación del aire por la quema de llantas, contaminación del suelo por el apilamiento de ellas en lugares no adecuados); pero no sólo esto es importante porque se ha demostrado que el uso de la masa de caucho del neumático en el cemento asfáltico ha aumentado sus características ingenieriles y mejorado en calidad para pavimentos asfálticos.

Se presentan también las generalidades y características técnicas del empleo de los Asfaltos Modificados con Caucho.

Posteriormente, se presenta una evaluación general de las características del Asfalto Ahulado contrastándose los resultados obtenidos.

Adicionalmente, se aporta la descripción de algunas experiencias de instituciones y empresas, que han utilizado el asfalto ahulado y barreras en el adelanto de la tecnología del asfalto.

Al finalizar se puede sugerir que el concreto asfáltico con agregado ahulado es una buena propuesta para la rehabilitación de carreteras; debido a las ventajas a largo plazo que de su aplicación resultan. El caucho es un aditivo para el asfalto de mezcla caliente derivado de un material de desperdicio que tiene un impacto favorable, el cual se demuestra al obtener un funcionamiento mejorado, disminución de costos de mantenimiento y un prometedor crecimiento en el mercado.

## II. ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO ASFÁLTICO CON AGREGADOS DE HULE

### 2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La producción de asfalto del petróleo se desarrolló lentamente en el siglo XX. Al principio, los residuos espesos de la destilación de casi cualquier aceite se usaban para ablandar los asfaltos duros. Pronto se comprobó que los residuos de los aceites de parafina no eran adecuados. Por lo tanto, sólo se usaron los residuos viscosos de la destilación de aceites asfálticos.

Al empezar la Segunda Guerra Mundial muchas refinerías estaban haciendo asfaltos buenos, no sólo para la construcción de caminos y de campos de aterrizaje, sino para la fabricación de techos y cubiertas.

Los asfaltos calentados, conocidos como cementos asfálticos se emplearon especialmente en caminos de alta calidad para soportar tráfico pesado. Se inventaron las soluciones de asfaltos en naftas y aceites para aplicarlos en frío. Los aceites para caminos o "rebajados" se clasificaron en fraguado rápido, medio y lento. La rapidez del fraguado dependía principalmente de la volatilidad del disolvente usado. Finalmente se inventaron emulsiones de asfalto bastante blando en dispersión acuosa o disolución.

Posteriormente se aconsejó el uso de pequeñas cantidades de compuestos extraños al petróleo (se les llama aditivos) para mejorar las propiedades del asfalto. Han recibido la mayor atención los materiales que sirven para aumentar la adherencia del asfalto a las superficies sólidas. En segundo lugar, los aditivos para mejorar las propiedades reológicas y, especialmente, las características a las bajas temperaturas.

Se han efectuado extensas investigaciones en los materiales que puedan mejorar las propiedades de flujo a bajas temperaturas, los resultados más prometedores se han obtenido con el uso del hule natural y sintético.

Los productores de hule natural empezaron por mezclar pequeñas cantidades de hule con el asfalto, esto comenzó en Europa y después por el Departamento de Hule Natural en Washington, D. C.<sup>1</sup>, que estimuló a los fabricantes de polímeros sintéticos (hules) a hacer estudios.

La estabilidad al calor de las mezclas de hule y asfalto la estudió van Rooijen<sup>2</sup>. Encontró que las mezclas que contenían 10% de hule natural se hacían blandas al calentarse. Al empezar el calentamiento, las partículas de hule hinchadas estaban en suspensión en la mezcla, pero al proseguir el calentamiento, el hule se convirtió a la fase continua. También encontró, que las mezclas de asfaltos oxidados, con 7.5% de hule, no eran estables con un calentamiento prolongado a temperaturas elevadas.

Lewis y Welborn<sup>3</sup> investigaron diferentes clases de hule pulverizado (natural y sintético) mezclándolo con diferentes clases de betún. Sus conclusiones fueron

---

<sup>1</sup> Welborn, J. Y., and Babashak, J. F., Jr., Proc. Am. Soc. Civil Engineers, (1958).

<sup>2</sup> Van Rooijen, J. M., Rev. General Caoutchouc, (1945).

<sup>3</sup> Lewis, R. H., and Welborn, J. Y., Public Roads, (1954).

que las propiedades de la mezcla dependen de la clase y cantidad de hule usado, la naturaleza del betún y de la manera en que se trata la mezcla. La adición de hule aumenta la viscosidad, y disminuye la susceptibilidad a los cambios de temperatura. También hicieron investigaciones sobre la elasticidad, ductilidad a diferentes temperaturas, y sobre el endurecimiento.

Naugatuck Chemical, una división de la United States Rubber Company<sup>4</sup> puso en el mercado una mezcla de hule y asfalto, le hicieron extensas investigaciones de las propiedades reológicas de estas mezclas. Dedujeron de sus observaciones en el campo que las mezclas evitan que se formen zurcamiento y deformaciones, y que se desprenda el asfalto de los agregados con el agua y al mismo tiempo aumenta la resistencia al patinaje en los pavimentos.

A mediados de los 60's, la ciudad de Phoenix fue pionera en el uso de estos asfaltos, conocidos como "asfaltos ahulados", gracias a los esfuerzos de Charles McDonald, ingeniero de materiales. La primera aplicación de asfalto ahulado fue en 1964, en una calle de media milla que estaba sujeta a un tránsito intenso y requería de mucho mantenimiento. La superficie fue tratada con un riego de sello con asfalto ahulado.

En 1968 la experiencia del ensayo y error, lograron llevar a un grado satisfactorio el uso del asfalto ahulado, de 1968 a 1972 el Departamento de Transporte de Arizona realizó seis proyectos con el uso de esta tecnología; en estas primeras aplicaciones, el proceso de adición y mezclado del hule se realizó en el propio camión pipa. Con esta primitiva tecnología fue posible

---

<sup>4</sup> Nijveld, H. A. W., de Decker, H. C. J., and Geesink, H. A. O. W., Proc. Fourth World Petroleum Congress IV, (1955).

construir el primer campo experimental usando el asfalto como una membrana absorbente de tensión (SAM), así como la colocación de una membrana absorbente de tensión de intercapa (SAMI). Ambos procedimientos mostraron una reducción en la reflexión de grietas.

En México esta tecnología se inició con estudios en 1965, en las Plantas de Asfalto del D.D.F., por los ingenieros Carlos Bello Hernández y Miguel Chávez Orozco. En 1970 se reconstruyó la calzada de Tlalpan en los dos sentidos utilizando el sistema húmedo. En 1981 se fabricó asfalto ahulado seco para que la construcción de pistas de atletismo fuera más económica.

Actualmente el uso de estos asfaltos ha tenido gran respaldo por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte; por ello, se están construyendo carreteras de altas especificaciones.

## 2.2 ANTECEDENTES

Dentro de los procesos que se utilizan para asfaltos modificados, existe el "asfalto ahulado". La norma ASTM-D-8-99 define el asfalto ahulado como: "una mezcla de cemento asfáltico, hule reciclado y ciertos aditivos en los que el hule representa por lo menos el 15% del peso total de la mezcla, el cual reaccionando con el cemento asfáltico lo suficiente para provocar la fusión e integración de las partículas de los componentes".

En nuestro país, sólo se utiliza en capas superficiales. Consideramos que esto es debido a que no existían recicladores en México de este producto con la capacidad suficiente. Sin embargo, se espera que con los principales productores de hule molido ya en operación, se pueda ampliar este campo y usar el asfalto ahulado en la fabricación de carpetas, donde es posible tener ahorros hasta del 50% en su fabricación al reducir el espesor de dichas carpetas.

Las llantas para vehículos al término de su vida útil, se convierten en desecho no biodegradable. Actualmente la mayoría de las llantas de desecho son apiladas o usadas como relleno y otras son quemadas sin ningún control. Los tiraderos de llantas han sido desde tiempo atrás, sujetos de grandes discusiones. Al principio, estos tiraderos estaban permitidos por las autoridades en todo el mundo, ahora se sabe de los grandes desastres provocados por enormes incendios, así como que son un foco de infección y un factor importante para la proliferación de roedores y numerosas plagas. Por otro lado, las llantas sueltan aceites y otros materiales tóxicos que se filtran en la tierra encontrando generalmente salida por los mantos acuíferos y por el drenaje contaminando corrientes de agua y pozos. Las llantas apiladas en grandes montañas, se convirtieron no sólo en un problema ambiental, sino también político.

Llantas enteras usadas o en pedazos pueden ser renovadas, recicladas o utilizadas como combustible por industrias con permisos especiales. Y en una industria naciente en nuestro país que es el reciclado de llantas de desecho, para la obtención de hule molido, acero y fibras sintéticas. El hule molido se emplea principalmente para asfaltos mejorados y una variedad de artículos de hule. El crecimiento de las empresas recicladoras ya instaladas en el país y

otras que se pudieran instalar dependerá del consumo que haya del hule molido para emplearse en asfaltos mejorados, que sería el principal consumidor del hule molido. Esta industria ayudaría enormemente a darle un destino final ecológico a las llantas de desecho.

### 2.3 TERMINOLOGÍA

CRM<sup>5</sup> tecnológicamente es un término general para identificar un grupo de conceptos que incorpora el caucho de la llanta dentro del material del asfalto para pavimentar. CRM es identificado como un modificado porque la introducción de la chatarra de llanta de caucho modificó los productos convencionales de asfalto para pavimentos.

En general, la tecnología del CRM puede ser dividida en dos categorías. Esas categorías definen el proceso básico usado para adherir el desperdicio de caucho a un material de asfalto para pavimentación. Son el proceso húmedo y el proceso seco. La expresión proceso húmedo define a un método que mezcla el desperdicio de caucho con el cemento asfáltico antes de incorporar el cementante en la obra. La expresión proceso seco define esos métodos que mezclan el desperdicio de caucho con el agregado antes de cargar la dosificación con el cementante asfáltico. El proceso seco es limitado a aplicaciones de mezcla caliente de asfalto, mientras que el proceso húmedo ha

---

<sup>5</sup> CRM - Crumb Rubber Modifier – Desperdicio de Caucho Modificado.

sido aplicado a selladores de grietas, tratamientos superficiales y dosificaciones de mezcla caliente de asfalto.

Es además importante la distinción entre los procesos, como definirlos, y los productos que pueden ser producidos. Cuando el CRM es incorporado en un material de asfalto para pavimentar, el CRM modificará las propiedades del cementante y actuará como un agregado de caucho. El cementante modificado es comúnmente llamado "asfalto ahulado". Cuando el CRM es usado como un agregado de caucho la HMA<sup>6</sup> se llama mezcla caliente de asfalto con caucho modificado.

#### 2.4 DESPERDICIO DE CAUCHO MODIFICADO

La llanta de caucho es el principal componente en el CRM. La llanta de caucho es principalmente una composición química de un número de mezclas naturales y hules sintéticos y carbón negro. Aunque existen variaciones en llantas de caucho, entre la llanta y el interior de la estructura de la llanta, la composición de caucho es razonablemente uniforme. Generalmente, los neumáticos enteros contienen 20 a 26% de caucho sintético, 21 a 23% de cementante natural, y aproximadamente 30% de acero y fibra. La composición química varía un poco entre los neumáticos de camión y automóvil pero puede ser drásticamente diferente para avión o el neumático del equipo de construcción pesada.

---

<sup>6</sup> HMA – Hot Mix Asphalt – Mezcla Caliente de Asfalto.

La composición química del CRM es importante desde que el caucho natural proporciona propiedades elásticas y el caucho sintético mejora la estabilidad térmica del compuesto. La interacción del CRM con cementantes asfálticos también es influenciada hasta un cierto punto por la composición del caucho.

La chatarra de la llanta de caucho puede ser distribuida a la planta de procesamiento como llantas enteras, llanta cortada, llanta triturada o residuo de raspadura recauchada. La llanta de caucho triturada es la preferida y lógica alternativa como una materia prima para producir CRM. El tipo de la materia prima de la chatarra de la llanta y la calidad del material es generalmente la responsabilidad de los procesadores del CRM.

Existen dos principales procesos para la obtención del CRM de la chatarra de la llanta. El Proceso Mecánico (ambiental) y el Sistema Criogénico. En ambos casos se obtiene el hule molido del cribado requerido actualmente por los consumidores de asfaltos ahulados.

El proceso mecánico consiste primero en eliminar los cinturones de acero de la chatarra de la llanta. Después la llanta es llevada a un equipo triturador donde se reduce la llanta a tamaños aproximados entre 25 y 40 cm<sup>2</sup>. Este producto es llevado a tolvas instaladas en la entrada de los dosificadores. El dosificador recibe el producto y lo lleva a una serie de moliendas por medio de cuchillas que pulverizan el hule. Dentro de estos procesos, existen sistemas magnéticos que separan el acero y metal expulsándolo mediante un tubo vibratorio a los depósitos principales de recolección de acero. El hule elimina la fibra sintética que tiene la llanta.

Después de este paso, se transporta el CRM a unas cribas que permiten seleccionar las medidas deseadas de acuerdo a las necesidades de granulometría del mercado, para posteriormente depositar el hule molido en silos que permitirán el pesado y empaçado.

El sistema criogénico consiste en llevar las llantas enteras a un depósito donde se hace pasar nitrógeno líquido para congelar el producto. Algunos productores las trituran, para aumentar el volumen del producto a congelar.

Talco u otro poderoso mineral inerte, es adherido al CRM para reducir partículas de caucho que tienden a pegarse a la vez. La cantidad de talco requerida no excederá el 4% del peso del caucho. En su mayoría el CRM es enviado en bolsas de 22.7 o 27.2 kg que son de papel o plástico.

## 2.5 PROPIEDADES MODIFICADAS

Hay dos productos básicos que pueden ser realizados por adición del CRM al asfalto para las aplicaciones de pavimentación. Ellos son el cementante modificado y el agregado de caucho.

### 2.5.1 CEMENTANTE MODIFICADO

Cuando el cemento asfáltico y el CRM son mezclados a la vez, hay una interacción entre los materiales. Esta interacción, definida como reacción del asfalto ahulado, es afectada por un número de variables. Específicamente, la reacción es influenciada por la temperatura a la cual ocurre la reacción de mezclado, el período de tiempo en el que la temperatura permanece elevada, el tipo y la cantidad de energía mecánica que requiere la mezcla, el tamaño y textura del CRM y el componente aromático del cementante asfáltico. La reacción del mismo es la absorción de los aceites aromáticos del cemento asfáltico en las cadenas de polímeros que son la clave del componente natural y sintético del caucho en el CRM. Como el CRM reacciona con el cemento asfáltico, también se dilata y se ablanda. La viscosidad de la mezcla asfalto-CRM es usada para controlar la reacción. Un cemento asfáltico modificado con 15% de CRM puede incrementar la temperatura alta de la viscosidad del cementante a 10 veces o más. La razón de la reacción entre el CRM y el cemento asfáltico puede ser incrementada por ampliación del área superficial del CRM.

La superficie de área puede ser incrementada por reducción de tamaño y especificando un proceso de molido de agrietamiento. La razón de la reacción es también influenciada por la temperatura en la cual la mezcla reacciona. El tiempo específico de la reacción sería el tiempo mínimo requerido para estabilizar la viscosidad del cementante.

Este cementante modificado, asfalto ahulado, tiene un aumento en las propiedades del cementante cuando se compara con el cemento asfáltico convencional en pruebas del laboratorio. Los cambios en la viscosidad del cementante encima del rango normal de operación y mezclado en altas temperaturas indican que la adición de CRM reduce la sensibilidad de la temperatura del cementante.

La mayoría de las pruebas normales aplicadas al cementante y que son usadas para medir las propiedades del cemento asfáltico; pueden ser aplicadas para el cementante del asfalto ahulado. Sólo las pruebas convencionales del viscosímetro de tipo-capilar son para saber si son ineficaces los cementantes. El método usado para medir la viscosidad de estos cementantes modificados es la resistencia al esfuerzo cortante rotacional usando el Viscosímetro Brookfield. Las versiones portátiles de este viscosímetro son comúnmente usadas para supervisar al cementante durante la fase de reacción y como un control de producción. Varias pruebas del cementante pueden mostrar un aumento en la desviación estándar causada por una no uniformidad del cementante modificado. Debido a que el desperdicio de caucho no disuelto en el cemento asfáltico, las partículas de caucho dilatadas en el cementante pueden afectar la consistencia del cementante durante una prueba particular.

Para lograr el perfeccionamiento de las propiedades del cementante medidas en el laboratorio, se puede sugerir una indicación de mejorar el funcionamiento del material de pavimentación en el campo. Sin embargo, hay numerosas variables, más allá de las propiedades del cementante, que también afectan el funcionamiento integral del pavimento. Poniendo estas otras variables a un lado, las propiedades del cementante modificadas pueden influir en el funcionamiento del pavimento relacionadas al agrietamiento térmico,

rodamiento, agrietamiento reflexivo, envejecimiento y retención de desechos o basura.

#### 2.5.2 AGREGADO DE CAUCHO

El otro producto logrado agregando CRM es el agregado de caucho. Por limitaciones de tiempo el cemento asfáltico y el CRM son mantenidos en el mezclado (reacción) a altas temperaturas. Por especificación un granulado grueso del CRM, puede retener su forma física y rigidez. También dada la especificación un granulado del CRM, en corte de las superficies lisas de la partícula es menos reactiva (área de la superficie más baja que la masa del CRM) y su forma cúbica puede combinarse con el CRM y los agregados pétreos. Este producto de agregado de caucho es sólo aplicado a los proyectos de mezcla caliente de asfalto.

El agregado de caucho puede influir en el funcionamiento del pavimento relacionado al agrietamiento reflexivo y la des-adherencia del hielo.

## 2.6 PROCESOS Y TECNOLOGÍAS PARA LAS APLICACIONES DEL ASFALTO AHULADO

El CRM puede mezclarse con un cemento asfáltico (Proceso Húmedo) previo a mezclarse con agregados para producir una mezcla de asfalto ahulado AR<sup>7</sup> o puede agregarse directamente al mezclador de tambor (Proceso Seco) junto con la adición del agregado y el asfalto. Hay numerosas tecnologías, muchas de las cuales son procesos patentados, las que pueden ser usadas para producir una dosificación de pavimento de AR o cementante.

### 2.6.1 PROCESO HÚMEDO

El proceso húmedo define cualquier método que agrega el CRM al cemento asfáltico antes de incorporar el cementante en el asfalto de pavimentación del proyecto. Este proceso se usa para producir un cementante modificado. Hay tres elementos del equipo necesarios para lograr el proceso húmedo. Ellos se incluyen mezclando el CRM y el cemento asfáltico, reaccionando los dos materiales, y transfiriendo el producto del cementante modificado a la aplicación del proyecto deseado. Dos factores limitan el proceso que es tener suficiente área de almacenamiento para el cargamento del CRM y el esfuerzo manual o mecánico requerido para agregar el CRM al depósito de alimentación de la unidad mezcladora.

La unidad mezcladora debe ser capaz de procesar propiamente al CRM (una masa seca y material granulado, o ambos), al cemento asfáltico (un líquido viscoso caliente), en la proporción requerida establecida por el diseño de la mezcla. El tanque de la reacción debe ser capaz de mantener una mezcla uniforme y una temperatura constante uniforme. El bombeo especial y la calibración frecuente son esenciales para asegurar que se logre una correcta aplicación uniforme del cementante modificado.

#### 2.6.1.1 TECNOLOGÍA DE McDONALD

El proceso húmedo usa tecnologías: con una carga o revoltura (bacha), o el funcionamiento de mezclado continuo. Puede atribuirse el desarrollo temprano de las dosificaciones de pavimentos de AR a Charles McDonald<sup>8</sup> y su tecnología patentada.

Las características del cementante modificado alteran las propiedades medidas en el laboratorio de la mezcla y deben ser ponderadas cuando se diseñan estas mezclas densas.

El concepto del diseño a desarrollarse para las mezclas modificadas de granulometría semiabierta es aumentar al máximo el volumen de la mezcla del asfalto ahulado. Este diseño es determinado para combinar la estabilidad de contacto del agregado tosco con las propiedades elásticas del AR. Los

---

<sup>7</sup> AR – Asphalt Rubber – Asfalto Ahulado.

volúmenes típicos de cementante de asfalto ahulado para mezclas de granulometría semiabierta van desde 8 a 9%.

En los últimos años, la tecnología de mezclado continuo se ha desarrollado debido al mezclado mejorado logrado usando CRM más fino. Se ha usado equipo de mezclado continuo en las terminales y plantas de asfalto para producir un 12% de mezclas de asfalto de CRM para las dosificaciones de capa de fricción de granulometría abierta. Ésta ha sido principalmente exitosa debido al fino del CRM; que permite breves tiempos de mezclado (<15 min.) a temperaturas que van entre 150 °C y 177 °C, ocasionando tiempos de reacción más cortos, un potencial mayor para el uso del asfalto de CRM para una variedad de mezclas de agregado, capacidad mejorada para probar el cementante modificado, y menos dificultad en calibración y bombeo en la planta de HMA. El tiempo de almacenamiento puede aumentar en 4 días o más, aunque se necesita de agitación continua. El procedimiento para establecer la temperatura óptima de la mezcla requerirá un cambio en el objetivo de la viscosidad del cementante para reflejar mejor la viscosidad alta del AR. La cantidad de CRM en el cementante de asfalto ahulado para las aplicaciones de HMA generalmente va desde 15 a 25% por peso de cemento asfáltico.

La construcción de HMA con cementante de AR es similar para construir mezclas convencionales. El rango de las temperaturas para mezclar, instalar, y consolidar es típicamente más alto. En el equipo, particularmente los lechos, fondos del camión y la rueda de acero de los tambores del rodillo, no deben ser productos derivados del petróleo para evitar la contaminación.

---

<sup>8</sup> M. Stroup-Gardiner, N. Kruptz, and J. Epps. Comparison of Mix Design Methods for Rubberized Asphalt Concrete Mixtures (1989).

### 2.6.2 PROCESO SECO

El proceso seco define cualquier método de agregar CRM directamente en un proceso de mezcla a la HMA, es conocido típicamente el premezclado del CRM con el agregado caliente antes de alimentar la mezcla con asfalto. El proceso seco generará alguna reacción entre el CRM y el cemento asfáltico. Este proceso sólo se ha aplicado a los proyectos de pavimentación de mezclas calientes.

Un buen calibrado de proporcionamiento del sistema de alimentación es necesario cuando se usan plantas de tambor. La introducción del CRM en la unidad del revestidor al final de la descarga del tambor mezclador se elimina la pérdida de CRM fino que directamente se alimenta en el tambor produciéndose emisión de gases. La alimentación de veleta fuera del silo de almacenamiento del CRM con alimentación neumática al revestidor funciona satisfactoriamente. Otro mecanismo para eliminar la pérdida del CRM es usar un mezclador de doble tambor y un alimentador de caucho en el tambor exterior.

En el proceso seco la incorporación manual de la carga de mezcla es simple pero implica una labor intensa. Las bolsas de material se hacen a un punto de fusión con un material plástico; que le permite al operador cargar la cámara mezcladora con la bolsa entera de CRM. El tamaño de la carga normalmente corresponde a un número entero de bolsas de carga.

El proceso seco puede separarse en dos categorías. Las dosificaciones RUMAC<sup>9</sup> (Concreto de Asfalto Ahulado Modificado) y el proceso seco genérico.

#### 2.6.2.1 DOSIFICACIONES RUMAC

Las dosificaciones RUMAC contienen grandes partículas de CRM que reemplazan partículas de agregado donde una mezcla de granulometría semiabierta de agregado se formula para mantener espacio para el CRM.

#### 2.6.2.2 PROCESO SECO GENÉRICO

La otra categoría es llamada como el "genérico" del proceso seco. El concepto fue originado por Barry Takallou<sup>10</sup> como resultado de la investigación y experiencia práctica con el PlusRide, que es un sistema que utiliza la adición de caucho para reemplazar algún agregado mineral en las dosificaciones del concreto asfáltico, fue desarrollado en Suecia, patentado en Estados Unidos y comercializado bajo este nombre comercial. Esto podría considerarse como RUMAC. Sin embargo, por especificación se usa una partícula más pequeña, el tamaño de esta partícula del CRM normalmente es menor de 2mm, y requiere

---

<sup>9</sup> RUMAC – Rubber Modified Asphalt Concrete – Concreto de Asfalto Ahulado Modificado.

<sup>10</sup> H. B. Takallou. Evaluation of Mix Ingredients on the Performance of Rubber Modified Asphalt Mixtures (1988).

menos ajuste en la graduación del agregado. El proceso seco combinado con la secuencia de la producción de HMA puede ser suficiente para permitir al CRM y al cementante asfáltico lograr un grado sustancial de reacción antes de la colocación y consolidación de la mezcla.

El término "genérico" implica el uso de cualquier tamaño de malla de CRM que no reemplaza específicamente partículas de agregado. Obviamente, una dosificación genérica de AR usando un caucho más fino afectará menos que si se usan partículas grandes de CRM, incluso en mezclas de granulometría abierta de agregado.

### 2.6.2.3 TECNOLOGÍA PLUSRIDE

PlusRide es una mezcla de granulometría semiabierta modificada. La HMA de PlusRide se diseña para modificar la estabilidad de una matriz de granulometría semiabierta del agregado; con las propiedades elásticas del CRM y una cierta cantidad de modificación del cementante (reacción). Se prepara al equipo con muestras de espécimen convencional y mediante procedimientos convencionales con algunas modificaciones, pero los especímenes no se prueban para estabilidad. La única medida de la propiedad del espécimen usada para establecer el diseño de la mezcla del volumen del asfalto es el por ciento de vacíos de aire. El objetivo del volumen de vacíos de aire es de 2 a 4%. La graduación del agregado y el volumen y la graduación del CRM son relativamente fijadas por la descripción de la patente. El CRM es predominantemente un desperdicio granulado que pasa el tamiz No. 10 de 2mm

complementado con raspaduras o masa de CRM. Como se especificó en el diseño, el volumen del CRM es 3% por el peso de la mezcla total. El volumen del cementante del asfalto generalmente irá de 7.5 a 9%.

Las precauciones de consolidación son similares para el asfalto ahulado de HMA. El acabado del rodillo debe ser continuo para compactar el material del PlusRide hasta que se enfríe debajo de 60 °C. La pobre producción, colocación, o control de consolidación llevarán a la falla prematura del pavimento. Los inspectores deben ser conocedores acerca de los requisitos de las prácticas de construcción. Para prevenir la dilatación excesiva del agregado en la compactación de la dosificación se deben diseñar propiamente los agregados de granulometría semiabierta usados en esta tecnología. Esta dilatación excesiva de la mezcla reduce entrelazamiento del agregado que puede reducir la resistencia de la dosificación al zurcamiento.

### 2.6.3 SELLADORES DE GRIETAS Y JUNTAS

El uso de asfalto ahulado en selladores de grietas y juntas (C/J)<sup>11</sup> es usado rutinariamente por muchos equipos de especialistas en mantenimiento. La opción de un sellador para una situación dada debe tener en cuenta el tipo de pavimento, tipo de grieta y junta, forma y tamaño de la grieta y junta, tiempo antes del próximo inventario de la rehabilitación mayor, el volumen de tránsito,

---

<sup>11</sup> C/J – Crack and Joint – Grieta y Junta.

grado de esfuerzo del pavimento, máxima y mínima temperatura, equipo disponible y control de tránsito.

El asfalto ahulado en selladores de C/J es típicamente premezclado y empaquetado en bloques de 22.7 kg. Estos bloques deben fundirse y reaccionarse antes de que el sellador pueda aplicarse.

#### 2.6.4 MEMBRANA ABSORBENTE DE TENSIÓN

Un tratamiento superficial usado es la aplicación de rocío de asfalto ahulado, que es llamado Membrana Absorbente de Tensión (SAM)<sup>12</sup>. El diseño de la SAM debe examinar al cementante y la cubierta del agregado. El cementante es asfalto ahulado que puede adelgazarse con un diluyente para mejorar el flujo del rocío-distribuidor. La cantidad de CRM en el cementante es típicamente 20 a 30% por peso de cemento asfáltico. La cubierta del agregado generalmente es un tamaño uniforme de 9.5 a 6.3 mm del tamiz y preferentemente con preresivado caliente con 0.3 a 0.5% por peso de cemento asfáltico. La compatibilidad del cementante y el agregado es una parte del proceso del diseño.

Una vez que los materiales han sido seleccionados, el diseñador debe determinar la proporción apropiada de aplicación de rocío y la proporción de la cubierta del agregado para lograr un adecuado alcance y recubrimiento. Los valores típicos que se han usado con éxito son 2.7 L/m<sup>2</sup> de cementante de

asfalto ahulado diluido y 19 kg/m<sup>2</sup> de cubierta de agregado pr revesti do. La construcción de un SAM es similar a cualquier tratamiento superficial y puede usarse en carreteras con tráfico pesado y rápido.

El uso de un cementante de asfalto ahulado en un tratamiento superficial tiene beneficios particulares para el funcionamiento del pavimento, proporcionándole doble vida, reduciendo la oxidación de la superficie, y disminuyendo la cantidad de intrusión de agua a la superficie en la base. También proporciona, susceptibilidad de resistir la temperatura e influencia de elasticidad que son habilidades del cementante para soportar las tensiones inducidas por el clima y el tránsito, de ahí el nombre de Membrana Absorbente de Tensión.

Las propiedades ingenieriles de una SAM pueden resistir y retardar el desarrollo de grietas reflexivas cuando estas son generalmente inactivas, igual que la rotura de fatiga de rastra y espacio estrechamente al azar o rotura de bloque.

### 2.6.5 MEMBRANA ABSORBENTE DE TENSIÓN DE INTERCAPA

Una Membrana Absorbente de Tensión de Intercapa (SAMI)<sup>13</sup>, ocurre cuando una capa de asfalto de mezcla caliente (HMA) se pone encima de una SAM. El propósito de una SAMI es extender la vida servible de una cubierta. Esto es logrado retardando el índice de formación de la grieta reflexiva. El uso de un

---

<sup>12</sup> SAM – Stress Absorbing Membrane – Membrana Absorbente De Tensión

<sup>13</sup> SAMI – Stress Absorbing Membrane Interlayer – Membrana Absorbente De Tensión De Intercapa

SAMI también impermeabiliza y retarda la edad de endurecimiento del pavimento asfáltico subyacente.

Hay dos sistemas compuestos para los proyectos: una SAMI de dos-capas y una SAMI de tres-capas. Una SAMI de dos-capas pone la SAMI en el pavimento existente y cubiertas de la SAMI con 25 a 75 mm de HMA. Una SAMI de tres-capas empieza con la colocación de una capa de emparejamiento de HMA. Esta cubierta inicial proporciona una superficie uniforme aceptable para colocar la SAMI. La SAMI es seguida por una cubierta adicional de HMA de 25 a 75 mm. Este sistema se aplica cuando hay deterioro de las grietas y juntas del pavimento existente. Si una SAMI de dos-capas fuera usada, las grietas deterioradas crearían una discontinuidad en la membrana cerca del lugar donde la membrana se sujetará a los niveles más altos de tensión y el rendimiento de la SAMI se disminuiría.

La efectividad de una SAMI es mejorada cuando se aplica a pavimentos agrietados que mantuvieron suficiente capacidad de resistencia en la base y subrasante. Otros estudios verifican que la SAMI es eficaz reduciendo carga y esfuerzos térmicos en pavimentos agrietados. Sin embargo, el concepto de esfuerzos térmicos puede ser reducido por una SAMI, que es una forma de des-adherencia (reduciendo fricción intercapa), puede ser sólo válido si se desarrolla una grieta térmica.

La construcción e inspección de una SAMI es igual que en una SAM. El funcionamiento de pavimentos con SAMI puede afectarse adversamente si el cementante es excesivo, u ocurre penetración de desechos o basura en la subyacente a la capa del concreto asfáltico. Recíprocamente, una falta de cementante o bien basura que se incrusta en las capas de pavimento

superiores tenderá a reducir la efectividad de la SAMI; y, producir la rotura reflexiva mayor, particularmente en pavimentos con base inferior y apoyo en la terracería. Se debe asegurar que el diluyente agregado al cementante del asfalto ahulado previo a la aplicación de rocío se haya evaporado adecuadamente de la membrana antes de ser puesta la cubierta de HMA.

## 2.7 NORMAS Y ESPECIFICACIONES

Debido a que el uso del hule molido ha brindado buenos resultados en la modificación de los asfaltos, el uso del mismo se ha extendido, por lo cual la Secretaría de Comunicaciones y Transportes formuló la *Norma N-CTM-4-05-002/01, "Calidad de Materiales Asfálticos Modificados"*, en la que se destacan los requisitos de calidad para cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y granulometría del hule molido, los cuales se indican en las tablas siguientes:

CARACTERISTICAS	TIPO DE CEMENTO ASFALTICO (TIPO DE MODIFICADOR) AC- 20 (HULE MOLIDO)
<i>Del cemento asfáltico modificado original:</i>	
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, máx.	----
Viscosidad rotacional Brookfield a 135 °C; Pa.s(P), máx.	----
Viscosidad rotacional Brookfield (tipo Haake) a 177 °C; Pa.s (P), máx.	7
Penetración:	
* A 25 °C, 100 g, 5 s; 10 <sup>-1</sup> mm, mín.	30
* A 4 °C, 200 g, 60 s; 10 <sup>-1</sup> mm, mín.	15
Punto de inflamación Cleveland; °C, mín.	230
Punto de reblandecimiento; °C, mín.	57
Separación, diferencia anillo y esfera; °C, máx.	5
Recuperación elástica por torsión a 25 °C, %, mín.	40
Resiliencia a 25 °C; %, mín.	30
<i>Del residuo de la prueba de la película delgada, (32 mm, 50 g):</i>	
Pérdida por calentamiento a 163 °C; %, máx.	1
Ductilidad a 4 °C y 5 cm/mín; cm, mín.	5
Penetración a 4 °C, 200 g, 60 s; %, mín.	10
Penetración retenida a 4 °C, 200 g, 60 s; %, mín.	75
Recuperación elástica en ductilómetro a 25 °C; %, mín.	55
Incremento en temperatura anillo y esfera; °C, máx.	10
Módulo reológico de corte dinámico a 76 °C (G*/sen?); kPa, mín.	2.2
Módulo reológico de corte dinámico a 64 °C (G*/sen?); kPa, mín.	----
Angulo fase (?) [visco-elasticidad], a 76 °C, ° (grados), máx.	----
Angulo fase (?) [visco-elasticidad], a 64 °C, ° (grados), máx.	----

Tabla 1.- Requisitos de calidad para cemento asfáltico AC-20 modificado.

MALLA		TAMAÑO NOMINAL		
ABERTURA Mm	DESIGNACION	H 20 % QUE PASA	H 40 % QUE PASA	H 80 % QUE PASA
2	No. 10	100	----	----
1.18	No. 16	75 - 100	----	----
0.85	No. 20	59 - 90	100	----
0.6	No. 30	25 - 60	75 - 100	100
0.425	No. 40	10 - 40	55 - 90	80 - 100
0.3	No. 50	0 - 20	25 - 60	60 - 100
0.15	No. 100	0 - 10	0 - 30	4 - 70
0.075	No. 200	0 - 5	0 - 10	0 - 20
Contenido mínimo de hule en el asfalto en masa, %		17	15	12

Tabla 2.- Requisitos de granulometría para hule molido.

### III. EVALUACIÓN DEL DESPERDICIO DE CAUCHO EN PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFÁLTICO

#### 3.1 MÉTODO DE PROCESAMIENTO DEL CAUCHO

El método de procesamiento del trozo de caucho afecta la reacción con el asfalto y las propiedades resultantes del cementante del "asfalto ahulado". Se encontró que la morfología del caucho (estructura) puede ser el factor más importante que afecta las propiedades elásticas.

Se puede inferir que las partículas producidas con el Proceso Mecánico (Ambiental) son de superficie porosa, de densidad de masa baja, generando reacciones del asfalto ahulado con deseable recuperación elástica alta; mientras que las partículas producidas por el Proceso Criogénico son angulares de cara lisa. Sin embargo, esos resultados no son del todo satisfactorios en relación con el tamaño de la partícula, ya que a diferentes volúmenes de caucho natural cuando la masa es muy fina, el 25% pasa el tamiz No. 200, las partículas criogénicas propician reacciones poco satisfactorias.

Por consiguiente, no es recomendable el uso de productos criogénicamente obtenidos de la masa de caucho en cementantes de asfalto ahulado para el uso

en pavimentos de carreteras y se debe especificar el uso del método de molido ambiental.

### 3.2 TAMAÑO DE LA PARTÍCULA DE CAUCHO

Para las raspaduras del caucho del neumático, la recuperación elástica aumenta con una disminución en el tamaño de la partícula, con un cambio de tamaño de un tamiz No. 16 a un tamiz No. 50 produciendo más de 50% de aumento del tiempo de reacción (aproximadamente 0.5 horas). Se presume que la mejora en recuperación elástica es debida probablemente a la diferencia en morfología de las partículas, con las más pequeñas que son más porosas y las partículas más grandes que tienen superficies más chatas (llanas).

Shuler<sup>14</sup> investigó 3 porcentajes de cauchos. El Caucho B tenía la graduación más fina con 50% pasando el tamiz No. 50 y 8% pasando el tamiz No. 100 mientras que el Caucho A tenía sólo el 5% pasando el tamiz No. 30. Debe notarse que dentro de los 45 minutos después los dos cauchos A y B se agregaron al asfalto, pareciendo haber alcanzado una viscosidad estable. El Caucho A (18.39%) probablemente alcanzó un nivel constante tan temprano porque contuvo un porcentaje significativamente más alto de caucho natural que el Caucho B (11.20%). Observemos que el Caucho C que no contuvo ningún porcentaje de caucho natural tomó aproximadamente 90 minutos para alcanzar un nivel constante.

<sup>14</sup> Shuler, T.S., An Investigation of Asphalt Rubber Binders for Use in Pavement Construction, Texas A&M University, (1985).

Se debe concluir entonces que reduciendo el tamaño de las partículas de caucho incluidas en un cementante de asfalto ahulado debe disminuir el tiempo de reacción como se indicó con el tiempo requerido para alcanzar la viscosidad a un nivel constante.

Otro factor que debe ser considerado relativo al tamaño de la partícula y eso se relaciona a la incorporación de partículas de caucho sólidas en la graduación de las capas de fricción de granulometría cerrada. Estas mezclas tienen una distribución del tamaño de las partículas muy finas con una mayoría del material más pequeño que el tamiz No. 10. Generalmente son una mezcla de cribado triturado y arenas de concreto fino que tienen un porcentaje grande de materiales en el rango del tamiz No. 10 al No. 50. Por consiguiente, reaccionaría más rápidamente con el asfalto reduciendo el tiempo de estar en la unidad de mezclado y aumentando la producción de cada unidad. Sin embargo, reduciendo el tamaño de las partículas de caucho recicladas aumentará el costo de procesamiento del caucho.

Para las capas de fricción de granulometría abierta, el uso de partículas de caucho finas podría disminuir significativamente el desagüe abajo del asfalto fuera de las partículas del agregado antes de la colocación que permite aumentar el volumen del cementante. Un aumento en el volumen del cementante debe reducir el envejecimiento del asfalto y debe mejorar la durabilidad de esta mezcla. Una dificultad de la construcción puede ser mitigada mediante el uso de partículas de caucho pequeñas que se relacionan con las restricciones en la temperatura de la colocación. Si la temperatura ambiente está debajo de 15 °C, las especificaciones prohíben colocar las mezclas.

### 3. 3 EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE MASA DE CAUCHO QUE PODRÍA INCORPORARSE EN EL ASFALTO

Esta evaluación se dirige a la cantidad de masa de caucho de neumático que puede agregarse a las mezclas de las dosificaciones de granulometrías cerrada, semiabierta y abierta, sin afectar la calidad de la dosificación adversamente. Todas las mezclas reaccionan diferentemente a los aditivos y no es posible describir el efecto de agregar masa de caucho para todas las mezclas.

La mayoría de la investigación se ha realizado usando cantidades relativamente altas de caucho y por lo tanto la poca información está disponible en los volúmenes bajos de caucho.

La marca registrada para el proceso que se evaluó es PlusRide. En este proceso las partículas de caucho son grandes (1 / 16 – 1 / 4 in). El caucho es aproximadamente igual al 30% del cementante asfáltico por peso. El caucho es premezclado con el agregado antes de ser adicionado al asfalto. Después de evaluar el funcionamiento relativo de una banda de control y una sección de PlusRide se concluyó que no había ninguna diferencia significativa en el funcionamiento entre el PlusRide y la mezcla de asfalto convencional.

Lalwani<sup>15</sup> investigó el efecto de la cantidad de caucho regenerado en las propiedades combinadas del asfalto ahulado. Su estudio incluyó la adición de 0,

---

<sup>15</sup> Lalwani, S., A. Abushihada, and A. Halasa, Reclaimed Rubber Asphalt Blends Measurements of Theological Properties to Assess Toughness, Resiliency, Consistency, and Temperature Sensitivity, Proceedings, AAPT Vol. 46, (1977).

7.5, 15 y 30 por ciento de caucho a un asfalto de penetración de 60 / 70. Para cambiar significativamente las propiedades del cementante por lo menos 20% de caucho tuvo que ser agregado al asfalto. El caucho y asfalto estaban mezclados a una temperatura de 200 °C. El tamaño ideal de la partícula de caucho era del tamiz No. 50 al No. 30.

Piggott<sup>16</sup> mostró que la adición de 5% de caucho por peso del cementante total aumentaría esa viscosidad del asfalto a 95 °C por 10 – 50%. También mostró que 20% de caucho disminuiría la estabilidad de Marshall por aproximadamente 50%.

En la actualidad no se usa material RAP<sup>17</sup> (Pavimento Asfáltico Regenerado) en mezclas de capa de fricción de granulometría cerrada, semiabierta y abierta. Estas mezclas se evaluaron por el potencial de usar caucho regenerado. Aunque el VMA<sup>18</sup> (vacíos en el agregado mineral) mínimo para mezclar en la dosificación de granulometría cerrada y semiabierta es de 15%, es improbable que el VMA real para la mezcla de dosificación cerrada estará debajo del 20% y también es improbable que el VMA para la mezcla de granulometría semiabierta estará menos de 22%. Pero es probable que el VMA de granulometría abierta sea mayor que el 30%. Estos valores altos de VMA deben minimizar el efecto de agregar caucho a la dosificación del asfalto.

Hay varias preocupaciones que tienen que ser consideradas al usar caucho regenerado: contaminación aérea, trabajabilidad, consolidación, textura de la superficie, largo plazo de funcionamiento, etc. Debido a estas preocupaciones,

<sup>16</sup> Piggot, M. R., Improved Hot Mix Asphalts Containing Reclaimed Rubber, Proceedings, AAPT Vol. 46 (1977).

<sup>17</sup> RAP – Reclaimed Asphalt Pavement – Pavimento Asfáltico Regenerado.

<sup>18</sup> VMA – Voids in the mineral/aggregate – Vacíos en el agregado mineral.

los requisitos iniciales para la cantidad de caucho para ser usado en la dosificación deben estar en el lado conservador.

Se recomienda así que el caucho máximo inicial del agregado para mezclas de dosificación de granulometría cerrada y semiabierta sea 5% por peso de cementante total. Los volúmenes de caucho más altos pueden resultar funcionar muy bien, pero se necesita experiencia adicional antes de usarlos. Puesto que el VMA de la mezcla de granulometría abierta es más grande que el de las otras mezclas, debe poder usar más caucho sin efectos perjudiciales a la mezcla. Se recomienda que el caucho en la mezcla de granulometría abierta aumentará a un 12% por peso de cementante total.

### 3.4 CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento asfáltico usado reunirá los requisitos para las mezclas convencionales. Las calidades aceptables para el cemento asfáltico serán como se especifiquen en el contrato, y este será totalmente compatible con la masa de caucho de neumático.

### 3.5 ACEITE EXTENDEDOR

El aceite extendedor (si se usó) será resinoso, alto punto de inflamación de hidrocarburo aromático que se encuentra en los siguientes requisitos físicos y químicos:

Viscosidad (mín.)	2500
Punto de Inflamación (máx.)	390
Análisis Molecular	
- Asfalteno (Wt. % máx.)	0.1
- Aromáticos (Wt. % mín.)	55.0

### 3.6 CATALIZADOR

El catalizador puede seleccionarse de polímeros no saturados etilénicamente o copolímeros que históricamente se han recomendado para la incorporación en mezclas bituminosas adicionadas de azufre proyectadas para nivelaciones de caminos.

### 3.7 AGENTE ADHESIVO

A menos que se demuestre que la dosificación de asfalto ahulado es resistente al desmolde sin un agente adhesivo, se especificará. Si se requirió, será de color estable y aprobado el uso por el ingeniero. Se incorporará en el material del asfalto ahulado al porcentaje requerido por la fórmula de trabajo-mezcla. Se agregarán agentes adhesivos líquidos al cemento asfáltico antes de mezclado con la masa de caucho de neumático. Si es usada la cal hidratada se agregará de la manera especificada para la HMA convencional.

### 3.8 EQUIPO DE MEZCLADO

#### 3.8.1 MÓDULO MEZCLADOR DE ASFALTO AHULADO (HTM-14T/ME-1)

El módulo mezclador HTM-14/ME-1<sup>19</sup> es un equipo diseñado para mezclar cemento asfáltico con caucho obtenido de la molienda de neumáticos de uso frecuente en la República Mexicana. Su diseño lo hace adecuado para instalarse a un lado de la planta productora de mezclas asfálticas.

Este módulo funciona por medio de un sistema de mezclado de dos etapas. La primera etapa utiliza un agitador giratorio mecánico, que premezcla el asfalto con el caucho molido de neumáticos. La segunda etapa es un turbomezclador, donde se logra un mezclado intenso con muy alto corte que no se puede lograr por ningún otro medio, además de ser el sistema que utiliza la menor cantidad de potencia, lográndose con este equipo una mezcla de asfalto ahulado de la mejor calidad.

Con el módulo mezclador, el asfalto ahulado se puede programar de acuerdo con las necesidades de la planta productora de mezclas asfálticas; es decir, el operador de la planta de asfalto podrá indicar al operador del módulo la cantidad de asfalto ahulado que va a requerir, esto elimina los problemas de programar el suministro por parte de un proveedor, del transporte y del almacenamiento del producto; así mismo, asegura que las propiedades de la

---

<sup>19</sup> Hidroasfalto JC.

mezcla no sean afectadas por factores como falta de agitación, caídas de temperatura, distancia-tiempo, etc.

Con el mezclado en sitio no hay necesidad de ocupar tanques para el almacenamiento de grandes cantidades de asfalto ahulado, lo que aumenta la flexibilidad en la producción.

La capacidad de producción del módulo, es de 8,000 a 14,000 L/h. Si se trabaja por 8 horas la producción mínima será de 64,000 litros de asfalto ahulado, suficientes para apoyar la producción de 1066 ton. de mezcla asfáltica.

### 3.8.2 MÓDULO PARA MEZCLAR ASFALTO AHULADO (HA-3001)

Este nuevo módulo mezclador de asfalto ahulado HA-3001<sup>20</sup>, es el resultado de las experiencias tenidas en la operación de los módulos fabricados anteriormente y es un equipo portátil o estacionario. Por su diseño y tamaño se coloca a un lado de la planta productora de mezclas asfálticas.

El módulo mezclador HA-3001 funciona por medio de un sistema de tres etapas. La primera etapa utiliza un agitador giratorio mecánico de dos hélices con un difusor conductor donde se produce un grado muy alto de homogeneización del asfalto ahulado, una de las hélices evita la formación de terrones de hule y un disco mezclador. La segunda etapa es un ciclón calentador donde se prepara el asfalto homogeneizado. Se ha encontrado que

---

<sup>20</sup> Hidroindustria CM.

una de las partes que dificultan el proceso es debido a la disminución de temperatura que se pierde cuando se agrega el caucho al asfalto dentro del homogeneizador, debido a que el caucho se encuentra a temperatura ambiente, aún cuando el homogeneizador tiene una área grande de transmisión de calor, esta no es suficiente debido a lo mal conductor de calor que es el caucho, por ello es necesario ceder calor al asfalto ahulado por medio del ciclón calentador para disminuir este efecto. La tercera etapa es un turbomezclador diseñado especialmente para mezclar el asfalto con el caucho. Los elementos de este mezclador se diseñaron geoméricamente que obligan al fluido a tener varios giros de aproximadamente 160°, así se crea un flujo radial el cual obliga al fluido a ir de la parte central a las paredes y viceversa, también se logran cambios de dirección y choques de hasta 87 veces, que producen una mezcla de la mejor calidad del asfalto ahulado.

La mezcla del asfalto ahulado se hace de acuerdo con las necesidades de la planta productora de mezclas asfálticas, para tener disponible el asfalto ahulado en la cantidad y momento requerido.

La capacidad de producción del módulo, es de 8,000 a 14,000 l/h de asfalto ahulado. Si se trabaja por 8 horas la producción mínima será de 64,000 litros de asfalto ahulado.

### 3.9 VISCOSIDAD

El viscosímetro Brookfield se ha usado para determinar la viscosidad de mezclas de asfalto ahulado a 60 °C y 177 °C. Los rangos específicos típicos para mezclas que contienen 15-26% del tamiz No. 10 al 50 de caucho por peso de cementante son como se indican:

Viscosidad a 60 °C (Brookfield)	7,000 – 60,000 poises
Viscosidad a 177 °C (Brookfield)	1,500 – 4,000 centipoises

Sin embargo, los rangos específicos tendrán que ser determinados experimentalmente mezclando caucho y cemento asfáltico de varias fuentes.

El Reómetro Haake que es un viscosímetro rotatorio también puede ser usado para controlar mezclas de asfalto ahulado. Este viscosímetro puede probar estas mezclas a temperaturas de ambiente de 121 °C con un rango de viscosidad de  $10^0$  a  $10^{10}$  poises a las proporciones de esfuerzo cortante de  $10^{-3}$  a  $10^2 \text{ s}^{-1}$  y puede probar fluidos Newtonianos y no-Newtonianos.

En una prueba realizada a diferentes cementantes, estos se almacenaron a 160°C por 23 horas adicionales con mezclado intermitente.

Los valores de viscosidad medidos inmediatamente después de la hora de mezclado y después de las 23 horas de almacenamiento fueron aumentos significativos que parece ser el resultado de la reacción del caucho con el asfalto. Estos resultados confirman la estabilidad, indicando que la agitación no la cambia de la viscosidad con el almacenamiento. Los resultados también indican que con toda seguridad la combinación de asfaltos y CRM, aumenta desfavorablemente la viscosidad resultando un cementante no manejable.

La viscosidad es una función que incrementa continuamente del volumen del caucho, que el aumento relativo es una función de la temperatura, y que el aumento no es una función lineal del caucho. Los CRM reaccionaron diferentemente con los asfaltos, para algunos las medidas a las temperaturas altas y volúmenes fueron difíciles de reunir debido a la reacción rápida, otros fluctuaron significativamente durante la prueba.

El logaritmo de viscosidad se muestra como una función de temperatura, indica que aunque hay diferencias entre los efectos de los cauchos, los efectos son menos importantes que los efectos del volumen del caucho y la temperatura. El efecto de temperatura es principalmente debido al cambio en la viscosidad del asfalto, una normalización fue intentada usando después la relación de la viscosidad del cementante para antes de la adición del caucho.

Para controlar la consistencia del mezclado del asfalto y el caucho puede diluirse la mezcla con aceite extendedor aromático. Esto no puede ser necesario para los volúmenes de caucho bajos. La cantidad y tipo de aceite para ser agregado varía dependiendo del tamaño del caucho, cantidad, masa del asfalto, calidad y condiciones de reacción. Otra posible aproximación para bajar la viscosidad es usar un asfalto de calidad más baja de viscosidad en

lugar de aceite extendedor. Sin embargo, esto producirá una reducción permanente en la viscosidad.

### 3.10 PROPIEDADES REOLÓGICAS EN TEMPERATURAS ALTAS, INTERMEDIAS Y BAJAS DE PAVIMENTOS

Una tendencia general es que la adición del caucho ha aumentado significativamente el grado de la temperatura alta del cementante, aumentan la resistencia total a la deformación ( $G^*$ ) por un margen significativo a temperatura altas, pero como las caídas de temperatura el efecto del caucho está disminuyendo hasta un punto de cruce que es alcanzado. El grado de la temperatura baja es aumentado en unos pocos casos o permanecía igual y fue controlado por el valor ( $m$ ). El aumento en el grado de la temperatura alta esta debido al aumento de la rigidez en las temperaturas altas y es evidente en los valores medidos de  $G^*/\sin\delta$ . A temperaturas más bajas las partículas de caucho son menos sensibles a los cambios de temperatura resultando disminución en la rigidez de la dosificación.

Para evaluar el efecto del CRM en el funcionamiento del cementante asfáltico, se llevó a cabo un análisis comparativo de las propiedades que controlan las tres formas principales de esfuerzos en el pavimento.

### 3.10.1 RESISTENCIA CONTRA LA DEFORMACIÓN PERMANENTE A TEMPERATURAS ALTAS (ZURCAMIENTO)

El zurcamiento típicamente ocurre a la temperatura de servicio alta y las especificaciones del cementante requiere el factor de zurcamiento  $G^*/sen\delta$  ser un mínimo de 2.2 kPa para los cementantes envejecidos. Un valor más alto de estas medidas es que el cementante se comporta más como un material elástico y menos como un material viscoso, que es deseable aumentar la resistencia de zurcamiento. Esta resistencia fue evaluada examinando valores de  $G^*/sen\delta$  de cementantes envejecidos desde el grado de temperatura alta.

Esto concluye que la adición del caucho no sólo satisface el criterio de resistencia de zurcamiento al grado de temperatura alta sino que también incrementa la temperatura.

### 3.10.2 RESISTENCIA CONTRA LA ROTURA A LA FATIGA A TEMPERATURAS INTERMEDIAS.

La rotura a la fatiga ocurre en pavimentos después de que han estado en servicio por un período de tiempo. Por consiguiente el límite máximo para el factor de resistencia de fatiga  $G^*sen\delta$ , que es equivalente a  $G''$  conocido en Reología como el Módulo de Perdida, ha sido montado a 5,000 kPa en materiales envejecidos. El más pequeño el valor  $G^*sen\delta$ , el más elástico el

material y por lo tanto la mejor resistencia a la fatiga. Para la comparación,  $G \cdot \sin \delta$ , valora a 25 °C de especímenes envejecidos.

Por lo tanto, la adición de desperdicio de caucho generalmente mejora la resistencia a la fatiga del cementante resultante encima del cementante de control. También se mejora la resistencia contra la fatiga de rotura con el aumento en porcentaje de aceite extendedor.

### 3.10.3 RESISTENCIA CONTRA LA ROTURA DE TEMPERATURA BAJA

A temperaturas muy bajas el cementante se pone quebradizo o frágil y esto lo lleva a la rotura. Para evitar esto, el límite máximo en deslizamiento rígido se puso en los cementantes. También, la contribución de cambio de rigidez debe ser alta para que los esfuerzos termal no aumenten para producir grietas. Por consiguiente, un mínimo de 0.30 para el valor  $m$  es requerido. El deslizamiento de rigidez  $S$  se ha comparado al grado de temperatura baja de los cementantes. También, con el aumento en la concentración de caucho y aceite extendedor, disminuye la rigidez del deslizamiento y resulta mejor en propiedades del cementante la resistencia termal.

### 3.11 PRUEBA DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO MODIFICADO

Shuler<sup>21</sup> denominó la versión modificada "Prueba de Cambio de Fase". Newcomb<sup>22</sup> observó que esa temperatura de cambio de fase era característica de las partículas de caucho. Fueron notadas temperaturas de cambio de fase para aumentar con el almacenamiento de la dosificación del asfalto ahulado. Una correlación con un valor  $R$  de 0.9 se estableció entre la deformación y el valor del punto de reblandecimiento modificado para las dosificaciones evaluadas de asfalto ahulado. Por consiguiente, el valor del punto de reblandecimiento podría potencialmente usarse para estimar la deformación del asfalto ahulado. Típicamente, un punto de reblandecimiento mínimo de 57 °C se especifica para una mezcla de asfalto ahulado que contiene asfalto AC-20 y 15-26% de caucho (tamiz del No.10 al 50). Esta prueba es simple y el equipo es relativamente barato. La prueba modificada es para dar valores del punto de reblandecimiento relativamente más bajos que el anillo normal y la prueba de la pelota.

---

<sup>21</sup> Shuler, T. S., A Rotational Investigations of Asphalt Rubber Properties, New Mexico Engineering Research Institute, (1981).

<sup>22</sup> Newcomb, D. E., Field Asphalt Rubber Mixtures Study, New Mexico Engineering Research Institute.

### 3.12 PRUEBA DE FUERZA DE DUCTILIDAD

Esta prueba se desarrolló para la evaluación de propiedades de tensión de cemento asfáltico. Su uso con cemento asfáltico estaba de algún modo limitado porque estos cementantes no poseen fuerza de tensión alta y así la prueba ha encontrado un uso más significativo para los materiales de polímeros y de asfalto ahulado. En esta prueba se usan células de carga para supervisar la fuerza necesaria para romper muestras de áreas de sección transversal constantes. Se usan la carga y datos del desplazamiento obtenidos de esta prueba para calcular la deformación y el trabajo necesarios para fracturar la muestra.

Los resultados de esta prueba son típicamente de la forma mostrada en la FIGURA 1. La rigidez debida al asfalto solo y al caucho puede diferenciarse. En la FIGURA 1(a) la pendiente de la parte izquierda de la primera curva es característica del asfalto mientras que la pendiente correspondiente a la segunda curva es debida al caucho. La pendiente de la segunda curva representa el módulo del caucho y siempre se relaciona a la fuerza de tensión del polímero. La ocurrencia de una doble curva hace pensar en la compatibilidad del caucho y la base del asfalto. Así la ausencia de compatibilidad del caucho con el asfalto puede ser indicada por falta de una segunda curva como indica la FIGURA 1(b). El término se asume que "compatibilidad" implica que el caucho está muy bien dispersado en el asfalto. Por otro lado, la doble curva no siempre es un indicador de compatibilidad desde que algunos aditivos producen un material homogéneo con una sola curva.

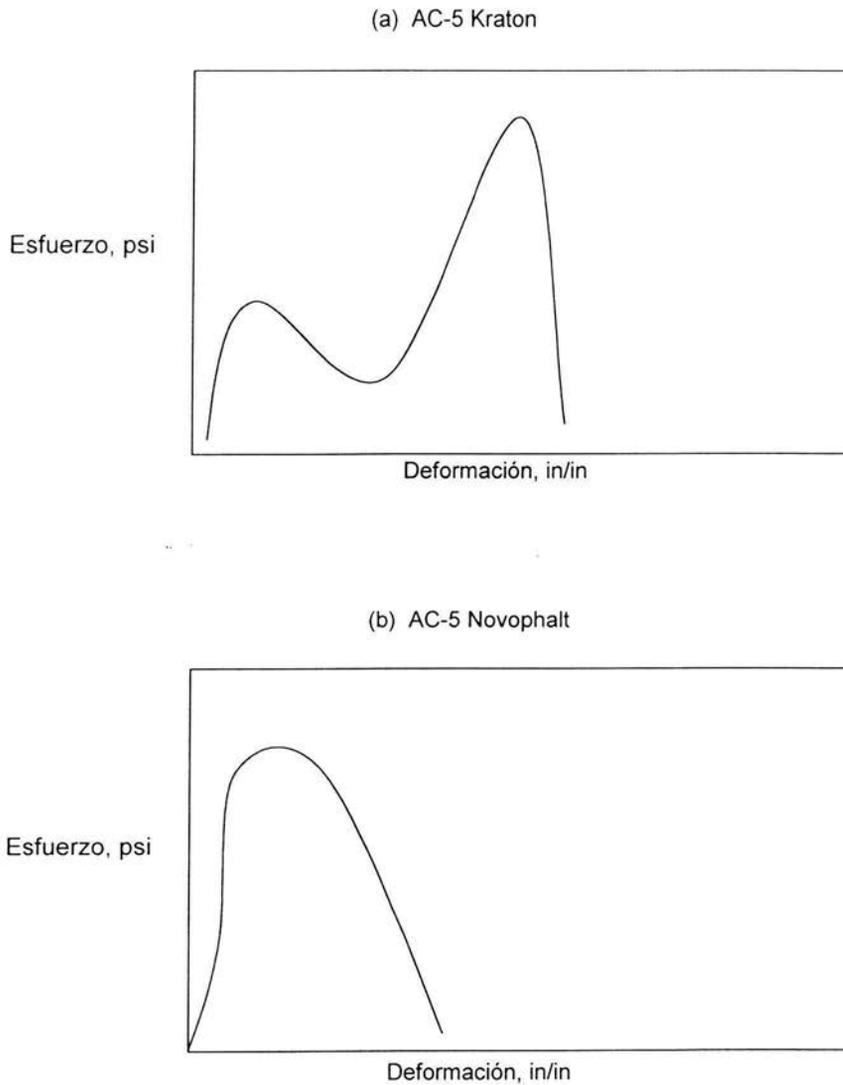


FIG. 1. Curvas típicas de Esfuerzo-Deformación de las Pruebas de Fuerza de Ductilidad a  $-1^{\circ}\text{C}$

### 3.13 PRUEBA DE DUREZA/TENACIDAD

Estas dos propiedades son características de la fuerza de tensión de un material. Ellas son determinadas básicamente usando la Prueba Benson<sup>23</sup> de dureza y Tenacidad. Una cabeza hemisférica metálica esta incrustada en el asfalto caliente fundido a una profundidad de 7/16 in. Son enfriados la cabeza y el medio a 25 °C. La cabeza es arrastrada de la media a la tasa a 20 in/min.

Se define dureza como el trabajo representado por el total que está bajo la curva, y tenacidad por el área limitada directamente por la curva del alargamiento alto y una proyección de la curva de la cresta al eje. Fig. 2.

Las propiedades físicas que relacionan al funcionamiento de un sistema asfáltico son ductilidad de temperatura baja y las propiedades de tensión reflejadas por dureza y tenacidad. Los esfuerzos que deben considerarse juntos son ductilidad, dureza y tenacidad porque ellos contribuyen a mejorar la retención del agregado y la susceptibilidad de la temperatura baja.

La prueba tiene algunos inconvenientes: (1) la prueba normalmente se corre a temperatura ambiental por lo cual los cambios pequeños en la temperatura pueden afectar la viscosidad significativamente y por lo tanto, los resultados de la dureza/tenacidad, (2) la muestra de las áreas de la sección transversal nos informan que la prueba de repetibilidad nos puede dar dificultad, igualmente que los datos de reproducibilidad pueden ser difíciles de lograr, y (3) por último, la

---

<sup>23</sup> Benson, J. R., *Roadsand Engineering Construction*, (1955).

subjetividad involucrada dividiendo la curva entre la dureza y las regiones de la tenacidad plantea una dificultad significativa.

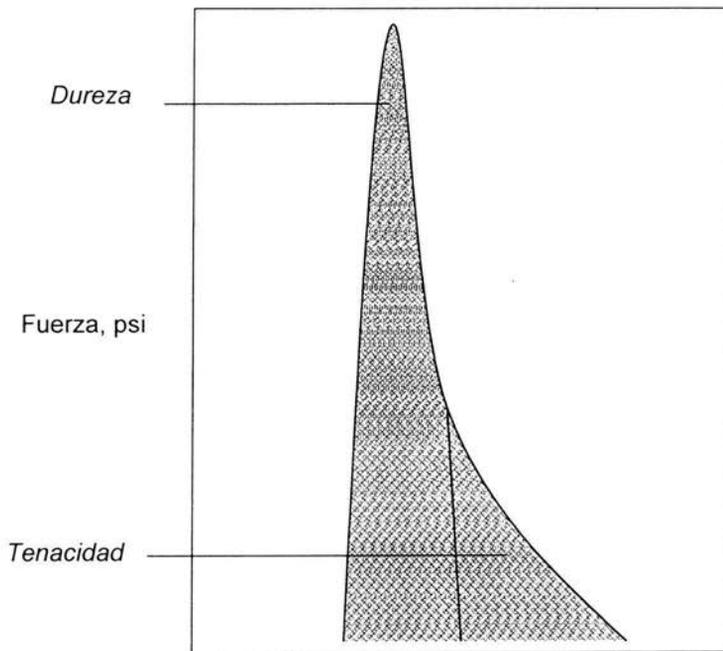


FIG. 2. Curva de Fuerza-Alargamiento.

### 3.14 PRUEBA DE LA PELOTA CAYENDO

Este es un procedimiento de prueba muy simple y barato que puede usarse para determinar la fuerza de tensión de un material polimerizado. Se somete el espécimen de prueba a condiciones de tensión constantes. Una muestra de asfalto de 8.0 g se coloca en una taza de metal mecanizada y una pelota de dimensiones específicas se empotra a una profundidad convencional. El aparato es invertido para que la pelota sea libre para caer. El tiempo requerido por la porción empotrada de la pelota para alcanzar la tangente del punto a la superficie de la taza se define como  $t_1$ . El tiempo requerido por la pelota para caer de ese plano tangente a un punto menos de 30.0 cm se define con  $t_2$ . El tiempo  $t_1$  depende un poco de la viscosidad del asfalto o su fuerza de tensión lineal. El tiempo  $t_2$  también depende un poco de la viscosidad pero es principalmente afectado por la fuerza de tensión del asfalto cuando es extendido. La proporción  $t_2/t_1$  proporciona una relación aproximada entre la elasticidad o la fuerza de tensión después del alargamiento y la viscosidad original.

### 3.15 RECUPERACIÓN DE DESLIZAMIENTO DE RESPUESTA-ELÁSTICA

La habilidad de un asfalto de caucho modificado para recuperarse elásticamente es un requisito de funcionamiento muy deseado. Puesto que el deslizamiento es tiempo dependiente, es necesario supervisar la recuperación

elástica por unidad de tiempo o especificar el intervalo de tiempo al que la recuperación será determinada.

### 3.15.1 RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR DUCTILÍMETRO

Un espécimen del ductilímetro normal se estira a 20.0 cm a 10 °C y se sostiene durante 5 minutos. El espécimen está entonces cortado por en medio, la longitud combinada de las dos mitades es determinada después de una hora y la recuperación del por ciento es determinada como sigue:

% de Recuperación =  $[(20 - X) / 20] 100$ , donde:

X = la longitud después de una hora.

Esta prueba es reportada por ser simple, usa equipo rápidamente disponible con un control de temperatura bueno, y tiene buena reproducibilidad. Así, que esta prueba es un candidato bueno para el uso en especificaciones de asfalto de caucho modificado.

### 3.15.2 PRUEBA DE RECUPERACIÓN TORSIONAL

Esta prueba mide la elasticidad impartida por un caucho al cemento asfáltico. Un disco de metal es incrustado en el asfalto modificado, girando a 180° relativo al recipiente de la muestra, la banda es retirada y el espécimen se permite recuperar. Se graban los resultados de 30 segundos y 30 minutos. El por ciento de la recuperación se calcula como:

% de Recuperación =  $( A / B ) 100$ , donde:

A = la longitud entre la recuperación marcada a 30 segundos y 30 minutos

B = la longitud por 180 ° de rotación.

Las limitaciones de la prueba son: (1) falta de control de temperatura precisa, (2) incapacidad para aplicar un esfuerzo constante, (3) la muestra esta requiriendo grandes evaporaciones de la emulsión múltiple, y (4) la recuperación elástica instantánea que ocurre durante los primeros 30 segundos después de la liberación se excluye del cálculo. Esta prueba se puede usar como indicador del por ciento del caucho que se agregó al asfalto.

### 3.15.3 RECUPERACIÓN ELÁSTICA CON EL REOMETRO ARRB

Se desarrolló una cáscara modificada del reómetro del plato corredizo para estudiar materiales bituminosos engomados. El instrumento mide deslizamiento durante el esfuerzo cortante y la recuperación elástica después del esfuerzo cortante. Las propiedades que son determinadas de los resultados de la prueba incluyen: deformación elástica instantánea, deformación elástica retrasada, equilibrio del flujo viscoso, recuperación elástica instantánea, recuperación elástica retrasada, y deformación permanente. La recuperación elástica se calcula como sigue:

% de Recuperación Elástica =  $( RD / OD ) 100$ , donde:

RD = el desplazamiento de la recuperación

OD = el desplazamiento original.

### 3.15.4 DISPOSITIVO DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA DEKKER

Este dispositivo fue desarrollado por Dekker para medir el tiempo dependiente de la respuesta del deslizamiento o las propiedades teológicas del polímero de asfaltos modificados.

### 3.16 PROBLEMAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PAVIMENTO

Las mezclas de tipo de caucho modificado, son partículas de caucho granuladas secas que son mezcladas con los agregados minerales antes de mezclar con el asfalto en cantidades que van de 2.5 a 5.5 por ciento por peso de los agregados.

El cementante consiste en una mezcla de aproximadamente 20 por ciento de masa de caucho de neumático y cemento asfáltico normalmente con una cantidad pequeña de aceite extendedor. Esta mezcla se reacciona a una temperatura elevada de 190 °C a 218 °C por aproximadamente dos horas.

Algunas diferencias del significado físico y manejo entre el caucho modificado y dosificaciones de asfalto ahulado son nombradas abajo:

En las mezclas de caucho modificado, el caucho granulado presenta de 2.5 a 5 por ciento del peso del agregado mientras en las mezclas de asfalto ahulado el caucho representa normalmente aproximadamente 20% del cementante o menos de 1.5% de la dosificación. Por consiguiente, las mezclas de caucho modificado usan de 2 a 4 veces más trozo de caucho que las mezclas de asfalto ahulado.

En las mezclas de caucho modificado, el caucho granulado se maneja como un agregado y se alimenta en la planta a través del sistema de alimentación frío mientras que en las mezclas de asfalto ahulado, se necesita un equipo especial de mezclado así como temperatura alta en los tanques de mezclado para reaccionar el asfalto y el caucho granulado hasta que una viscosidad estable se

logre. Por consiguiente se requiere equipo especial para la producción de materiales de asfalto ahulado.

En las mezclas de caucho modificado las partículas de caucho están mucho más grandes que para las mezclas de asfalto ahulado.

### 3.16.1 FUNCIONAMIENTO DEL PAVIMENTO

Una de las consideraciones primarias en la inclusión del trozo de caucho de neumático en las superficies de la HMA, es que no debe haber efectos perjudiciales en el funcionamiento, no debe comprometerse la calidad de las mezclas actuales para disponer del trozo de caucho. Hay varias propiedades de dosificaciones que son afectadas por la inclusión del trozo de caucho y que se relacionan directamente con el funcionamiento de estas.

### 3.16.2 RESISTENCIA A LA FATIGA

La resistencia a la fatiga es la habilidad de un material a resistir cargas repetidas que inducen a la deformación de tensión que llevan a cabo a la rotura. Las mezclas superficiales son típicamente 1 a 1 ½ in de espesor y se ponen a menudo como cubiertas en carreteras existentes. Si estas carreteras muestran una rotura severa debido al recubrimiento, la superficie existente se muele fuera

y una capa estructural se pone para fortalecer el pavimento suficientemente para resistir el tráfico anticipado, y finalmente una superficie de granulometría cerrada o semiabierta se pone si la carretera es una instalación de vía de dos carriles o una instalación de multivía con velocidades menores de 50 mph. Una capa de fricción de granulometría abierta se pone como la superficie en todas las instalaciones de la multivía con velocidades de 50 mph o mayores.

Cuando se agregan partículas de caucho en una HMA que usa caucho modificado o la tecnología de asfalto ahulado, la vida de fatiga se mejora significativamente. Piggott y Woodhams<sup>24</sup> concluyen que la adición de 5% de caucho al asfalto en sistemas de HMA probablemente dobla la vida de fatiga de las carreteras.

Para materiales en el laboratorio, la mezcla de control muestra 0% de caucho. En todos los casos las curvas de fatiga de la dosificación de caucho modificado se localizan sobre las mezclas de control, muestran que para una deformación dada, el número de repeticiones a la falla (vida de fatiga) siempre es más alto para las mezclas de caucho modificado que para la mezcla de control. De hecho, estas diferencias están más pronunciadas a  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  que a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . También se nota que  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  la mezcla de granulometría cerrada tiene una resistencia a la fatiga mejor que la mezcla de granulometría semiabierta.

Para el mezclado de campo, muestra que los materiales de caucho modificado exhibieron una vida de fatiga más alta que las mezclas de control. La pendiente de las curvas de fatiga para la mezcla de control es más empinada que para la

---

<sup>24</sup> Piggot, M. R., and R. T. Woodhams, Recycling of Rubber Tires in Asphalt Paving Materials, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, (1979).

mezcla de caucho modificado que indica una resistencia a la fatiga más baja a deformaciones bajas.

Para las mezclas de asfalto ahulado solo una mezcla se estudió: 80% de cemento asfáltico (77%), aceite extendedor (3%) y 20% de caucho. Se realizaron pruebas de fatiga a una viga en una dosificación de agregado de granulometría cerrada de HMA preparadas con un control AC-10 (4.8% de asfalto) y el cementante de asfalto ahulado a tres niveles diferentes: ARC<sup>25</sup>-bajo (4.23% de cementante), ARC-medio (4.73% de cementante) y ARC-alto (5.23% de cementante).

Para las mezclas ARC-medio y ARC-alto, cuando la temperatura excede 15°C, el funcionamiento de las mezclas de asfalto ahulado es superior a que del control AC-10 pero para temperaturas más bajas que 15 °C el funcionamiento para todas las mezclas excepto ARC-bajo es el mismo. El funcionamiento de la temperatura baja de la mezcla ARC-baja se ignorará desde que es muy improbable que los materiales se pondrían a semejante volumen bajo del cementante.

Otro estudio que involucra los porcentajes similares de caucho a aquéllos en las dosificaciones de asfalto ahulado, el caucho regenerado se agregó directamente con el agregado caliente en el amasadero en el campo o en el mezclador en el laboratorio, el agregado y el caucho fueron mezclados durante 10 a 15 segundos y entonces el asfalto caliente fue agregado y se mezcló durante 45 segundos a aproximadamente 171 °C. Se concluyó que la adición del caucho regenerado mejoró la durabilidad y resistencia al agrietamiento de la dosificación sobre todo a temperaturas altas. Agregando el caucho granulado al

<sup>25</sup> ARC – Asphalt Rubber Concrete – Concreto Asfáltico Ahulado.

agregado caliente sin tiempo de reacción entre el asfalto y caucho, produce una dosificación con características de fatiga que son superiores a la HMA convencional sobre todo a temperaturas bajas.

Es difícil hacer comparaciones de fatiga de temperaturas altas directas entre mezclas de asfalto modificado y asfalto ahulado desde que la temperatura de prueba más alta para el asfalto modificado es de 10 °C a 23 °C; mientras que los resultados del asfalto ahulado incluyó temperaturas arriba de 40 °C. Y aunque la mezcla de asfalto modificado de granulometría cerrada mostró un aumento significativo en la vida de fatiga a 10 °C comparada a la mezcla de control de granulometría cerrada, la tendencia mejorada en la vida de fatiga para las mezclas de caucho modificado parece ser más baja a temperaturas más altas.

### 3.16.3 MÓDULO ELÁSTICO

El módulo es la relación de la repetición axial del esfuerzo desviador a la deformación axial recuperable.

Las mezclas usadas eran de granulometría semiabierta, cuando la graduación de caucho cambia de tosca a fina, el módulo elástico para esta mezcla aumenta hacia lo medido para la mezcla de control de granulometría cerrada. Adicionalmente, cuando el porcentaje del caucho disminuye de 3 a 2% el efecto de la graduación del caucho es más grande para la masa más fina de caucho. A 3% de caucho, la mezcla de caucho que mejora el módulo elástico parece ser la

mezcla media la cual consiste de 60% de caucho tosco y 40% de caucho fino. A 2% de caucho, la tendencia del módulo elástico continúa aumentando como la graduación de caucho que va de tosca a fina; indicando quizás que cuando el porcentaje de caucho disminuye el módulo es afectado más por las graduaciones de caucho más finas. La conclusión confirma que esa evidencia limitada sugiere que un promedio del tamaño de la partícula cerca del tamiz No. 30 proporciona los mejores resultados.

Para el proyecto 1, tres porcentajes de caucho diferentes (2.5, 3.0, y 3.5%) fueron incorporados en una agregado de granulometría semiabierto. Los datos del módulo elástico muestran que el promedio más alto de este ocurrió al 2.5% de caucho para la mezcla normal. Sin embargo, cuando la mezcla normal con 3.5% de caucho tenía 2% de caucho fino agregado a ella, el módulo aumentó un 60%.

Los resultados del módulo elástico para el proyecto 2 donde las graduaciones de la dosificación del agregado variaron del fino al tosco con cada una de las tres graduaciones que tienen un extra de 2% de caucho fino agregado a la mezcla normal. Los resultados indican que no solo se hizo la graduación más fina de las graduaciones normales exponiendo el promedio más grande del módulo pero también era la dosificación que mostró el porcentaje mayor y el aumento absoluto en el módulo elástico con la adición del 2% del caucho fino.

Una comparación se presentó para la mezcla de control y la dosificación de caucho modificado que contiene 3% de caucho tosco. Los valores del módulo elástico informaron que las dosificaciones de caucho modificado exhibían un módulo de aproximadamente 75% de la dosificación de control. Las mezclas del asfalto ahulado muestran que una mezcla de control de temperatura más baja

tiene el módulo más alto pero las temperaturas sobre 24 °C de las mezclas del asfalto ahulado exhiben los valores del módulo más altos. De hecho, a los 41 °C, el módulo más bajo mostrado está para la dosificación de control. A las temperaturas más altas, el módulo más alto de la mezcla de asfalto ahulado permite al pavimento sostener una deformación de tensión más baja a una carga dada.

#### 3.16.4 DEFORMACIÓN PERMANENTE

El comportamiento de deslizamiento de mezclas de caucho modificado muestra que como el tiempo de cargamento aumenta todas las mezclas experimentan significativamente más deformación a la compresión vertical que la mezcla de control. Estas mismas mezclas comprimen mucho más a temperatura más alta (40 °C) que la mezcla de control. Esto significa que bajo movimiento lento o vehículos estacionados, estas mezclas experimentarán significativamente las deformaciones mayores a la compresión permanente que en las dosificaciones convencionales HMA.

Las mezclas de caucho modificado de granulometría cerrada y semiabierta con el 100% de caucho fino tienen las pendientes más planas a la temperatura de prueba de 40 °C. Esto indica que la granulometría cerrada en el agregado y la graduación de caucho fino mejora la resistencia al deslizamiento de las mezclas de caucho modificado. La mejor resistencia de deslizamiento a ambas temperaturas es mostrada por la granulometría cerrada de la HMA de control.

El deslizamiento bajo carga constante es una de las consideraciones en la evaluación del potencial de zurcamiento de dosificaciones de asfalto, sin embargo, el comportamiento de las dosificaciones bajo carga repetida también es muy importante. Las mezclas que se sometieron a carga repetida donde la deformación a la compresión permanente era medida, muestra que bajo la carga cíclica repetida, las pendientes de las líneas de la deformación permanente para todos los materiales de caucho modificado son más bajas que la pendiente de la HMA de control. Por consiguiente, mientras las mezclas de caucho modificado deforman más bajo la carga constante que la mezcla de control, ellas deforman menos que la mezcla de control bajo carga repetida.

#### 3.16.5 DISEÑO DE PROPIEDADES DE LA DOSIFICACIÓN MARSHALL

El método de diseño de la dosificación Marshall incluye varias propiedades de las dosificaciones de asfalto usadas para evaluarlas durante la fase de diseño de laboratorio. El propósito de esto es revelar la experiencia de los esfuerzos de investigación previos al efecto de agregar trozo de caucho de neumático granulado a las dosificaciones HMA.

### 3.16.5.1 HMA DE CAUCHO MODIFICADO

Se ha encontrado que las muestras de Marshall normales se probaron para el flujo y estabilidad pero que sólo el volumen de vacíos de aire se usó para el diseño de la dosificación. Esto indica, que la relación entre el funcionamiento del campo, y estabilidad y flujo Marshall no existió para estas mezclas de HMA de caucho modificado.

Los valores de estabilidad de Marshall son mucho más bajos para las mezclas de caucho modificado que para la de control que va de 29 a 61% de la estabilidad de la mezcla de control. La graduación más fina de caucho generalmente mostró estabilidad más alta que la graduación más tosca de caucho. Además, los valores del flujo de Marshall para las mezclas de caucho modificado son mucho mayores que para la de control que va de 1.9 a 4.2 veces el flujo de la mezcla de control con la graduación más fina de caucho que muestra los valores de flujo más bajos.

La misma tendencia general hacia la estabilidad de Marshall reducida también fue para la HMA de caucho modificado cuando se comparó con la HMA normal. Sin embargo, estos pavimentos habían dado un buen funcionamiento que indica que las dosificaciones de caucho modificado no conforman a las expectativas normales en base a las medidas de estabilidad de Marshall.

Estos datos indican que hay una necesidad para evaluar las implicaciones de la estabilidad y flujo de Marshall en el funcionamiento de las mezclas de caucho modificado y quizás usar aquellos valores de prueba sólo para la selección del volumen del cementante óptimo pero no como un indicador de funcionamiento

de campo aceptable. Como un punto de principio conservador, las mezclas que usan cementantes de asfalto ahulado deben reunir los mismos requisitos de estabilidad Marshall como las mezclas convencionales. Sin embargo, debe darse la consideración a aumentar los valores de flujo de Marshall.

#### 3.16.5.2 HMA DE ASFALTO AHULADO

El asfalto ahulado se usó como un cementante en la preparación de un material de mezcla caliente de asfalto, involucra un agregado de granulometría cerrada, las propiedades de diseño de la mezcla de Marshall del concreto asfáltico ahulado eran muy similares a aquellas para la dosificación de la HMA normal.

Los datos de propiedad de Marshall para esta dosificación, indican que los vértices de la estabilidad Marshall a un volumen bajo del cementante corresponde un 9% de volumen de vacíos de aire. Si un criterio de 4% de vacíos de aire se aplicó a esta dosificación, entonces la estabilidad sería mucho más baja, el flujo sería mucho más alto, y el volumen del cementante probablemente aumentaría por lo menos 1.5%.

Otro diseño de HMA de asfalto ahulado para una segunda dosificación de caliza, mostró que los valores de estabilidad y flujo estarían en el rango aceptable para las dosificaciones de HMA en un volumen de vacíos de aire de 4%. Puesto que estas dosificaciones son de granulometría cerrada, es posible que para las dosificaciones de granulometría semiabierta y abierta las

estabilidades pueden ser más bajas y los flujos más altos que para las mezclas de HMA normales aceptables.

### 3.17 PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN PAVIMENTO QUE CONTIENE ASFALTO AHULADO

Los cambios más dramáticos necesitan ser hechos para el proceso de construcción. Mucha de la experiencia ganada a la fecha ha sido con dosificaciones de asfalto ahulado que contienen volúmenes de caucho relativamente altos (16-24% de caucho por peso del cementante) y el tamaño de la partícula relativamente grande (menos de la malla N0. 10) del caucho. Por consiguiente la mayoría de las modificaciones al proceso de construcción es basado en experiencia con este tipo de material. Si se usan concentraciones más bajas (3-5% de caucho por peso del cementante) y el clasificado más pequeño según el tamaño del caucho (menos de la malla No. 24 o 28), se esperarían los menores cambios en el proceso de construcción.

#### 3.17.1 MANEJO DEL CEMENTANTE

El asfalto ahulado es producido por el mezclado continuo de asfalto caliente y masa de caucho de neumático en tanques de mezclado aislado. Para lograrse

consistencias deseadas, aceites extendedores pueden necesitar ser agregados a la mezcla para reducir la viscosidad de la mezcla dentro del rango especificado. Podría ser el caso cuando el 10% o más de caucho de la malla No. 24 es agregado en granulometrías abiertas y ningún aceite si el 3-5% del caucho de la malla No. 80 se agrega a dosificaciones de granulometrías cerradas y semiabiertas.

El mezclado y almacenamiento del asfalto ahulado debe lograrse usando agitación continua por medio de la recirculación. Se espera que el mezclado de los cementantes de asfalto ahulado con porcentaje de caucho más bajo tome entre 45 minutos y una hora para lograr la reacción necesaria para proporcionar las propiedades deseables del cementante.

### 3.17.2 MEZCLADO DEL ASFALTO CON EL AGREGADO

El caucho se agregará a la mezcla en la cantidad especificada, son mezclados juntos por vario periodos de tiempo antes de usarse como un pavimento. La recirculación continuará asegurando el mezclado apropiado y dispersión de todos los componentes. Las temperaturas para las dosificaciones de granulometría cerrada deben ser más altas que para materiales de granulometría abierta para lograr un revestimiento uniforme. Las temperaturas del mezclado del cementante recomendadas para cada uno de estos tipos de materiales deben ser 163 °C a 191 °C para las dosificaciones de granulometría cerrada y semiabierto, y 135 °C a 163 °C para las dosificaciones de granulometría abierta cuando se usan volúmenes altos de caucho.

En general, la consistencia del asfalto ahulado es reducida ya que la temperatura y tiempo es aumentad más allá del tiempo requerido para producir la reacción inicial entre el asfalto líquido y el caucho de neumático sólido. Esta reacción inicial parece ser debido a un intercambio químico y físico entre el asfalto y las partículas de caucho en las que el caucho se dilata en volumen causando aumento en la viscosidad.

La reacción es considerada completa cuando la viscosidad de la mezcla llega a ser relativamente constante. Continuando el mezclado del asfalto y caucho después de este punto puede empezarse a reducir la consistencia de la mezcla ya que las partículas de caucho se rompen aparte durante el mezclado con el cemento asfáltico caliente. Sin embargo, la falla de la partícula de caucho no es rápida, y puede requerir varias horas de mezclado a temperaturas altas antes de la pérdida notable en los resultados de la viscosidad.

### 3.17.3 ALMACENAMIENTO DEL CEMENTANTE DEL ASFALTO AHULADO

Ninguna dificultad debe encontrarse en el almacenamiento si las temperaturas se mantienen a niveles elevados, la viscosidad de los cementantes, y por consiguiente de las dosificaciones; pero esto podría ser algo impráctico y potencialmente arriesgado.

Sin embargo, un mayor estudio se emprendió para formular como un cementante de asfalto ahulado podría almacenarse en tanques durante varios días después de mezclarse sin los cambios apreciables en viscosidad u otras

propiedades. El cementante podría producirse así en ubicaciones terminales centrales y podría enviarse a diferentes lugares de la planta de producción de asfalto para pavimentar.

El estudio fue realizado para evaluar el efecto de variaciones de la mezcla en las propiedades de las dosificaciones del asfalto ahulado. El propósito era desarrollar un cementante que tenía un tiempo de almacenamiento de arriba de 8 días y se encontraría el siguiente criterio: (a) un punto de reblandecimiento mayor que 65 °C y (b) una penetrabilidad de 70 a 100 / 10 mm a 25 °C.

#### 3.17.3.1 EFECTO DEL DESPERDICIO DE CAUCHO

El efecto de tres volúmenes diferentes de desperdicio de caucho (8%, 9%, y 10% de caucho) fue evaluado en la viscosidad, punto de reblandecimiento, resiliencia, y penetrabilidad del cementante del asfalto ahulado. Los resultados indican que las propiedades óptimas pueden lograrse al 10% del volumen del desperdicio de caucho.

#### 3.17.3.2 EFECTO DEL ACEITE EXTENDEDOR

El efecto de cuatro niveles diferentes de volumen de aceite extendedor fue evaluado (3%, 4%, 5%, y 6% de aceite extendedor). Los resultados indican que

un aumento en el porcentaje del aceite extendedor disminuirán el punto de reblandecimiento, aumentará la penetrabilidad, aumentará la capacidad por tensión, y reducirá la resistencia. Un máximo del 6% de aceite extendedor proporciona propiedades óptimas del cementante.

#### 3.17.3.3 EFECTO DEL CATALIZADOR

Se evaluaron dos niveles del catalizador, 2% contra 3%. Los resultados indican que un máximo de 2.5% del catalizador proporciona las propiedades óptimas del cementante del asfalto ahulado.

Una formulación fue desarrollada para proporcionar un almacenamiento del cementante de asfalto ahulado, la composición está basada previamente en los resultados de la prueba.

ALMACENAMIENTO DEL CEMENTANTE DE ASFALTO AHULADO	COMPOSICIÓN  VOLUMEN(%)
Asfalto 80 / 100	81.5
Polvo de caucho	10.0
Aceite extendedor	6.0
Catalizador	2.5

El cementante del asfalto ahulado fue producido usando el almacenamiento perfeccionado de la formulación del cementante. Fue producido a 180 °C (el proceso de producción toma aproximadamente 2 horas), entonces se guardó en tanques a 160 °C en un recipiente herméticamente sellado sin agitación. Los muestreos fueron tomados a los intervalos regulares en orden para supervisar el cambio en el producto.

Las propiedades del cementante del asfalto ahulado después de la producción eran como sigue:

Punto de reblandecimiento	65 °C
Penetrabilidad	70
Viscosidad (Reómetro)	640 cp a 180 °C
	1070 cp a 160 °C
Estiramiento bajo tensión a punto de ruptura a – 10 °C	330%

Los resultados de la evaluación de las propiedades del almacenamiento del cementante del asfalto ahulado después de 6 días de almacenamiento proporcionó los resultados siguientes:

Punto de reblandecimiento	72.5 °C
Penetración a 25 °C en 1 / 10 mm	85
IP Pfeiffer (Índice de Plasticidad)	+ 1.34
Viscosidad (Reómetro)	1070 cp a 180 °C
	1040 cp a 160 °C
Punto de ruptura de estiramiento bajo tensión a – 10 °C	350%

Las conclusiones del estudio muestran que la formulación desarrollada era consistente con la especificación predeterminada. Una semana después de almacenamiento a 160 °C, no había degradación notable del cementante del asfalto ahulado.

#### 3.17.3.4 LAS VENTAJAS DEL ALMACENAMIENTO DEL CEMENTANTE DEL ASFALTO AHULADO

Hasta en el desarrollo del almacenamiento del cementante de asfalto ahulado, era necesario preparar el cementante justamente antes del uso en la planta de producción. Por ello, era obligatorio tener una unidad de mezclado móvil de cementante en el sitio de la planta de pavimentación del asfalto.

Sin el almacenamiento del cementante las desventajas de producción son las siguientes:

- Incapacidad para distribuir plantas de mezcla caliente de alta capacidad con bastante cementante para encontrar sus contribuciones de producción de diseño.
- Si hay una falla, en la planta de mezcla caliente o en el funcionamiento de pavimentación, el almacenamiento del cementante a temperatura alta es imposible debido a la pérdida de calidad.
- Para los proyectos pequeños, es económicamente prohibitivo usar la unidad móvil considerando el costo de movilización.

Sin embargo, con el almacenamiento del cementante, es posible preparar en progreso el cementante para encontrar las contribuciones de producción alta de plantas de asfalto. Es más, en condiciones de clima, el funcionamiento de la planta, o las fallas del equipo para pavimentar ya no tienen una influencia en la producción o calidad del cementante.

### 3.17.4 TRANSPORTE DE LA MEZCLA CALIENTE DE ASFALTO AHULADO

La mezcla caliente de asfalto ahulado puede transportarse al sitio del trabajo en cualquier tipo de camión convencional trasero o camión de descarga inferior. Durante el transporte y colocación, la HMA fabricada con cementantes de asfalto ahulado puede perder temperatura a una proporción más lenta que la HMA convencional.

Los cementantes de asfalto ahulado son significativamente más viscosos que los asfaltos convencionales. Por consiguiente, el desagüe baja del asfalto ahulado de los agregados a la cama del camión durante el acarreo de dosificaciones de granulometría abierta, y se recomienda que las camas del camión sean examinadas después de que la capa de fricción de granulometría abierta es arrastrada por encima de una distancia larga a la planta.

Después de la descarga de las dosificaciones y antes de recargar, no deben rociarse las camas del camión con combustible de diesel u otro petróleo destilado como medios de conservación a la dosificación del asfalto ahulado a causa de la adherencia en la cama. Estos diluentes causan una reacción con el asfalto ahulado y realmente promueve la mejor adherencia entre la dosificación y la cama del camión. En cambio, debe usarse una dosificación de agua de cal, solución de jabón o emulsión de silicón.

### 3.17.5 COLOCACIÓN DE LA MEZCLA CALIENTE DE ASFALTO AHULADO

La mezcla caliente de asfalto ahulado debe ponerse usando equipo de colocación convencional con un emparejador caliente. Ninguna dificultad aparente se ha asociado con la colocación de estos tipos de dosificaciones cuando las temperaturas a la descarga del emparejador están entre 143 °C a 163 °C para las dosificaciones de granulometría cerrada y semiabierta y entre 135 °C a 149 °C para las dosificaciones de granulometría abierta cuando se usan volúmenes altos de caucho. Las temperaturas más bajas deben ser adecuadas para mezclas que contienen volúmenes de caucho más bajos.

### 3.17.6 CONSOLIDACIÓN

Para la consolidación de la mezcla caliente no se recomienda usar rodillos de neumáticos de caucho porque tiene una tendencia a pegarse al caucho caliente en la dosificación del asfalto ahulado causando la recuperación de la mezcla. Tampoco se recomiendan rodillos vibratorios debido al rasgamiento y plegamiento que puede ocurrir en estas dosificaciones elásticas.

Las temperaturas de consolidación deben estar entre 130 °C a 149 °C para granulometría cerrada y semiabierta y 121 °C a 141 °C para las dosificaciones de granulometría abierta. La lubricación de los tambores de rodillo de acero

debe ser por cualquiera de las soluciones sugeridas para las camas del camión. La lubricación con petróleo destilado no se recomienda.

Algunas dosificaciones de asfalto ahulado, sobre todo con volúmenes altos de caucho, tienden a la recuperación si se abre el tránsito mientras están calientes. Por lo que el contratista debe tener concreto de arena disponible para ser aplicado para prevenir la recuperación.

### 3.18 EXPERIENCIAS RECIENTES EN NUESTRO PAÍS

En el año 2001 dentro del Programa de Conservación de Carreteras Federales se rehabilitaron varios tramos de carreteras usando cemento asfáltico modificado con caucho de neumáticos.

#### 3.18.1 CARRETERA MÉXICO – TOLUCA, TRAMO CUAJIMALPA – SAN MATEO

Se rehabilitó la carretera México – Toluca, tramo Cuajimalpa – San Mateo, entre los kms. 22+000 y 51+650, mediante la colocación de una carpeta de riego utilizando cemento asfáltico AC-20 modificado con caucho de neumáticos.

La carretera es considerada como una de las principales del país. Su geometría corresponde a la de un camino tipo "A", con dos carriles de circulación por sentido del km. 22+000 al km. 34+100 aproximadamente con un ancho promedio de 10.50 m. y cuatro carriles de circulación por sentido con acotamiento el resto del tramo, con un promedio de 18.50 m. La topografía del lugar es de montañosa a lomerío fuerte con algunas zonas planas al final del tramo.

El pavimento de la citada carretera presenta depresiones por roderas, calaveras y zonas con agrietamiento de tipo de piel de cocodrilo y mapa, estos defectos producidos por reflexión de la carpeta.

El tránsito diario promedio anual (TDPA) del tramo es de 44,754 y la tasa de crecimiento (I%) es de 3.92% anual.

Los trabajos de rehabilitación consistieron en bacheo profundo y superficial en las zonas inestables de la superficie de rodamiento existente, renivelaciones aisladas en las zonas que presentan deformaciones y/o asentamientos con concreto asfáltico y colocación de una carpeta de riego (riego de liga).

Algunos meses después a la conclusión de los trabajos, se observaron algunos desprendimientos del sello aplicado en zonas aisladas, particularmente en el carril de baja velocidad, en áreas donde se tienen pendientes ascendentes muy fuertes y zonas de curvas. Esto es debido a la dureza del asfalto utilizado, ya que algunos resultados de laboratorio indicaron que se trataba de un asfalto de mayor dureza, además algunas deficiencias en las temperaturas de tendido, las cuales combinadas con un mezclado poco uniforme del asfalto ahulado y el

exceso de cargas ocasionaron que se presentaran estos desprendimientos de manera prematura.

### 3.18.2 CARRETERA SAN SALVADOR EL SECO – AZUMBILLA, TRAMO SAN SALVADOR EL SECO – LA ESPERANZA

La carretera San Salvador El Seco – Azumbilla, tramo San Salvador El Seco – La Esperanza, en el estado de Puebla, entre los kms. 40+000 y 74+000, se desarrolla sobre un terreno que va de un lomerío suave a plano, su geometría corresponde a la de un camino tipo “A”, con dos carriles de circulación sin acotamiento, con anchos de calzada de 10.0 m. del km. 0+000 al km. 50+000 y de 7.20 m. del km. 50+000 al km. 74+000.

El pavimento presenta calavereo moderado, agrietamiento de moderados a severos, grietas tipo mapa, así como roderas de moderadas a ligeras.

El tránsito promedio anual del tramo es de 2,930 veh. Y la tasa de crecimiento es de 3.6% anual.

Los trabajos realizados consistieron en bacheo profundo y superficial en las zonas inestables de la superficie de rodamiento, renivelaciones aisladas en las zonas en las que se presentaban deformaciones y/o asentamientos con concreto asfáltico y colocación de un riego de liga.

Después de algunos meses de operación del tramo, se observa que los trabajos realizados han tenido un muy buen comportamiento, presentándose una superficie muy rugosa y con el material pétreo fuertemente anclado, no se ha presentado reflexión de grietas.

### 3.18.3 CARRETERA STA. BÁRBARA – IZÚCAR DE MATAMOROS, TRAMO LIBRAMIENTO CUAUTLA

La carretera de Santa Bárbara – Izúcar de Matamoros, tramo Libramiento Cuautla, en el estado de Morelos, del km. 0+000 al km. 7+100, está constituido por dos carriles de circulación alojados en un solo cuerpo con un ancho promedio de 8.0 m. incluyendo acotamientos, se desarrolla sobre un terreno que va de plano a lomerío suave, con curvas horizontales abiertas y tangentes largas, existen algunos cortes pequeños y no hay terraplenes.

El pavimento que se va a rehabilitar presenta calavereo moderado, agrietamiento de moderado a severo en una zona aislada, grietas tipo piel de cocodrilo, así como roderas ligeras.

El tránsito promedio anual del tramo es de 16,610 veh. Y la tasa de crecimiento es de 3.5% anual.

Los trabajos realizados consistieron en renivelaciones aisladas en las zonas que se presentan deformaciones y/o asentamientos con concreto asfáltico y colocación de un riego de liga.

Después de algunos meses de operación del tramo, se observa que los trabajos realizados han tenido un muy buen comportamiento, presentándose una superficie rugosa y con el material pétreo fuertemente anclado, no se han presentado desgranamientos o reflexión de grietas.

## **IV. ESTADO DEL ARTE SOBRE LAS TECNOLOGÍAS DEL CONCRETO ASFÁLTICO CON AGREGADOS DE HULE**

### **4.1 ANTECEDENTES**

La investigación para mejorar y reforzar el funcionamiento del concreto asfáltico por la adición de caucho natural a un cementante de concreto asfáltico ha continuado en todo el mundo por más de un siglo. El objetivo de la investigación de la adición de caucho al cementante asfáltico, era desarrollar una dosificación para mejorar las características físicas del concreto asfáltico mejorando la elasticidad. Los resultados de varios proyectos de demostración usando asfalto ahulado indican incremento en la resistencia a la fatiga, retraso de agrietamiento reflexivo, resistencia al patinaje mejorado, y aumento de durabilidad. Sin embargo, el interés actual en el asfalto ahulado ha sido elevado por su potencial como una opción de reciclamiento para los neumáticos usados.

Este proceso de calentamiento y reaccionamiento del desperdicio de caucho con cemento asfáltico ha continuado su desarrollo. El éxito de colocaciones de bacheo inicial usando el asfalto ahulado llevó a su uso como una "membrana absorbente de tensión" (SAM). La investigación continuó y desarrollo una

“membrana absorbente de tensión de intercapa” (SAMI). En estos procesos, el desperdicio de caucho se agregó al cementante asfáltico, calentado y actuado recíprocamente, para formar un cementante ahulado. En un esfuerzo por normalizar una descripción de las tecnologías de asfalto ahulado, este proceso está ahora referido como el “Sistema Húmedo”.

Una diferente tecnología de asfalto ahulado también se desarrolló. En este proceso, el diseño requirió una única graduación del agregado mineral. Esta única graduación fue requerida para permitir un intervalo en la curva de la graduación del agregado. Este intervalo, en el rango  $\frac{1}{4}$ ” de tamaño del tamiz No. 10, sería llenado por la adición del desperdicio de caucho tosco. La mayoría del desperdicio de caucho es más grande que el tamaño del tamiz No. 10. La adición del desperdicio de caucho está en el amasadero con el agregado caliente antes de la adición del cemento asfáltico. El desperdicio de caucho se agrega como un componente separado a la dosificación, y por consiguiente referido como el “Sistema Seco”.

La comunidad ingenieril ha reconocido un funcionamiento mejorado al usar el desperdicio de caucho en dosificaciones de concreto asfáltico. También, la adición del desperdicio de caucho del neumático reciclado entero es una opción de reciclamiento al problema de disposición del neumático usado.

#### 4.2 LEY DE TRANSPORTE SUPERFICIAL INTERMODAL (ISTEA). UN PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN NACIONAL

Como los Estados Unidos tratan con el creciente problema de eliminación de la chatarra de neumático, es un asunto que requirió coordinación y dedicación por parte de todos los equipos que están alrededor.

La Sección 1038 de la Ley de Transporte Superficial Intermodal (ISTEA)<sup>26</sup> de 1991 de la Secretaría de Transporte y la Administración de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) requirieron coordinar y dirigir, en cooperación con agencias de la carretera estatal, los estudios apropiados para proporcionar respuestas a los asuntos levantados en la ley.

La Administración de la Carretera Federal (FHWA) estudió el titulado “El Uso de Materiales Reciclados en la Construcción de la Carretera”. Los objetivos globales son evaluar la tecnología de CRM, como relacionar al diseño, construcción, reciclamiento, y funcionamiento de los pavimentos de concreto asfáltico.

En la Valoración de la Salud/Medio Ambiente no hay ninguna evidencia convincente que el uso del pavimento asfáltico que contiene substancialmente caucho reciclado aumenta la amenaza a la salud humana o al medio ambiente como se comparó con las amenazas asociadas con pavimentos asfálticos convencionales. La FHWA participó en un acuerdo con el Instituto Nacional para la Seguridad Profesional y de Salud (NIOSH) para dirigir los estudios de

---

<sup>26</sup> Congressional Record, Conference Report on HR 2950, ISTEA of 1991, (1991).

riesgo de trabajo de pavimentación del asfalto en ambas dosificaciones de desperdicio de caucho modificado y asfalto convencional.

Para el Diseño del Pavimento se desarrollará un procedimiento de diseño estructural para las tecnologías húmeda y seca de CRM. Incluirá aplicaciones de granulometrías semiabierta, abierta y cerrada para el uso con nuevos materiales de pavimentación. También se identificarán modelos de predicción de funcionamiento.

El propósito de las Evaluaciones de Laboratorio es desarrollar procedimientos de diseño de mezclas y pautas, también desarrollar parámetros de materiales para la entrada en modelos de predicción de funcionamiento. Además, se resolverán atenuantes del cementante y asuntos de la dosificación relacionados con el uso de CRM en pavimentos asfálticos.

La Prueba de Pavimento Acelerado se desarrollará para generar respuesta adicional y datos de funcionamiento para complementar los objetivos del proyecto.

Los Principios de la Construcción para los pavimentos de CRM se desarrollará para usarse por la industria de pavimentación. Los principios incluirán una descripción detallada de los procesos húmedo y seco, tecnologías, especificaciones de materiales, equipo de construcción típico y procedimientos de producción, y una descripción de los procedimientos de prueba de control de calidad.

El Funcionamiento de la Supervisión es evaluar los pavimentos de CRM comparados con secciones de control encima de un rango climático y condiciones de tráfico de carga. Específicamente un mínimo de 15 sitios se

seleccionarán y evaluarán/supervisarán para la duración del proyecto. Este esfuerzo proporcionará información sobre el funcionamiento relativo de varias tecnologías de CRM.

#### 4.3 CALTRANS – REHABILITACIÓN DE PAVIMENTO USANDO CONCRETO ASFÁLTICO AHULADO

El Departamento de Transporte de California (CALTRANS) ha estado usando concreto asfáltico de caucho modificado o concreto asfáltico ahulado (RAC) durante más de 23 años. El primer proyecto usando RAC se construyó en 1978 y desde entonces Caltrans ha tenido experiencia considerable con RAC.

En general, el programa de rehabilitación de Caltrans ha resultado bastante exitoso. Sin embargo, en las regiones de nieve donde se usan cadenas antideslizantes, la vida del proyecto no se logra usando concreto asfáltico convencional de granulometría cerrada (DGAC), resultando costos de mantenimiento muy elevados. En 1978, en su búsqueda para encontrar una mezcla más durable para el uso de la región de nieve, se empezó a experimentar con mezclas de RAC. Después la investigación del laboratorio indicó que esas mezclas eran más resistentes a la abrasión cuando se comparó con DGAC convencional. Las pruebas de permeabilidad mostraron que tenían permeabilidades sumamente bajas, que podrían reducir la infiltración de agua y por consiguiente reduciría el daño de congelación y deshielo. Las permeabilidades bajas también deben reducir la oxidación y por lo tanto bajar la proporción de envejecimiento.

En los proyectos de RAC construidos por Caltrans antes de 1983, el RAC fue comparado para igualar espesores de DGAC convencional. Sin embargo, en ese año un proyecto fue construido usando varias cubiertas que incluyeron tres secciones de prueba de espesor reducido por RAC y también varios espesores de DGAC convencional. Después de 1983 se continuó construyendo y comparando espesores iguales de RAC y DGAC convencional, mientras se revisaban y acumulaban datos de la cubierta, cuando se compararon entre ambas, las cubiertas de RAC proporcionaron una vida de servicio más larga a un costo reducido.

Proyectos que utilizan espesores reducidos continuaron hasta 1992, año en que Caltrans presentó una propuesta a la Administración Federal de Carretera (FHWA) para que se permitiera el uso de cubiertas de espesor reducido de RAC como una estrategia aceptable en proyectos de rehabilitación federalmente consolidados.

Caltrans ha usado mezclas de RAC en muchas partes del estado de California en Estados Unidos y en regiones de diferente clima. Muchos de los proyectos fueron puestos para resolver problemas específicos como la resistencia a la abrasión, la colocación nocturna de concreto asfáltico de granulometría abierta (OGAC), cubiertas delgadas flexibles de puentes, y la rehabilitación de pavimento flexible (AC) del desierto. Se han usado mezclas de RAC en cubiertas de puentes, estacionamientos, y apoyos de borde del camino. A lo largo de los años las mezclas de RAC han proporcionado funcionamiento-costeo efectivo en todas las regiones del estado.

#### 4.4 FLORIDA – USANDO MASA DE CAUCHO DE NEUMÁTICO EN DOSIFICACIONES DE CONCRETO ASFÁLTICO

Las disposiciones de la Sección 336.044 de los estatutos de Florida creados por la Ley Parlamentaria del Senado 1192 en 1988 dirigido al Departamento de Transporte de Florida (FDOT) para incrementar, donde es factible, el uso de materiales de recuperación (desperdicios) para la construcción de carreteras. Específicamente, la investigación se dirigió para determinar como la masa de caucho de neumáticos (GTR) podría ser usado en calidades de dosificaciones de concreto asfáltico.

La investigación conducida por el FDOT fue para evaluar el asfalto ahulado como una intercapa de absorción de esfuerzo y un cementante para la construcción de una capa de sello. Como resultado de este proyecto, el FDOT ha permitido el uso del GTR en tratamientos superficiales, la construcción de intercapas, algunos selladores de junta, y en rellenos de cruce de ferrocarril.

Las dosificaciones del FDOT para la demostración del proyecto fueron limitadas a dosificaciones de capa de fricción de granulometría cerrada (FC-1 y FC-4) y abierta (FC-2). El volumen óptimo de caucho para las dosificaciones de capa de fricción de granulometría cerrada ha sido identificado como el 5% (por peso de cemento asfáltico) usando un máximo nominal de masa de caucho de la malla No. 80. El caucho proporciona mejorar la elasticidad al cementante y por lo tanto estas dosificaciones tienen mayor resiliencia en recuperación de las deformaciones altas. Para las dosificaciones de capa de fricción de granulometría abierta el volumen optimo de caucho se determino ser el 12%

(por peso de cemento asfáltico) usando un máximo nominal de masa de caucho de la malla No. 40. En estas dosificaciones, el caucho ha permitido un incremento significativo en el total del volumen del cementante, el cual mejora la durabilidad. Este mejoramiento se relaciona a la edad reducida del endurecimiento debido a los antioxidantes en el caucho y el aumento del espesor de la capa, y mejora la retención del agregado debido al incremento de los espesores de la capa y mayor resiliencia del cementante.

#### 4.5 CAROLINA DEL SUR – UTILIZACIÓN DE DESPERDICIO DE CAUCHO EN DOSIFICACIONES DE CONCRETO ASFÁLTICO

La legislatura de Carolina del Sur pasó a ser la Ley de Política de Desecho Sólido y de Dirección de SC de 1991 del Departamento de Transporte de Carolina del Sur (SC DOT) para investigar el uso de ciertos productos de desechos (neumáticos) en varios aspectos de la construcción de carreteras.

Los objetivos mayores de este estudio de investigación fueron para desarrollar procedimientos de prueba, especificaciones, y métodos de construcción para mezclas de asfalto ahulado; monitorear las secciones de prueba de campo; y recomendar los próximos pasos para ser tomados por la SC DOT.

El DOT ha probado el uso de desperdicio de caucho en varias áreas del estado, usando varios contratistas y varios procesos de mezclado para determinar las viabilidades económicas e ingenieriles de estos materiales. Se trajeron expertos

en cada proyecto para proporcionar ayuda con los aspectos técnicos de la producción.

Sería prematuro juzgar a largo tiempo el funcionamiento ingenieril de las características de todas las dosificaciones utilizadas. Sin embargo, en el proyecto donde se utilizó mezcla PlusRide ha mostrado algún nivel de deterioro en los 8 años desde que fue pavimentado. Es duro determinar si esto es una función de la propia mezcla, la producción o las técnicas de colocación. Los otros proyectos donde se utilizaron procesos húmedos de asfalto ahulado parecen estar en condiciones satisfactorias.

#### 4.6 BARRERAS MAYORES PARA EL USO DEL ASFALTO AHULADO

Hay varias barreras para el uso de ambos sistemas húmedo y seco del asfalto ahulado, incluso el uso de equipo especializado, las graduaciones únicas del agregado, el diseño de la mezcla especializada, la falta de criterio de diseño normal, el costo del desperdicio del caucho, y el uso de procesos patentados.

En ambos sistemas estas barreras combinadas causan la barrera mayor para el uso del asfalto ahulado: el alto costo del asfalto cuando comparada con el costo de usar concreto asfáltico convencional.

Aunque el alto costo es para ambos sistemas, los factores que lo causan son diferentes en ambos.

Para el sistema húmedo el cementante engomado debe usarse dentro de las horas de su producción, por consiguiente el costo alto de movilizar el equipo especializado (unidad mezcladora, unidad de calibración, tanques de almacenamiento, etc.) en la facilidad de la producción debe recuperarse en el costo por tonelada de cementante engomado.

Para el sistema seco los aumentos del costo son atribuidos a la única graduación del agregado, la incorporación del desperdicio de caucho a las plantas de asfalto, los requisitos de diseño del contenido de la arena.

#### 4.7 ADELANTOS EN LA TECNOLOGÍA DEL CEMENTANTE DEL ASFALTO AHULADO (PROCESO HÚMEDO)

La incorporación de desperdicio de caucho en un cementante de cemento asfáltico se ha investigado en Europa desde los años sesentas. En Francia, la incorporación y reacción de partículas de desperdicio de caucho de tamaños particulares en el cementante del asfalto se comenzó en 1981 por la Compañía Beugnet. Este cementante asfáltico ahulado se comercializa en Estados Unidos bajo el nombre comercial Flexo Chape.

#### 4.7.1 MÉTODO DE INCORPORACIÓN DE LA MASA DE CAUCHO EN EL CEMENTO ASFÁLTICO (PROCESO HÚMEDO)

Las investigaciones sugieren que manteniendo la proporción apropiada del asfalto para el trozo de caucho puede lograrse eficazmente en el momento que los ingredientes se cargan en el equipo de mezclado. El volumen de mezcla de asfalto-aceite extendedor cargados en el tanque de mezclado es medido por un medidor totalizador de asfalto. Se descubrió que los procesos de la reacción pudieran ser mejorados incorporando un catalizador en la mezcla.

El asfalto se calienta para desear la temperatura de mezclado. El peso del caucho se agrega en la unidad de mezclado del proceso húmedo a través de un sistema de alimentación de caucho granulado capaz de proporcionar el asfalto al sistema de alimentación y no interrumpiendo la continuidad del proceso de mezclado. Una vez que todo el caucho ha sido mezclado y alimentado en el mezclador y tanque de almacenamiento, el tiempo de reacción empieza.

La recirculación es proporcionada para asegurar el mezclado apropiado y dispersión de todos los componentes. El calor suficiente es distribuido al tanque de almacenamiento para mantener la temperatura de la mezcla entre 190 °C y 218 °C (recomendado para los volúmenes altos de caucho) para un período entre 45 y 60 minutos mientras la reacción ocurre. La viscosidad de la mezcla se supervisa periódicamente.

La reacción del caucho con el cemento asfáltico, crea un cementante de asfalto ahulado, y exhibe algunas propiedades mejoradas:

- Viscosidad alta (8 poises a 200 °C).
- Punto de reblandecimiento mayor que 60 °C.
- Elasticidad y resiliencia alta a temperaturas bajas.
- Coherencia 10 veces mayor para el asfalto a 20 °C.

Las mejoras que se presentan en el cementante después de incorporar el catalizador a la mezcla son:

- Mayor estabilidad de la viscosidad.
- Aumento en la temperatura del punto de reblandecimiento (tanto como 15% a 20% dependiendo de la cantidad del catalizador). Esto sugiere que el cementante permanezca menos sensible a la temperatura.
- La preservación más larga de las propiedades elásticas originales del cementante.
- Mejor adherencia.

Para lograr el mezclado idóneo se requieren equipos especiales:

- Un tanque de calentamiento de asfalto con un aceite caliente o un sistema de calentamiento capaz de mantener la mezcla del asfalto ahulado a temperaturas entre 190 °C y 218 °C. El tanque debe ser capaz de recircular la mezcla de asfalto ahulado continuamente y necesitara una bomba de gran capacidad para circular la alta viscosidad de los materiales del asfalto ahulado.

- Una unidad de mezclado de asfalto ahulado que es capaz de producir una dosificación homogénea de asfalto-aceite extendedor y caucho granulado al radio especificado en el diseño de la dosificación. La unidad de mezclado tendrá una bomba de alimentación de cemento asfáltico y una bomba para la mezcla terminada del asfalto ahulado.
- Un sistema de suministro de asfalto ahulado equipado con una bomba de capacidad alta y dispositivo de dosificación capaz de agregar el cementante al porcentaje del agregado requerido.

#### 4.7.2 BARRERAS DE PRODUCCIÓN

Incluso con las propiedades mejoradas logradas agregando desperdicio de caucho al cementante del cemento asfáltico a temperaturas elevadas con un catalizador, el contratista se ha enfrentado a diferentes problemas.

Una desventaja mayor del uso del cementante asfáltico engomado era que tuvo que ser usado dentro de las horas de producción. Se emplearon unidades móviles para producir esa dosificación de asfalto ahulado al sitio de producción del proyecto. Todos los costos asociados con el transporte, montaje y traslado del equipo tuvo que ser recuperado en el costo unitario del tonelaje producido.

#### 4.7.3 BARRERAS TÉCNICAS

Las pruebas de viscosidad muestran que la viscosidad del cementante del asfalto ahulado a una temperatura de "digestión" de 200 °C alcanza su vértice después de 45 minutos; entonces permanece constante por 1 o 2 horas. Después, la viscosidad disminuye uniformemente y la calidad del cementante disminuye.

La temperatura del punto de reblandecimiento sigue la curva de viscosidad; cayéndose después de un cierto tiempo de la reacción, indicando que el cementante está degradándose. Por consiguiente, debe reconocerse que hay ciertas consideraciones prácticas en la producción del cementante del asfalto ahulado: (a) el cementante debe mezclarse en-sitio y (b) el cementante no debe usarse 6 horas más tarde después de mezclarse.

Como resultado, la producción de una dosificación de concreto asfáltico ahulado es limitada a la cantidad del cementante de asfalto ahulado que puede ser producida por el equipo móvil al sitio de la planta de asfalto.

#### 4.8 ADELANTOS EN LA TECNOLOGÍA DE CONCRETO ASFÁLTICO DE CAUCHO MODIFICADO (SISTEMA SECO)

La adición de desperdicio de caucho para reemplazar algún agregado mineral en las dosificaciones del concreto asfáltico se desarrolló en Europa aproximadamente al mismo tiempo que el proceso del cementante del asfalto ahulado estaba ganando notoriedad en los Estado Unidos. El sistema de adición de desperdicio de caucho directamente a la dosificación, es llamado como el Sistema Seco del concreto asfáltico de caucho modificado. Este sistema desarrollado en Suecia, estaba patentado en Estados Unidos y comercializado bajo el nombre de PlusRide.

##### 4.8.1 BARRERAS DE LA PRODUCCIÓN DEL PLUSRIDE

En el PlusRide el sistema del concreto asfáltico de caucho-modificado, los componentes mayores que aumentan el costo son los siguientes:

- Trituración especializada del agregado para obtener la única graduación del agregado de granulometría semiabierta.
- Alto volumen del agregado de relleno (8 a 12%).
- Aumento en el volumen óptimo del cemento asfáltico (7.5 a 9.5%).

- Aumento en la temperatura de mezclado (149 °C a 177 °C por remoción de temperatura).
- La cuota de la licencia por usar el proceso patentado.

#### 4.8.2 BARRERAS TÉCNICAS DEL PLUSRIDE

Las barreras técnicas encontradas con el uso del sistema de PlusRide son una combinación de una falta de criterio del diseño y métodos de prueba no convencionales.

#### 4.8.3 SISTEMA TAK DEL CONCRETO ASFÁLTICO DE CAUCHO MODIFICADO

Un sistema de asfalto ahulado se desarrolló en 1986 por H. Barry Takallou<sup>27</sup>, llamado el Sistema TAK. Este sistema relaciona un proceso para producir una composición de concreto asfáltico compuesto de un desperdicio de caucho tosco, de caucho fino, cementante asfáltico, y el agregado mineral. Un catalizador para mejorar la reacción entre el desperdicio de caucho fino y el cementante asfáltico, y agentes de antiseparación que pueden agregarse como

---

<sup>27</sup> H. B. Takallou, Evaluation of Mix Ingredients on the Performance of Rubber-Modified Asphalt Mixtures, Oregon State University, (1987).

determinado por cemento asfáltico y pruebas de compatibilidad del desperdicio de caucho.

Este sistema es caracterizado por los varios componentes del cementante asfáltico y desperdicio de caucho fino, mezclado íntimamente por una reacción física. Esto producirá un cementante de viscosidad más alto en el que la reacción óptima se logra cuando las partículas finas de desperdicio de caucho alcanzan un dilatamiento óptimo. Una pre-reacción o pre-tratamiento del desperdicio de caucho con un catalizador puede ser necesario para lograr el dilatamiento óptimo de la partícula de desperdicio de caucho. El desperdicio de caucho tosco se agregará como parte de la composición para actuar como un agregado elástico, para mejorar las propiedades elásticas del pavimento de concreto asfáltico, y para reducir susceptibilidad de temperatura.

El objetivo para este sistema es remediar los inconvenientes encontrados en otros sistemas. Estos incluyen el uso de equipo de mezclado especializado, graduaciones del agregado mineral especializadas, y criterio del diseño especializado. El sistema TAK combina desperdicio de caucho tosco y fino para producir un cementante que tiene calidad de cementante de asfalto ahulado, y proporciona propiedades elásticas superiores para el pavimento. No hay necesidad por el equipo especializado. El agregado mineral es constante mientras la graduación del desperdicio de caucho es inconstante en la composición. El tamaño del desperdicio de caucho debe ser menor que el tamaño del tamiz No. 10.

El volumen del caucho en la composición no debe exceder 2% para la relación alta o baja de vacíos de la capa de rodadura, y 3% para la capa del cementante, por peso total de la dosificación.

El uso de este sistema está en el dominio público; por consiguiente, no hay cuota de la licencia exigida para usarlo.

Se construyeron dos proyectos de demostración usando el Sistema TAK del concreto asfáltico de caucho modificado. Estos proyectos de demostración fueron ejecutados en un esfuerzo para evaluar su facilidad de construcción y funcionamiento, y para supervisar emisiones aéreas durante la producción y operaciones de pavimentación.

Se construyeron en regiones separadas. En un proyecto, la dosificación se produjo en una planta de tambor de tipo-secador y en el otro proyecto se usó una planta de carga. El material de la mezcla caliente de caucho modificado se colocó con una máquina de pavimentación normal y compactó y aplano con equipo normal. Los resultados preliminares muestran las secciones de control convencionales y el laboratorio de prueba indica funcionamiento superior esperado con el concreto asfáltico del caucho modificado.

La prueba de emisión de aire se realizó para los dos concretos asfálticos. Los resultados de la prueba, de las muestras tomadas al tubo vertical de evacuación en la producción de las dosificaciones y de los dispositivos de control de aire personal desgastados por el personal de pavimentación, indica que las emisiones del sistema TAK son casi idénticas a aquellas del concreto asfáltico convencional.

Estos proyectos también se dirigieron al reciclaje del concreto asfáltico de caucho modificado, y la prueba de emisión del tubo vertical de evacuación fue realizada cuando el pavimento asfáltico ahulado reciclado fue introducido para

producir una dosificación de concreto asfáltico de caucho reciclado. El material del concreto asfáltico de caucho modificado demostró ser reciclable.

#### 4.9 EL EFECTO DE LA MASA DE CAUCHO DE NEUMÁTICO EN LA PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO (PARA CONTROL DE CALIDAD)

En la prueba de extracción de asfalto, el asfalto está separado del agregado mineral disolviendo el asfalto en un disolvente (tricloroetano). Todos menos una cantidad muy pequeña de asfalto atrapada en los más profundos poros del agregado puede disolverse y determinarse el volumen del asfalto. Cuando el caucho granulado se agrega al asfalto, varias cosas pasan que complican el análisis de resultados de la prueba de extracción. Primero, el caucho no se disuelve en el asfalto sino que reacciona con el asfalto absorbiendo aceites del asfalto y dilatándose. Por consiguiente, cuando se extrajo, la mayoría de las partículas sólidas de caucho son separadas afuera con el agregado y no con el asfalto. En segundo lugar, cuando el cementante del asfalto ahulado se sumerge en el tricloroetano, una porción del aceite en el trozo del caucho se extrae junto con el asfalto en el disolvente. Por consiguiente, la cantidad de líquido que es disuelto por el disolvente incluye parte de asfalto y parte de aceite del trozo de caucho.

Deben hacerse las modificaciones siguientes a la prueba de extracción de asfalto para determinar los porcentajes de asfalto y trozo de caucho es una muestra de HMA que contiene asfalto-ahulado. Deben hacerse dos correcciones: una para la pérdida de finos a través del filtro del extractor

centrifugado y la segunda para el aceite de caucho disuelto por el disolvente de extracción.

Determinar el aceite de caucho disuelto 1, 1, 1, en tricloroetano. Llevar a cabo la prueba de extracción de la misma manera como si se estuviera procesando HMA. Separar las partículas de caucho del agregado usando cualquiera de los procedimientos. Calcular la pérdida, que es una combinación de la pérdida de aceite de caucho y la del caucho fino a través del relleno del extractor. Repetir este procedimiento un número suficiente de tiempos para generar una figura de pérdida exacta.

Determinar el promedio de pérdida de finos. El Dr. M. Takallou sugiere que esta pérdida sea determinada usando las muestras de HMA preparadas usando la misma fórmula de mezcla de trabajo excepto que el asfalto y no asfalto ahulado es usado como el cementante. Cinco pruebas de extracción separadas se sugiere para determinar la pérdida de finos del agregado mineral.

La diferencia entre las pérdidas calculas (1, 2) representa la pérdida combinada de finos sólidos de caucho y la pérdida de aceites de caucho.

Otra prevención debe mencionarse y esta relaciona al efecto de acumulación de finos en el filtro. La cantidad de finos que atraviesan el filtro depende de las características de la granulometría de los finos del agregado. Sería aconsejable determinar como esta pérdida cambia en cada proyecto como se hace con el procedimiento de extracción de vacío para el factor de retención.

Se sugieren dos métodos alternativos para separar las partículas de caucho de los agregados minerales. El método 1 involucra la separación por flotación de las partículas de caucho fuera del agregado mineral usando una disolución de bromuro de sodio (NaBr). El método 2 involucra la incineración del caucho

contenido en el agregado en un horno de mufla a 600 °C. Pero se sugiere un procedimiento alternativo que empieza con la incineración por calentamiento encima de un mechero Bunsen hasta que la llama baja y después la incineración en un horno de mufla a 1100 °C durante 30 minutos. Se nota que con caliza sería necesario recarbonatar con carbonato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ . Este método normalmente puede completarse dentro de una hora y puede sugerirse que las cuatro horas requeridas en el procedimiento de incineración pueda ser excesivo para una producción de laboratorio.

## V. CONCLUSIONES

1. Se puede utilizar alternativamente masa de caucho obtenida del sistema ambiental porque produce una partícula con superficie similar a una esponja, que tiene un área de superficie de contacto mayor que aumenta la contribución de reacción con el cementante de asfalto caliente. En cambio la masa obtenida criogénicamente produce partículas de superficie llana y limpia, dándonos una recuperación elástica baja comparada con la de la masa de caucho ambiental.
2. La cantidad de CRM y las propiedades del cemento asfáltico tienen una influencia importante en las condiciones de aplicación, mezclado, tendido y compactación del concreto asfáltico adicionado de productos de caucho, afectando la consolidación de la mezcla del asfalto ahulado.
3. La adición de CRM afecta significativamente las propiedades del cementante, experimentando cambios de acuerdo a las temperaturas alta y baja de mezclado.
4. La combinación de cemento asfáltico y caucho aumenta significativamente la viscosidad, lo cual indica que la reacción del caucho con el cemento asfáltico no es favorable y puede ser evitada agregando un aditivo (aceite extendedor).

5. La adición de caucho a temperaturas altas aumenta la resistencia al zurcamiento.
6. La resistencia contra la rotura a la fatiga se mejora, con la adición de caucho pero teniendo cuidado de realizar las mezclas bajando un poco la temperatura.
7. El cementante se torna frágil o quebradizo a temperaturas muy bajas llevándolo a la ruptura, para evitarlo se puede modificar el límite máximo de deslizamiento, aumentando la concentración de caucho dándole flexibilidad al concreto asfáltico.
8. Las propiedades modificadas del cementante del concreto asfáltico ahulado aumentan la resistencia al envejecimiento y tienen mejor desempeño en su punto de reblandecimiento y resiliencia.
9. Generalmente para la HMA (mezcla caliente) del concreto asfáltico ahulado, el flujo Marshall aumentará, la estabilidad Marshall probablemente disminuirá, el VMA (contenido de aire incluido) necesitará ser aumentado ligeramente, y el volumen del cementante aumentará consecuentemente.
10. La adición de caucho granulado a la HMA proporciona beneficios adicionales a su funcionamiento como el aumento en la vida de fatiga y reducciones en la deformación permanente.
11. Por lo que respecta a la condición de los trabajos, el proceso constructivo requiere de un estricto control de calidad, desde los materiales a utilizar, la elaboración del asfalto ahulado, tendido de la carpeta hasta la apertura al

tránsito, ya que cualquier falla ocasionaría que no se obtengan los resultados esperados.

12. Referente a los costos, la experiencia indica que estos trabajos incrementan el costo inicial de inversión, aunque la prolongación de la vida útil, al final lo justifica.

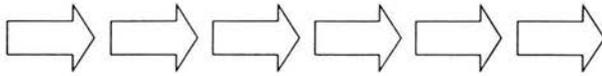
## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Amirkhanian, Serji N.,  
"Utilization of Crumb Rubber in Asphaltic Concrete Mixtures – South Carolina's Experience",  
South Carolina Department of Transportation, 2001.
- Cano, Joe, (Traducción: Pérez Medrano, Héctor),  
"Sistemas de Asfalto Ahulado en Rehabilitación de Carreteras".  
XIV Reunión Nacional de Vías Terrestres, 2002.
- Carlson, Douglas D., and Han Zhu,  
"Asphalt-Rubber. An Anchor to Crumb Rubber Markets",  
Veracruz, Méx., 1999.  
[www.rubberpavements.org](http://www.rubberpavements.org)
- Capistran Fernández, Juan Carlos,  
"Experiencia en la Aplicación de Carpetas Asfálticas con Hule Reciclado de Llantas",  
XIV Reunión Nacional de Vías Terrestres, 2002.
- Juárez Campos, Antonio, (Hidroasfalto JC),  
"Pavimentos Modificados",  
XIV Reunión Nacional de Vías Terrestres, 2002.
- Mora Venegas, Carlos,  
"El Hule de Llantas en Pavimentos",  
XIV Reunión Nacional de Vías Terrestres, 2002.
- Roberts, Freddy L., Kandhal, Prithvi S., Brown, E. Ray, and Dunning, Robert L.,  
"Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt",  
National Center for Asphalt Technology, Report No. 89-3, 1989.

- Tlaxler, Ralph N.,  
*El Asfalto. Su composición, propiedades y usos*,  
Compañía Editorial Continental, S. A., 1962.
- Van Kirk, Jack L.,  
"Caltrans Pavement Rehabilitation Using Rubberized Asphalt Concrete",  
California, 1997.  
[www.rubberpavements.org](http://www.rubberpavements.org)
- Transportation Congress: Civil Engineers,  
*Key to the World's Infrastructure*,  
Volumen I, II.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte,  
*Normatividad para la Infraestructura del Transporte (Normatividad SCT)*,  
Anexo 6, N/CMT/4/05/002/01,  
CMT. Características de los Materiales; 4. Materiales para Pavimentos; 05.  
Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas; 002. Calidad de Materiales  
Asfálticos Modificados.
- *Recycled Tire Rubber in Asphalt Pavements*,  
Transportation Research, Record No. 1339,  
Transportation Research Board.
- *Revista Ingeniería Civil* No. 348, abril 1998,  
"Construcciones de Carpetas Drenantes Ahuladas", p.p. 7-11,  
"Hule Molido para Fabricar Asfaltos Ahulados", p.p. 25-37.
- *Revista Obras*, marzo 2000,  
"Vida de Hule", p.p. 51-55.
- [www.allstatesasphalt.com](http://www.allstatesasphalt.com)  
Asphalt-Rubber.
- [www.bei-emulsiones.com/rubber](http://www.bei-emulsiones.com/rubber)  
Rubber Modified Asphalt Binders,  
Performance.

TECNOLOGÍA PARA EL RECICLADO DE LLANTAS DE DESECHO  
PROCESO AMBIENTAL  
"SISTEMA MECÁNICO"

LLANTAS DE AUTOMÓVIL



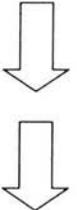
TRITURADOR  
REDUCE A PEDAZOS  
DE +/- 25 CM2



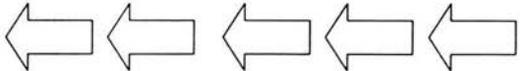
MÁQUINA PARA  
CORTE  
LONGITUDINAL



MÁQUINA SACA  
ACERO (SEPARA  
EL CINTURÓN)



LLANTAS DE CAMIÓN



SELECCIÓN DE GRANULOS POR TAMAÑO



PESADO Y EMBOLSADO



A RECICLADORES  
DE FIBRA

SEPARADOR DE  
ACERO



A RECICLADORES DE  
METAL

A USUARIOS DE HULE  
MOYUNO

TECNOLOGÍA PARA EL RECICLADO DE LLANTAS DE DESECHO  
"SISTEMA CRIOGÉNICO"

