

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y MANUFACTURERA



MODIFICACION DE ASFALTOS CON POLIMEROS

TESIS PARA OPTAR EL  
TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUIMICO

PRESENTADO POR  
WENDY LUISA HERENCIA PEÑA

LIMA - PERU  
2001

## **DEDICACION**

A MIS QUERIDOS PADRES: Luisa y José Herencia

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi especial agradecimiento a mi asesor, el Ing. Walter Zaldívar, por la confianza y el apoyo que me brindó en todo momento.

A la Universidad Nacional de Ingeniería por la rigurosidad y exigencia en mi formación profesional a lo largo de los cinco años de estudios.

A Petróleos del Perú, a la Refinería Conchán y al CAREC por el apoyo brindado para el desarrollo de esta tesis.

Asimismo, quiero hacer extensivo mi sincero agradecimiento a todas las personas que de una u otra manera me ayudaron en el desarrollo de este trabajo, especialmente quisiera mencionar a:

Leni Leite - CENPES - PETROBRAS

Luis Gutierrez - SHELL DE CHILE

Daniel Hamaoui - KRATON POLYMERS DO BRASIL

Jerry Vantrease - HEATEC

Richard Koole - SHELL GLOBAL SOLUTIONS

Victor León Choy - UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

José Estrada, PETROPERU - REFINERIA CONCHAN

Raymundo Ramírez, PETROPERU - REFINERIA CONCHAN

Alfredo Coronel, PETROPERU - REFINERIA CONCHAN

Ludwin Capcha, PETROPERU - REFINERIA CONCHAN

Y A TODO EL PERSONAL DEL LABORATORIO DE REFINERIA CONCHAN

## **MODIFICACION DE ASFALTOS CON POLIMEROS**

### **Resumen**

Existe una serie de problemas que hasta el día de hoy no ha podido superar el Asfalto Convencional, debido a las limitaciones de éste frente a condiciones adversas, y lo cual se ve reflejado en el deterioro prematuro y acelerado de los pavimentos.

Los continuos problemas de fisuramientos térmicos, agrietamientos, y deformaciones, entre otros, nos lleva a la búsqueda de un ligante bituminoso cuyas características por ejemplo, de baja susceptibilidad térmica, baja propensión al envejecimiento, mejor servicio a altas y bajas temperaturas, mejor adherencia con los agregados, principalmente, garanticen la vida útil del pavimento y la seguridad vial.

Es por ello que en la búsqueda de ligantes bituminosos de mejores cualidades físicas y químicas que los actuales asfaltos convencionales, fueron preparadas y evaluadas en laboratorio, un total de 27 formulaciones asfálticas modificadas utilizando 4 polímeros distintos: polietileno (PE), copolímero etil/vinil acetato (EVA), copolímero estireno/butadieno/estireno (SBS) y copolímero estireno/butadieno (SB).

Las condiciones de mezcla utilizadas en la preparación de cada formulación modificada, fueron específicas, teniendo en cuenta la naturaleza del polímero empleado.

Para la caracterización de los asfaltos modificados preparados en laboratorio se realizaron los ensayos especificados en las normas ASTM D 5841, ASTM D 5892, y ASTM D 5976. Adicionalmente a estos ensayos se realizaron para todas las formulaciones, las pruebas de Recuperación Elástica a diferentes temperaturas, Punto de Ablandamiento, Viscosidad Cinemática y Punto de Ruptura FRAASS, tanto en el ligante original como envejecido, a excepción del último ensayo. Por otro lado, a modo de evaluar la susceptibilidad térmica de las formulaciones modificadas fue calculado para cada una, el Índice de Penetración.

Los asfaltos modificados con PE, presentaron la mejor compatibilidad y estabilidad al almacenamiento de todas las formulaciones preparadas; asimismo la viscosidad de estos asfaltos fue ligeramente mayor que la de los asfaltos sin modificar. Sin embargo, la

resistencia al envejecimiento fue ligeramente superior y no se obtuvieron buenos resultados de recuperación elástica.

Los asfaltos modificados con EVA, presentaron mejor compatibilidad con el asfalto base PEN 120/150, sin embargo, la estabilidad al almacenamiento no fue positiva en ninguna de las formulaciones preparadas. La resistencia al envejecimiento fue ligeramente superior a los asfaltos sin modificar, por otro lado los valores de recuperación elástica fueron incrementados pese a ser un polímero plastómero, pero con resultados menores a los obtenidos con los copolímeros elastómeros SBS y SB. Respecto a la viscosidad, esta fue notoriamente alta.

Los asfaltos modificados con SBS, presentaron buena compatibilidad y estabilidad al almacenamiento, con 4 y 5% de polímero en la mezcla, alta resistencia al envejecimiento, altos valores de recuperación elástica y gran flexibilidad a bajas temperaturas, sin embargo, dichos asfaltos presentaron la más alta viscosidad.

Los asfaltos modificados con SB, sólo obtuvieron buen resultado en compatibilidad y estabilidad al almacenamiento con 5% de polímero, la resistencia al envejecimiento fue mejorada respecto al asfalto sin modificar, asimismo, obtuvieron altos valores de recuperación elástica pero en menor porcentaje que los asfaltos modificados con SBS.

Cada una de las formulaciones modificadas con polímero, dependiendo de sus propiedades finales, fueron clasificadas según las normas ASTM, como asfaltos modificados del TIPO I, TIPO III o TIPO IV.

En lo que respecta a la Producción de Asfaltos Modificados a nivel industrial, se presentó un Diseño General de Planta en base a la información proporcionada por empresas productoras de dichos asfaltos, y se desarrolló una Evaluación Económica a Nivel de Perfil, con lo cual se demostró que la elaboración de estos productos a nivel industrial resulta ser una alternativa técnica y económicamente viable.

## INDICE

	Páginas
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos del Estudio	2
Capítulo 2. Revisión Bibliográfica	3
2.1. Asfaltos Derivados del Petróleo	3
2.1.1. Breve Reseña Histórica	3
2.1.2. Definición	3
2.1.3. Clasificación	4
2.1.4. Procesos de Obtención	8
2.1.5. Caracterización de los Cementos Asfálticos Convencionales	10
2.1.5.1. Naturaleza Química	10
2.1.5.2. Funciones	14
2.1.5.3. Transiciones	14
2.1.5.4. Envejecimiento	15
2.1.6. Control de Calidad	16
2.1.7. Almacenaje y Transporte	17
2.1.8. Usos Típicos de los Asfaltos de Pavimentación	18
2.1.9. Problemas en los Pavimentos Actuales	19
2.1.9.1. Pavimentación en Zonas de Altura	21
2.1.9.2. Limitaciones del Asfalto	21
2.1.10. Especificaciones Técnicas de los Asfaltos para Pavimentación y su evolución	23
2.2. Los Polímeros	29
2.2.1. Definición de Polímeros	29
2.2.2. Características Básicas de los Polímeros	29
2.2.2.1. Estructura	29
2.2.2.2. Peso Molecular	30

2.2.2.3. Enlaces	30
2.2.2.4. Transiciones de Fase	31
2.2.2.5. Parámetros de Solubilidad	32
2.2.3. Polímeros Modificadores de Asfaltos	32
2.2.3.1. Polímeros Plastómeros	33
2.2.3.2. Polímeros Elastómeros	35
2.2.3.3. Cauchos Recuperados de Neumáticos	38
2.3. Modificación de Asfaltos por Incorporación de Polímeros	39
2.3.1. La incompatibilidad entre el Polímero y el Asfalto, principal problema en la búsqueda de la Formulación Ideal	40
2.3.1.1. Separación de Fases	40
2.3.1.2. Gelación	45
2.3.2. Preparación de Mezclas de Asfaltos con Polímeros	46
2.3.2.1. Preparación de Mezclas de Asfaltos con Polímeros Elastómeros	48
2.3.2.2. Preparación de Mezclas de Asfaltos con Polímeros Plastómeros	49
2.3.3. Parámetros que influyen en el Proceso de Modificación de Asfaltos	50
2.3.3.1. Naturaleza del Polímero	50
2.3.3.2. Forma Física del Polímero	50
2.3.3.3. Naturaleza y Grado del Asfalto	51
2.3.3.4. Tipos de Equipos	51
2.3.3.5. Tiempo/Temperatura de Mezclado	53
2.3.4. Estructura Morfológica de los Asfaltos Modificados con Polímeros	53
2.3.5. Envejecimiento de los Asfaltos Modificados con Polímeros	54
2.3.6. Especificaciones para Asfaltos Modificados con Polímeros	54
 Capítulo 3. Evaluación Experimental de la Modificación de Asfaltos con Polímeros	 71
3.1. Materiales y Métodos de Ensayo	71
3.1.1. Materias Primas Utilizadas	71
3.1.1.1. Cementos Asfálticos	71
3.1.1.2. Polímeros	72
3.1.2. Equipos	72
3.1.2.1. Equipo para Mezcla	72

3.1.2.2. Equipos para Caracterización	72
3.1.3. Métodos de Ensayo	73
3.1.3.1. Caracterización de Asfaltos Convencionales	73
3.1.3.2. Caracterización de Asfaltos Modificados	76
3.2. Modificación de los Asfaltos PEN 85/100 y PEN 120/150 con diferentes tipos de Polímeros	77
3.2.1. Caracterización de los Ligantes Asfálticos	77
3.2.2. Asfalto Modificado con Polímeros y Copolímeros Plastómeros	80
3.2.2.1. Especificaciones y Requisitos de los Asfaltos Modificados con Copolímeros Plastómeros	80
3.2.2.2. Asfalto Modificado con Polietileno (PE)	80
A. Condiciones de Mezcla	80
B. Resultados	82
C. Compatibilidad del PE y el Asfalto Base en las Formulaciones Asfálticas Modificadas	83
D. Efectos del PE en las Propiedades Físicas de los Ligantes Asfálticos Convencionales	84
E. Clasificación de los Asfaltos Modificados con PE según Norma ASTM D 5841	85
F. Discusión de Resultados	86
3.2.2.3. Asfalto Modificado con Copolímero Etil/Vinil Acetato (EVA)	87
A. Condiciones de Mezcla	87
B. Resultados	88
C. Compatibilidad del EVA y el Asfalto Base en las Formulaciones Asfálticas Modificadas	89
D. Efectos del EVA en las Propiedades Físicas de los Ligantes Asfálticos Convencionales	90
E. Clasificación de los Asfaltos Modificados con EVA según Norma ASTM D 5841	91
F. Discusión de Resultados	92
3.2.3. Asfalto Modificado con Copolímeros Elastómeros	93
3.2.3.1. Especificaciones y Requisitos de los Asfaltos Modificados con Copolímeros Elastómeros	93
3.2.3.2. Asfalto Modificado con Copolímero SBS	96



A. Condiciones de Mezcla	96
B. Resultados	97
C. Compatibilidad del SBS y el Asfalto Base en las Formulaciones Asfálticas Modificadas	98
D. Efectos del SBS en las Propiedades Físicas de los Ligantes Asfálticos Convencionales	99
E. Clasificación de los Asfaltos Modificados con SBS según Norma ASTM D 5976	100
F. Clasificación de los Asfaltos Modificados con SBS según Norma ASTM D 5892	101
G. Discusión de Resultados	102
3.2.3.3. Asfalto Modificado con Copolímero Estireno/Butadieno (SB)	103
A. Condiciones de Mezcla	103
B. Resultados	104
C. Compatibilidad del SB y el Asfalto Base en las Formulaciones Asfálticas Modificadas	105
D. Efectos del SB en las Propiedades Físicas de los Ligantes Asfálticos Convencionales	106
E. Clasificación de los Asfaltos Modificados con SB según Norma ASTM D 5976	107
F. Clasificación de los Asfaltos Modificados con SB según Norma ASTM D 5892	108
G. Discusión de Resultados	109
3.3. Modificación del Asfalto PEN 85/100 (Formulación: Crudo Puro) con Copolímero Estireno/Butadieno/Estireno (SBS)	110
3.3.1. Caracterización del Ligante Asfáltico	110
3.3.2. Asfalto Modificado con Copolímero SBS	112
A. Especificaciones y Requisitos de Calidad	112
B. Condiciones de Mezcla	112
C. Resultados	113
D. Compatibilidad del SBS y el Asfalto Base en las Formulaciones Asfálticas Modificadas	114
E. Efectos del SBS en las Propiedades Físicas de los Ligantes Asfálticos Convencionales	115

F. Clasificación de los Asfaltos Modificados con SBS según Norma ASTM D 5976	116
G. Clasificación de los Asfaltos Modificados con SBS según Norma ASTM D 5892	117
H. Discusión de Resultados	118
3.4. Análisis Comparativo de la Modificación del CAP 85100 (Formulación: Crudo Puro) Versus CAP 85/100 (Formulación: Crudo Mezcla)	119
 Capítulo 4. Evaluación Económica a Nivel de Perfil de la Modificación de Asfaltos con Polímeros	 122
4.1. Estudio de Mercado	122
4.2. Diseño General de una Planta de Producción de Asfaltos Modificados con el Copolímero SBS	125
4.2.1. Requerimientos Operativos	125
4.2.2. Equipos	127
4.2.3. Descripción del Proceso de Producción de Asfalto Modificado	127
4.3. Evaluación Económica de la Producción de Asfaltos Modificados	130
4.3.1. Inversión Económica	130
4.3.2. Costos Operativos	131
4.3.3. Precio de Venta del Asfalto Modificado	133
4.3.4. Análisis de Rentabilidad del Sistema de Producción de Asfalto Modificado	137
4.3.4.1. Flujo Neto de Fondos	137
4.3.4.2. Indicadores de Rentabilidad	140
A. Valor Actual Neto (VAN)	140
B. Tasa de Retorno de la Inversión (TIR)	141
C. Tiempo de Recuperación de la Inversión (PAYOUT)	141
 Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	 142
5.1. Conclusiones	142
5.2. Recomendaciones	148
Bibliografía	150
Anexo	159

## Cuadros

	Páginas	
CUADRO 1	Uso de cementos asfálticos graduados por penetración en función del clima	19
CUADRO 2	Relación de carreteras en zonas de altura	22
CUADRO 3	Especificaciones de calidad de los asfaltos sólidos para pavimentación	25
CUADRO 4	Especificaciones de calidad de los asfaltos líquidos para pavimentación	26
CUADRO 5	Especificación SUPERPAVE de ligantes asfálticos	28
CUADRO 6	Polímeros usados en modificación de asfaltos	39
CUADRO 7	Requerimiento de propiedades físicas para asfaltos modificados con polímeros de tipo I según ASTM D 5976	56
CUADRO 8	Requerimiento de propiedades físicas para asfaltos modificados con polímeros de tipo II según ASTM D 5840	57
CUADRO 9	Requerimiento de propiedades físicas para asfaltos modificados con polímeros de tipo III según ASTM D 5841	58
CUADRO 10	Requerimiento de propiedades físicas para asfaltos modificados con polímeros de tipo IV según ASTM D 5892	59
CUADRO 11	Especificaciones de asfalto modificado en la Comunidad Europea	61
CUADRO 12	Especificaciones de asfalto modificado de Bélgica	62
CUADRO 13	Especificaciones de asfalto elastomérico de Alemania	63
CUADRO 14	Especificaciones de asfalto plastomérico de Alemania	63
CUADRO 15	Especificaciones de asfalto elastomético tipo A de Polonia	64
CUADRO 16	Especificaciones de asfalto elastomético tipo B de Polonia	64
CUADRO 17	Especificaciones de asfalto elastomético tipo C de Polonia	65
CUADRO 18	Especificaciones de asfalto plastomético de Polonia	65
CUADRO 19	Ensayos constantes en las especificaciones de varios estados americanos de asfaltos modificados con polímeros	66
CUADRO 20	Especificación SHELL de asfaltos elastoméricos	68
CUADRO 21	Especificaciones de asfaltos modificados con EVA - MOBILPLAST	68
CUADRO 22	Especificaciones ASTM D 6114 para asfalto modificado con	

	caucho recuperado de neumáticos	69
CUADRO 23	Propiedades fisicoquímicas del cemento asfáltico PEN 85/100	78
CUADRO 24	Propiedades fisicoquímicas del cemento asfáltico PEN 120/150	79
CUADRO 25	Requerimiento de propiedades físicas para asfaltos modificados con polímeros de tipo III según ASTM D 5841	81
CUADRO 26	Modificación de cementos asfálticos de distinto grado de penetración con el polímero PE	82
CUADRO 27	Modificación de cementos asfálticos de distinto grado de penetración con el copolímero EVA	88
CUADRO 28	Requerimiento de propiedades físicas para asfaltos modificados con polímeros de tipo I según ASTM D 5976	94
CUADRO 29	Requerimiento de propiedades físicas para asfaltos modificados con polímeros de tipo IV según ASTM D 5892	95
CUADRO 30	Modificación de cementos asfálticos de distinto grado de penetración con el copolímero SBS	97
CUADRO 31	Modificación de cementos asfálticos de distinto grado de penetración con el copolímero SB	104
CUADRO 32	Propiedades fisicoquímicas del asfalto PEN 85/100 (FORMULACION: CRUDO PURO)	111
CUADRO 33	Modificación del asfalto PEN 85/100 (FORMULACION: CRUDO PURO) con el copolímero SBS	113
CUADRO 34	Modificación de los cementos asfálticos PEN 85/100 de distinta naturaleza química con el copolímero SBS	120
CUADRO 35	Demanda nacional de asfaltos (MBDC)	122
CUADRO 36	Condición y metas de las carreteras en el programa de rehabilitación y mantenimiento vial	123
CUADRO 37	Programa de inversiones en infraestructura vial hasta el año 2005	124
CUADRO 38	Demanda de asfaltos sólidos (MBDC) según su grado de penetración	125
CUADRO 39	Flujo de fondos para el sistema de producción de asfaltos modificados con polímeros	139
CUADRO 40	Valor actual neto en función del tiempo para el sistema de producción de asfalto modificado	140

## Figuras

	Páginas	
FIGURA 1	Proceso de obtención de los asfaltos a partir del petróleo	9
FIGURA 2	Proceso de separación del asfalto en cuatro fracciones ASTM D 4124	11
FIGURA 3	Principales grupos químicos presentes en el asfalto	12
FIGURA 4	Fisuramiento por bajas temperaturas	23
FIGURA 5	Formación de ahuellamientos	23
FIGURA 6	Separación del asfalto y los agregados	23
FIGURA 7	Esquema de termoreversibilidad de los copolímeros del etileno	33
FIGURA 8	Conformación planar de las moléculas de EVA	34
FIGURA 9	Representación de varias figuras	35
FIGURA 10	Estructura del elastómero termoplástico SBS	37
FIGURA 11	Cauchos termoplásticos lineales y ramificados	37
FIGURA 12	Efecto del contenido de asfalteno en la relación $pen_{\text{tope}}/pen_{\text{fondo}}$ después del almacenamiento en caliente en mezclas de asfalto/polímero SBS	41
FIGURA 13	Influencia del balance entre aromaticidad y contenido de asfaltenos en las características de la mezcla de asfalto/polímero SBS	42
FIGURA 14	Zonas de Compatibilidad del CAP con diferentes polímeros	43
FIGURA 15	Condición de Bajo Cizallamiento para mezcla con polímero SBS	44
FIGURA 16	Variación de la viscosidad en la mezcla de asfalto de PEN 200 con polímero SBS a elevadas temperaturas	45
FIGURA 17	Estabilidad del polímero SBS en el asfalto de PEN 200 a 185°C	46
FIGURA 18	Alternativas de producción de asfaltos modificados con polímeros	47
FIGURA 19	Diagrama de producción de asfaltos modificados con elastómeros termoplásticos estirénicos	48
FIGURA 20	Diagrama de producción de asfaltos modificados con plastómeros	49
FIGURA 21	Modelo de flujo en un tanque vertical con impulsor y deflectores	52
FIGURA 22	Observación de estructuras de asfalto modificado con diferentes Porcentajes de SBS en un microscopio de reflexión de fluorescencia	53

FIGURA 23	Sistema de Mezclado para la Producción de Asfalto Modificado con SBS	128
FIGURA 24	Diagrama de Producción de Asfalto Modificado con SBS	129

## **Capítulo I** **INTRODUCCION**

### **1.1. ANTECEDENTES**

En la actualidad los Asfaltos Convencionales son preparados especialmente y en su gran mayoría para uso directo en la construcción de pavimentos asfálticos por presentar cualidades aglutinantes, impermeabilizantes, de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a los ácidos y álcalis; sin embargo, su duración se ha visto notablemente reducida por condiciones adversas como el aumento de la intensidad de tráfico, aplicación de cargas que exceden las especificaciones de diseño de la carpeta asfáltica y condiciones ambientales, temperaturas elevadas y especialmente temperaturas bajas, dando como resultado la aparición de fisuramientos, severas deformaciones o ahuellamientos, principalmente, generando el deterioro prematuro de las redes viales.

Una alternativa viable en otros países ha resultado ser el uso de Asfaltos Modificados con Polímeros, los cuales ofrecen un avance notable en la tecnología de los Ligantes Asfálticos, ya que dichos compuestos orgánicos le brindan especiales características mecánicas y reológicas prolongando la vida útil del pavimento en servicio, y permitiendo abordar tratamientos que no se pueden realizar con los Asfaltos Convencionales.

En nuestro país, el empleo de los Asfaltos Modificados se efectúa aun en escalas moderadas en comparación a la demanda total de los materiales asfálticos, por lo que su campo de aplicación es aun virgen en un buen porcentaje, convirtiéndose en un sector atractivo para las inversiones en nuevas plantas de producción y/o ampliación de las existentes.

Esta orientación del uso de asfaltos de mejor tecnología involucra un necesario cambio y/o modificación de las infraestructuras ya existentes, tanto para la fase de producción y transporte hasta las instalaciones de uso, como para la aplicación y regulaciones sobre la construcción de carreteras. Por tanto, estudios de investigación enfocados a este tema resultan ser de valiosa importancia.

La Refinería CONCHAN - PETROPERU, en su objetivo por encontrar aditivos que mejoren propiedades como la adherencia y la ductilidad, inició trabajos a nivel de laboratorio evaluando distintos tipos de aditivos.

Sin embargo, se dieron cuenta que lo que estaban obteniendo eran asfaltos con nuevas propiedades e inclusive mejoradas respecto a los Asfaltos Convencionales. Dichos asfaltos resultaban ser los llamados Asfaltos Modificados, cuyo uso en otros países del mundo ha demostrado que los problemas que actualmente enfrentan los pavimentos pueden superarse (obviamente acompañado de un buen diseño de la carpeta asfáltica), logrando de esa manera aumentar la vida útil del pavimento y disminuir a su vez los costos de mantenimiento.

Por consiguiente, surgió un nuevo interés en la refinería, el de modificar sus asfaltos con polímeros, en una primera etapa con las cargas típicas utilizadas en la producción de asfaltos (mezclas de crudos), para luego continuar con una evaluación del grado de modificación con polímeros utilizando asfaltos procedentes de crudos puros.

## **1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

El presente estudio de investigación tiene como objetivos:

1. Dar a conocer los diferentes tipos de polímeros útiles para dicha aplicación, así como demostrar a través de pruebas de laboratorio las ventajas en cuanto a propiedades físico-químicas de los Asfaltos Modificados con Polímeros respecto a los Cementos Asfálticos Convencionales producidos por la Refinería Conchán - PETROPERU y que garanticen su buen desempeño durante su puesta en servicio.
2. Clasificar según normas ASTM a los asfaltos modificados con polímeros, obtenidos en laboratorio.
3. Sustentar la producción de asfaltos modificados a nivel industrial de acuerdo a los resultados de este estudio.



## Capítulo 2

### REVISION BIBLIOGRAFICA

#### **2.1. ASFALTOS DERIVADOS DEL PETROLEO**

##### **2.1.1. BREVE RESEÑA HISTORICA**

El asfalto es sin duda uno de los materiales más antiguos utilizados por el hombre. Excavaciones arqueológicas revelan de su empleo en épocas anteriores a nuestra era.

En Mesopotamia, Asia, el asfalto era usado como aglutinante en trabajos de albañilería y construcción de estrados. También, los reservorios de agua de los baños sagrados eran impermeabilizados con asfalto. Pasajes bíblicos revelan de su empleo como impermeabilizante en el Arca de Noé. Así mismo, los egipcios los utilizaron en trabajos de momificación.

Posteriormente, se usó en pavimentación en 1802 en Francia, en 1838 en Estados Unidos y en 1869 en Inglaterra. A partir de 1909, se inicia el uso del Asfalto derivado del Petróleo, el cual por sus características de economía y pureza constituyen el día de hoy la principal fuente de abastecimiento.

Sin embargo, existen también los asfaltos naturales, que se presentan como depósitos en la superficie terrestre, como resultado de la evaporación de fracciones ligeras de petróleo afloradas a la superficie en épocas remotas; este es el caso de los asfaltos de Trinidad - Bermudas ("Lagos de Trinidad") y las denominadas asfaltitas (asfaltos impregnados en poros de rocas formando las llamadas "Rocas Asfálticas", encontradas en EUA y en Argentina llamadas respectivamente, gilsonita y rafaelita).

##### **2.1.2. DEFINICION**

El asfalto es un material aglutinante de color oscuro, constituido por una mezcla compleja de hidrocarburos no volátiles de elevado peso molecular, el cual se encuentra presente en la mayor parte de petróleo crudo.

La ASTM (Sociedad Americana de Prueba de Materiales) lo define como aquel material aglutinante de consistencia variable, de color oscuro, que se puede encontrar naturalmente y/o por refinación de petróleos.

Cabe mencionar que el término **Bitumen** es otro nombre utilizado para designar al asfalto. Es común encontrar en literatura los términos de asfaltos y bitúmenes, en plural, confirmando la gran variedad de tipos y aplicaciones.

En nuestro país se denomina al asfalto para pavimentación (principal aplicación de los Asfaltos Derivados del Petróleo), **cemento asfáltico o CAP**, en EUA se conoce como **asphalt cement** y en Europa se le llama **bitumen**; sin embargo en literatura no especializada, se llama asfalto a la mezcla de asfalto con materiales minerales.

### 2.1.3. CLASIFICACION

Actualmente, la mayor parte del asfalto producido y empleado en el mundo es extraído del petróleo, el cual es exento de impurezas; estos asfaltos derivados del petróleo son obtenidos en unidades de destilación primaria y de vacío, teniéndose diversos tipos, y los cuales se pueden clasificar de acuerdo a su uso en<sup>(1)</sup>:

a. Asfaltos para pavimentación

- Cementos Asfálticos
- Emulsiones Asfálticas
- Asfaltos Diluídos
- Asfaltos Modificados

b. Asfaltos para Uso Industrial

- Asfaltos Oxidados

## **a. Asfaltos para Pavimentación**

- **Cementos Asfálticos**

El cemento asfáltico o CAP es un líquido muy viscoso, de semisólido a sólido a temperatura ambiente, presenta comportamiento termoplástico, es decir, cuando se calienta se torna líquido y cuando se enfría retorna a su estado original.

Son preparados especialmente para su uso directo en la construcción de pavimentos asfálticos por sus propiedades aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a los ácidos y álcalis en general.

Se clasifican de acuerdo a su consistencia, la cual es medida por su viscosidad (dinámica o absoluta) o su penetración (PEN).

En el Perú por ejemplo, se producen: CAP PEN 10/20, 30/40, 40/50, 60/70, 85/100, 120/150, etc., donde los rangos de penetración pueden variar en una gama muy amplia y el valor de la penetración es inversamente proporcional a la viscosidad.

En otros países como Brasil, a los asfaltos de este tipo se les clasifica por su viscosidad, por ejemplo: CAP 7, 20, 55 (equivalente a PEN 60, 50, 20).

- **Emulsiones Asfálticas**

Las emulsiones asfálticas son productos bituminosos obtenidos por la dispersión de pequeñas partículas de un betún asfáltico en agua o en una solución acuosa con un agente emulsionante; o de manera inversa, es decir de una fase acuosa en una fase asfáltica, presentando partículas electrizadas y un tiempo de ruptura variable.

Las emulsiones asfálticas son preparadas por mezcla de CAP, agua, acidulante y tensoactivos en un molino coloidal.

Las emulsiones Asfálticas pueden ser clasificadas por el tipo de carga de partícula en:

- Emulsiones Asfálticas Aniónicas (EAA)
- Emulsiones Asfálticas Catiónicas (EAC)
- Emulsiones Asfálticas No-iónicas (EANI)

Y por el tipo de ruptura en:

Ruptura Rápida

Ruptura Media

Ruptura Lenta

Las características de ruptura son controladas principalmente por la naturaleza y cantidad de agente emulsificante.

- **Asfaltos Diluidos: Cut-Backs**

Llamados Asfaltos Recortados, resultan de la dilución de Cementos Asfálticos con algún destilado de petróleo.

Los diluyentes utilizados funcionan como vehículos, resultando productos menos viscosos que pueden ser aplicables a temperaturas más bajas. Los diluyentes se evaporan después de la aplicación.

Se clasifican de acuerdo al tiempo de curado, el cual es determinado por la naturaleza del diluyente:

Asfaltos Líquidos de Curado Rápido: RC

Asfaltos Líquidos de Curado Medio: MC

Asfaltos Líquidos de Curado Lento: LC

Para obtener los asfaltos RC se usa normalmente como diluyente, una nafta o una gasolina pesada (aprox. 26%), para obtener los asfaltos MC se usa kerosene (aprox. 30%) y para obtener los asfaltos LC se utiliza como solvente diesel (aprox. 35%).

Cada una de estas categorías presentan diferentes rangos de viscosidad cinemática determinadas en función de la cantidad de diluyente. Así los asfaltos RC están constituidos por los siguientes tipos: RC-70, RC-250, RC-500, etc.

Análogamente los MC presentan: MC-30, MC-70, MC-250, MC-800. En ambos casos, el número indica su viscosidad máxima especificada en SSF (Segundos Saybolt Furol).

Los tipos de asfaltos del mismo número pero de categorías diferentes, tienen un mismo rango de viscosidad a una determinada temperatura. Así por ejemplo:

Un RC-70 y un MC-70 tienen un mismo rango de viscosidad a 60°C pero tienen diferentes tiempos de cura.

- **Asfaltos Modificados**

Para ampliar su resistencia, los cementos asfálticos de petróleo pueden ser modificados a través de adiciones de: asfaltos naturales como gilsonitas (EUA), asfaltita (Argentina), el asfalto de Trinidad, por la adición de finos (cal, cemento, sílica, etc.), fibras (fibra de vidrio, asbestos, fibra de celulosa y fibras poliméricas) o por azufre elemental.

Sin embargo, hoy en día los Asfaltos Modificados son obtenidos por la combinación de polímeros y asfaltos compatibles entre sí, favoreciendo la obtención de mezclas con mayor durabilidad y elasticidad principalmente.

La búsqueda de soluciones al problema del deterioro prematuro de los Pavimentos Asfálticos debido a fallas por ahuellamientos, mala adherencia, etc., es el motivo por el cual se emplean estos modificadores de Ligantes Asfálticos y que resulta ser materia de este estudio.

## **b. Asfaltos para Uso Industrial**

- **Asfaltos Oxidados**

Llamados también Asfaltos Soplados, son asfaltos calentados y sometidos a la acción de una corriente de aire, con el objeto de modificar sus características normales a fin de adaptarlos para aplicaciones especiales.

Un proceso de oxidación produce en los asfaltos:

Aumento de peso específico y consistencia.

Disminución de la Ductilidad.

Disminución de la Susceptibilidad Térmica.

Los grados de Asfaltos Oxidados son producidos por Soplado de aire a una carga residual, y se caracterizan por tener un alto punto de ablandamiento de (75 a 135°C) y bajos valores de PEN (10 a 40 dmm).

Los sopladores de Asfaltos pueden operar en forma continua o por Batches.

Los Asfaltos Oxidados son usados generalmente para fines industriales como impermeabilizantes, películas protectoras, etc.

#### **2.1.4. PROCESOS DE OBTENCION**

Existen varios procedimientos para la obtención de los asfaltos a partir de petróleo crudo. Sin embargo nos dedicaremos a explicar el procedimiento de obtención de los asfaltos **vía Destilación Directa**.

Se debe tener en cuenta que de las características propias del crudo, especialmente de su composición química, dependerá la obtención de los asfaltos.

Por ejemplo, si el crudo presenta características asfálticas, solo se requiere una Destilación al Vacío, en cambio para aquellos crudos que poseen un rendimiento medio de Asfalto es necesario dos etapas de destilación: una a presión atmosférica y otra a vacío. Para crudos muy livianos de bajo rendimiento de asfaltos, es necesario una etapa de Extracción, además de las etapas mencionadas.

Estos procesos de obtención por Destilación y Extracción, consisten básicamente en la separación básica de los hidrocarburos constituidos como mezclas en el crudo, por sus diferencias en el punto de ebullición y de condensación.

Esto significa que en una destilación primaria las fracciones más ligeras se obtendrán por el tope de la fraccionadora y por los fondos se obtendrá el **crudo reducido**, que servirá de alimentación para la destilación al vacío, de donde análogamente por el tope y laterales se obtendrá los gasóleos y por el fondo el **residual asfáltico o de vacío**.

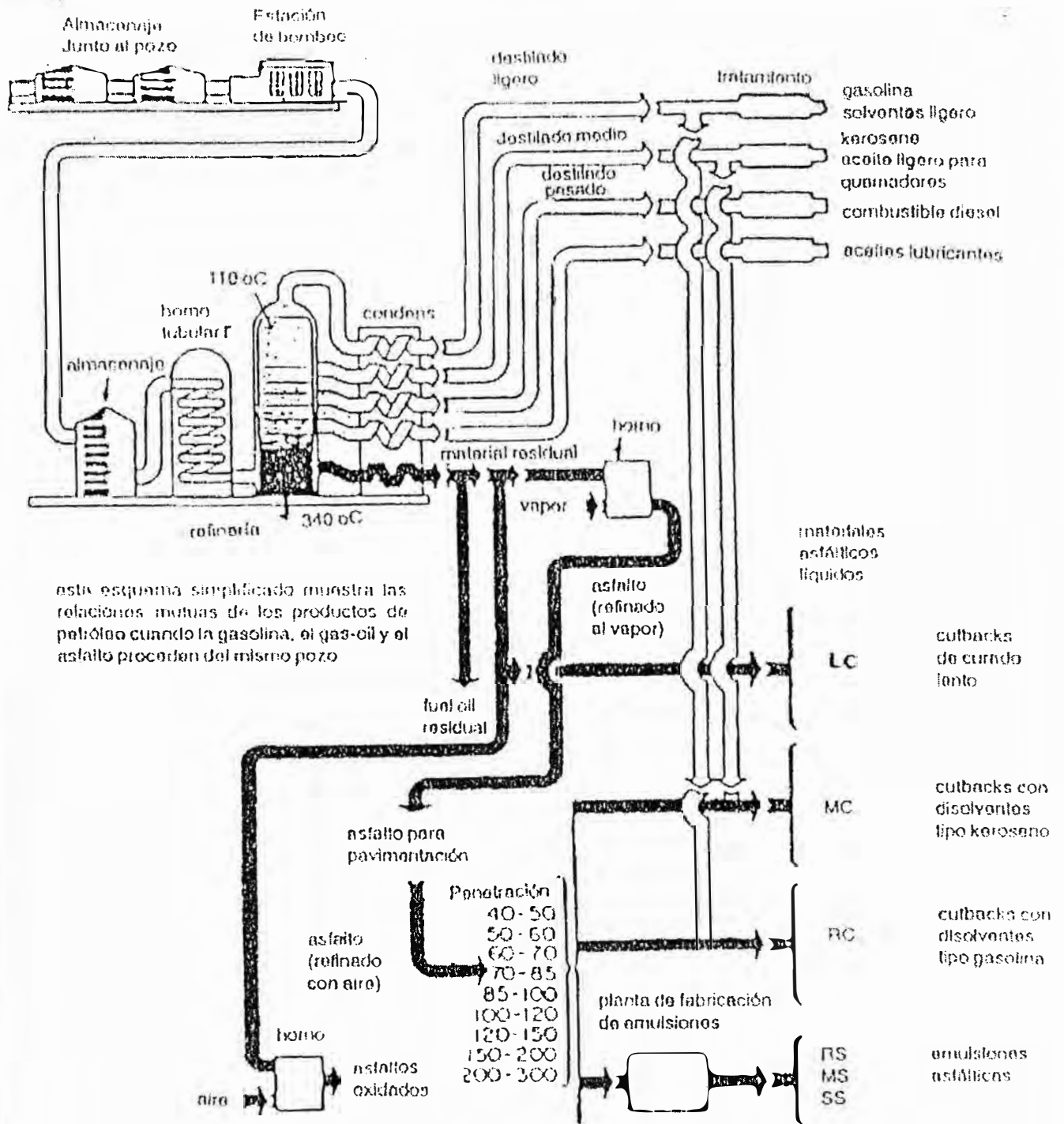


Figura 1  
Esquema de la obtención de asfaltos de petróleo

En esta unidad de destilación al vacío, las condiciones de operación, temperatura y presión, permiten una concentración de residual asfáltico, y la variación de dichas condiciones permite un ajuste de la viscosidad de este residual.

Por otro lado, este residual final es refinado al vapor para obtener los asfaltos para pavimentación, denominados Cementos Asfálticos, cuya viscosidad es directamente proporcional al vacío en la torre. Estos asfaltos son tratados de modo de darles diferente grado de dureza, medidos por el ensayo de penetración, y que mezclados con los destilados del petróleo, se obtienen los Asfaltos Líquidos o Cut-Backs, de diferentes tipos y grados, o emulsificados con agua, dan las Emulsiones Asfálticas.

Además, si el residual final es refinado con aire a elevadas temperaturas se obtendrá los Asfaltos Oxidados.

En la **figura 1** se muestra un diagrama esquemático del proceso de obtención de los asfaltos a partir del petróleo.

## **2.1.5. CARACTERIZACION DE LOS CEMENTOS ASFALTICOS CONVENCIONALES**

### **2.1.5.1. NATURALEZA QUIMICA**

Se han efectuado diversos estudios para determinar la composición de los asfaltos y clasificar sus componentes bajo criterios muy variados; algunos estudiosos han efectuado el análisis para determinar los elementos químicos predominantes, tales como carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, metales en general, etc.

Sin embargo, estos resultados no podían relacionarse, al menos con cierta claridad, con las propiedades del producto, por lo que continuaron los estudios para lograr la determinación de los componentes del asfalto a nivel de compuestos químicos en lugar de elementos.

En este sentido, se ensayaron otros procesos de separación de componentes asfálticos en función de su solubilidad en cierto tipo de solventes, clasificándolos por ejemplo en **Maltenos y Asfaltenos**, según sean solubles o no en n-heptano u otro solvente parafínico ligero, **Carbenos**, insolubles en Tetracloruro de Carbono pero solubles en Disulfuro de Carbono, **Carboides**, Insolubles en Disulfuro de Carbono, etc.



Técnicas de **Cromatografía por Adsorción**, cuya metodología es descrita en la Norma **ASTM D 4124**, permite separar a los asfaltos en cuatro fracciones muy definidas: **Saturados, Naftenos Aromáticos, Polar Aromáticos y Asfaltenos**.

En este método los **Asfaltenos** se separan primero por insolubilidad en n-heptano y los otros componentes, llamados "**Maltenos**", solubles en n-heptano, se distribuyen en dos fases: una es el lecho estacionario con una amplia área superficial (alúmina) y la otra es una fase líquida que percola a través del lecho estacionario. La muestra es transportada por un solvente en la fase móvil a través del lecho de la columna.

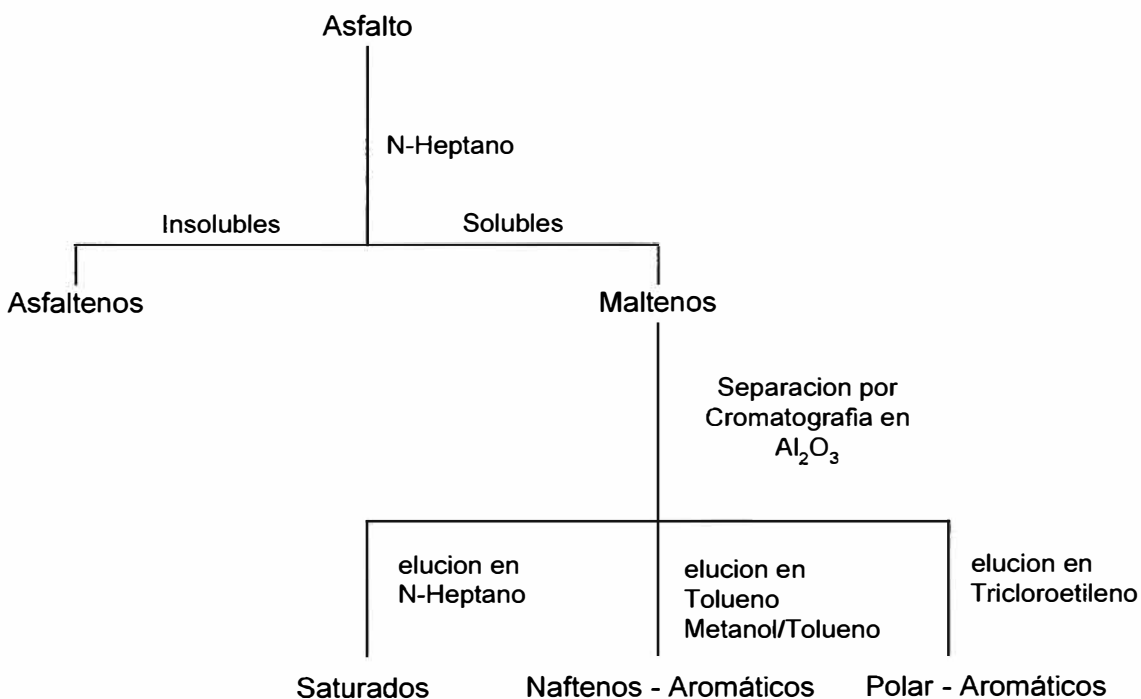
Los componentes de la muestra son selectivamente retenidos por la fase estacionaria.

El flujo de la fase móvil es por gravedad, manteniéndose constante a través de todo el proceso, logrando de esta manera que cada componente de la mezcla sea eluído de la columna como un componente puro disuelto en la fase móvil.

Posteriormente, cada componente eluído es recuperado por remoción del solvente y finalmente pesado<sup>(8)</sup>.

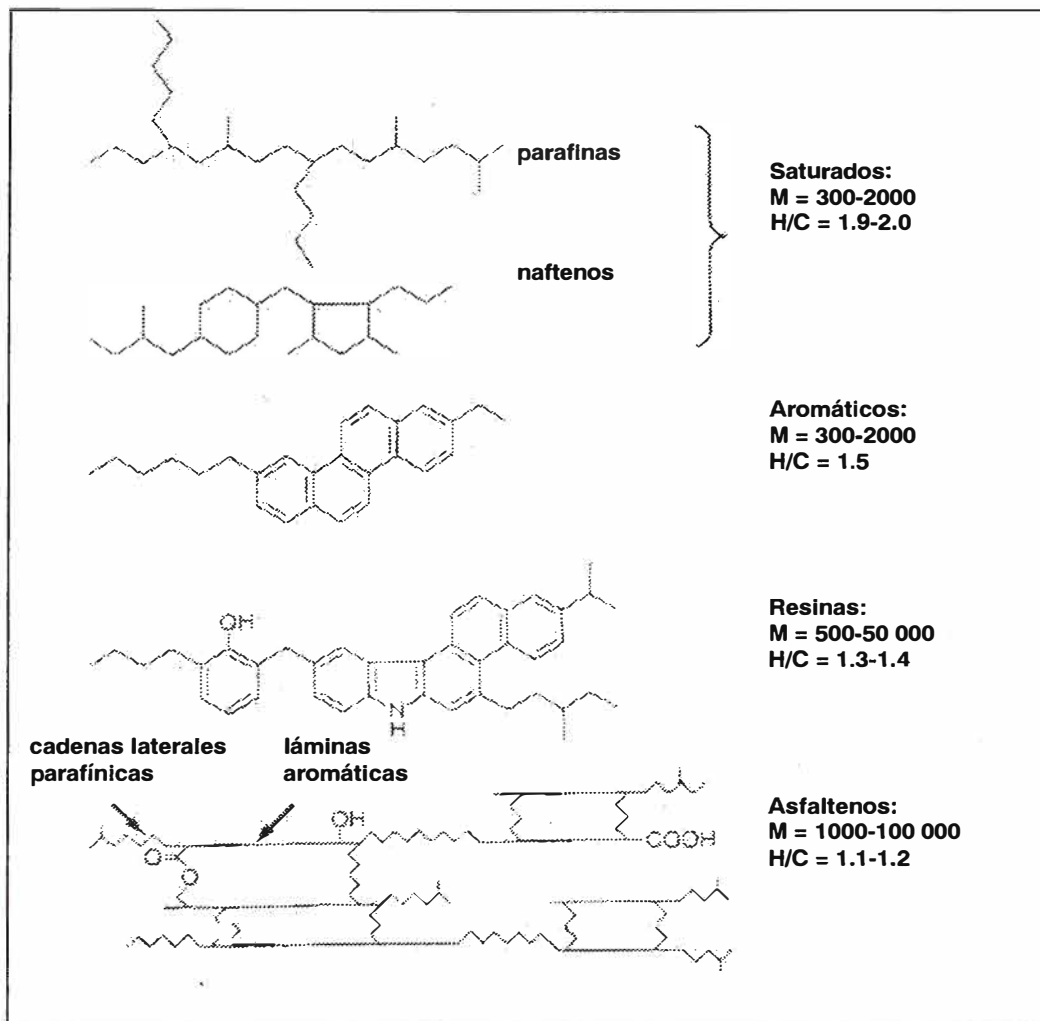
En la siguiente figura se muestra un diagrama esquemático del proceso de separación de cromatografía por adsorción.

**FIG.2. PROCESO DE SEPARACION DEL ASFALTO EN CUATRO FRACCIONES ASTM D 4124**



Sin embargo en Europa, un fraccionamiento químico muy utilizado semejante al establecido por la ASTM es el llamado **método SARA**, que permite la separación del asfalto en cuatro fracciones muy definidas de grupos de moléculas que tienen estructuras comunes: **Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos**. La **fig.3** muestra la estructura química de cada uno de estos grupos<sup>(7)</sup>.

**FIG.3. PRINCIPALES GRUPOS QUÍMICOS PRESENTES EN EL ASFALTO**



A diferencia del método anterior, el método SARA utiliza para la separación de los maltenos cromatografía de capa fina y para la detección de sus componentes ionización de llama.

Por otro lado, el modelo estructural del **programa SHRP<sup>(11)</sup>** clasifica a los compuestos constituyentes de los CAP en **polares y no polares**, proponiendo que las fuerzas intra e intermoleculares, listadas seguidamente, son las responsables de la formación de redes tridimensionales que resultan en características elásticas y viscosas. Por aumento de la

temperatura o por la acción de fuerzas cizallantes, ocurre la distribución de aglomerados y como consecuencia la reducción de elasticidad y el aumento de las características viscosas.

<b>Fuerzas Intra e Intermoleculares</b>	<b>Compuestos que se aglomeran</b>
Van der Waals	Largas Cadenas Alifáticas
Puentes de Hidrógeno	Polares/Heteroátomos
Atracciones $\pi$ - $\pi$	Aromáticos

### **Relación entre la composición química y las propiedades físicas del asfalto**

Los componentes del Cemento Asfáltico de Petróleo, tienen las siguientes propiedades<sup>(1)</sup>:

#### **a. Saturados**

Tienen influencia negativa sobre la susceptibilidad térmica. En mayor concentración ablandan al producto.

#### **b. Naftenos Aromáticos**

Actúan como plastificantes, contribuyendo a la mejora de sus propiedades físicas.

#### **c. Polar Aromáticos**

Tienen influencia negativa en la susceptibilidad térmica, contribuyen en la mejora de la ductilidad y la dispersión de los asfaltenos.

#### **d. Asfaltenos**

Contribuyen a la mejora de la susceptibilidad térmica y al aumento de la viscosidad.

Es importante mencionar que la destilación de los CAP remueve los componentes ligeros, de preferencia los saturados, concentrando los asfaltenos. Una oxidación aumenta considerablemente el contenido de asfaltenos y disminuye a los aromáticos. Un aumento

de temperatura quiebra las ligaciones interatómicas que mantienen asociados a los asfaltenos, modificando su tamaño, forma y reduciendo la viscosidad del CAP<sup>(12)</sup>.

### **2.1.5.2. FUNCIONES**

Un Cemento Asfáltico es un material ideal para aplicaciones en trabajos de pavimentación, además de poseer propiedades aglutinantes e impermeabilizantes presenta características de flexibilidad y alta resistencia a la acción de la mayoría de álcalis y ácidos.

Las funciones ejercidas más importantes en los asfaltos son<sup>(6)</sup>:

Función Aglutinante

Función Impermeabilizante

- **Función Aglutinante**

Consiste en proporcionar una íntima ligazón entre agregados, contribuyendo a resistir una acción mecánica de desagregado producida por la carga de los vehículos.

- **Función Impermeabilizante**

Como impermeabilizante busca garantizar que el pavimento sea eficaz contra la penetración del agua, proveniente tanto de las precipitaciones fluviales como la del subsuelo por capilaridad.

Naturalmente para que el asfalto desempeñe satisfactoriamente las funciones que le son inherentes es necesario de que sea de buena calidad.

### **2.1.5.3. TRANSICIONES**

Los Cementos Asfálticos están constituidos por macromoléculas, análogamente a los polímeros sintéticos, y presentan también transiciones de fase que se relacionan con su desempeño como ligante en los pavimentos<sup>(13)</sup>. Ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) en cementos asfálticos permiten la visualización de la temperatura de transición vítrea y el contenido de fracciones cristalizables<sup>(14)</sup>.

### **a. Temperatura de Transición Vitrea, Tg**

La temperatura de transición vítrea Tg es la temperatura a la cual el espacio entre moléculas para el movimiento browniano está reducido a pequeños segmentos de cadenas que se mueven. El término volumen libre es utilizado para describir el espacio ocupado por los vacíos. Este volumen es pequeño en la Tg, más crece abruptamente después de ella. Esta temperatura tiene correlación con el Punto de Ruptura FRAASS<sup>(14)</sup> de la especificación alemana de los cementos asfálticos y con el módulo de rigidez determinado en el reómetro de fluencia<sup>(15)</sup>.

### **b. Fracciones Cristalizables**

Las fracciones cristalizables se presentan en parte de los compuestos saturados que se cristalizan durante el enfriamiento. Ellas se correlacionan con el contenido de parafinas, en la metodología propuesta por el laboratorio Central de Ponts et Chaussées LCPC y con la variación de viscosidad versus temperatura mostrada en el gráfico de Heukelom, denominado parámetro delta<sup>(13,14)</sup>.

#### **2.1.5.4. ENVEJECIMIENTO**

Los asfaltos son afectados por la presencia de oxígeno, por la radiación ultravioleta y por las variaciones de temperatura. Estas influencias externas resultan en un aumento de consistencia del ligante y en una mayor rigidez de la mezcla bituminosa, dando como consecuencia fisuras y segregación. Cuatro mecanismos principalmente explican el endurecimiento o el envejecimiento del asfalto: oxidación, pérdida de volátiles, endurecimiento físico y el endurecimiento exudativo<sup>(9)</sup>.

La oxidación es la más importante causa del endurecimiento del asfalto. Si no se tiene el cuidado respectivo, durante su elaboración, la alta temperatura utilizada y la presencia de aire dan origen a una violenta oxidación. Los grupos polares oxigenados tienden a asociarse, formando miscelas de alto peso molecular y mayor viscosidad.

El endurecimiento resultante de la pérdida de volátiles es bajo, teniendo en cuenta que los cementos asfálticos de petróleo no son volátiles.

El endurecimiento físico ocurre a temperatura ambiente y es atribuido a la reordenación de moléculas y a la cristalización de parafinas. Es un fenómeno reversible.

El endurecimiento exudativo, resulta del movimiento de componentes oleosos del ligante al agregado mineral.

La primera alteración de la estructura química del CAP después de su producción ocurre durante la aplicación y compactación de la mezcla bituminosa, y después de una manera más lenta durante el servicio de pavimentación.

### **2.1.6. CONTROL DE CALIDAD**

La fabricación de los materiales asfálticos se efectúa dentro de un marco perfectamente definido, en razón a que las condiciones del mercado petrolero han conducido a los fabricantes a utilizar crudos de diferentes orígenes; por lo tanto estos son objeto de una evaluación de sus constituyentes y sus productos terminados, los cuales son apreciados por sus características y tienen como condición mínima satisfacer todas las Especificaciones Técnicas.

El control de calidad de los materiales asfálticos, se efectúa siguiendo métodos de ensayos usuales, que han sido objeto de normalización, mediante los cuales puede garantizarse la calidad del material.

Es por ello que los laboratorios de control disponen de materiales y equipos de ensayos según las prescripciones y normas existentes.

Los ensayos señalados en las especificaciones peruanas para evaluar la calidad de los Cementos Asfálticos Convencionales son los siguientes:

1. Penetración: ASTM D-5<sup>(17)</sup>
2. Ductilidad: ASTM D-113<sup>(17)</sup>
3. Viscosidad Cinemática: ASTM D-2170<sup>(17)</sup>
4. Viscosidad Absoluta: ASTM D-2171<sup>(17)</sup>
5. Solubilidad en Tricloroetileno: ASTM D-2042<sup>(17)</sup>
6. Prueba de la Mancha: AASTHO T-102<sup>(18)</sup>
7. Punto de Inflamación: ASTM D-92<sup>(19)</sup>

8. Punto de Ablandamiento o Anillo y Bola: ASTM D-36<sup>(20)</sup>
9. Oxidación en Película Fina: ASTM D-1754<sup>(17)</sup>
10. Punto de Ruptura FRAASS: IP 80/87<sup>(21)</sup>
11. Revestimiento y Desprendimiento: ASTM D-3625<sup>(17)</sup>
12. Cromatografía por Adsorción: ASTM-4124<sup>(17)</sup>
13. Índice de Penetración: RLB1-1964<sup>(22)</sup>

Varios de estos Métodos o Ensayos serán usados para la evaluación experimental que se realiza en el capítulo siguiente.

### **2.1.7. ALMACENAJE Y TRANSPORTE**

Después de un control riguroso llevado a cabo para asegurar la Calidad de los Productos, los diferentes asfaltos son almacenados en tanques calorífugados y mantenidos a temperaturas de entrega (alrededor de 120°C), o a temperaturas suficientemente elevadas que permitan su pasaje dentro de las bombas. El recalentamiento es por serpentines, dentro de los cuales circula vapor bajo presión o aceite.

El transporte en grandes volúmenes se efectúa en camiones cisterna. En el caso de los cementos asfálticos, tienen en su interior serpentines de una longitud suficiente, para calentar el asfalto mediante la circulación de vapor, agua o aceite. Sin embargo deberá controlarse la temperatura durante el transporte, la misma que no deberá ser mayor que la temperatura de aplicación, determinada en laboratorio, según carta de Viscosidad - Temperatura, de manera que no se produzca el envejecimiento del asfalto por sobrecalentamiento antes de ser aplicado.

Similares cuidados se deberán observar cuando es almacenado en obra, o sea evitar el sobrecalentamiento.

En el caso de los Asfaltos Líquidos, pueden transportarse y almacenarse a temperatura ambiente, teniendo cuidado con la pérdida de solvente por evaporación, así como la contaminación por agua o inertes.

Para el caso de la Emulsiones Asfálticas, el transporte y almacenaje puede efectuarse a temperatura ambiente, pero no menos de 5°C, lo cual produciría la rotura del producto y la separación de sus componentes.

### **2.1.8. USOS TIPICOS DE ASFALTOS DE PAVIMENTACION**

De manera general, entre los usos recomendados para los Asfaltos de Pavimentación se tienen<sup>(1,6)</sup>:

1. Imprimación
2. Pintura de Ligazón
3. Tratamientos Superficiales
4. Camada Bituminosa
5. Pre-mezcla en frío
6. Pre-mezcla en caliente
7. Arena-asfalto en caliente
8. Arena-asfalto en frío
9. Concreto Asfáltico
10. Mezcla en carretera o pista
11. Suelo-Bitumen
12. Lodo Asfáltico

Por otra parte es importante indicar que los Cementos Asfálticos de la Refinería Conchán - PETROPERU, se emplean en la construcción de carreteras, caminos, aeropuertos, impermeabilizaciones y revestimientos y son de fácil aplicación en caliente.

Para aplicaciones en frío, los cementos asfálticos PETROPERU se usan para formular los Asfaltos Líquidos tipo RC, MC y Emulsiones Asfálticas

Los Asfaltos Líquidos de Curado Rápido (RC) y Curado Medio (MC) se emplean para tratamientos superficiales, imprimación, revestimientos e impermeabilización. Su aplicación es en frío, pudiendo calentarse hasta una máxima temperatura de 70°C según requerimiento del uso.



En el **Cuadro N°1** se describe el uso de Cementos Asfálticos graduados por su penetración, en función al clima.

<b>CUADRO N°1</b>					
<b>USO DE CEMENTOS ASFALTICOS GRADUADOS POR PENETRACION EN FUNCION DEL CLIMA</b>					
<b>PAVIMENTACION</b>	<b>CLIMA</b>				
	<b>MUY CALIDO</b>	<b>CALIDO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>FRIO</b>	<b>FRIGIDO</b>
<b>AEROPUERTOS</b>					
Pista de Despegue	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Caminos Auxiliares	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Aparcamientos	60-70	60-70	60-70	85-100	85-100
<b>CARRETERAS</b>					
Trafico Pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Trafico Medio Ligero	40-50	60-70	60-70	85-100	120-150
<b>CALLES</b>					
Trafico Pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Trafico Medio Ligero	40-50	60-70	85-100	85-100	120-150
<b>CAMINOS PARTICULARES</b>					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales Estaciones de Servicio	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
Residenciales	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
<b>APARCAMIENTOS</b>					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
<b>ZONA DE RECREO</b>					
Pista de Tenis	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
Terrenos de Juego	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
<b>BORDILLOS</b>					
Bordillos	40-50	40-50	60-70	85-100	85-100

### 2.1.9. PROBLEMAS EN LOS PAVIMENTOS ACTUALES

Existe una serie de problemas que hasta el día de hoy no ha podido superar el Asfalto Convencional, debido a las limitaciones de este frente a condiciones adversas, y lo cual se ve reflejado en el deterioro prematuro y acelerado de los pavimentos.

Es por ello que la búsqueda de ligantes bituminosos de mejores características más que un ideal resultan ser una necesidad en nuestros días, como principal solución para estos problemas que cada vez se acrecientan más.

Los problemas de mayor incidencia en los pavimentos actuales son<sup>(3,10)</sup>:

#### a. Calidad de asfaltos

La calidad y las especificaciones de los asfaltos en los últimos 20-25 años ha cambiado en forma notable debido a la eficiencia de la refinerías y al efecto cambiante de los crudos por razones económicas. Hoy en día se comercializan mezclas de asfaltos que pueden requerir de aditivos para mejorar su servicio en obra.

**b. Tránsito**

El aumento de las cargas de tránsito y mayor frecuencia vial es un factor que afecta seriamente las vías. Esto se observa especialmente en zonas urbanas y de población densa, lo que dificulta enormemente el trabajo de mantenimiento.

**c. Transporte**

Los vehículos modernos de transporte llevan cargas más pesadas con neumáticos que contienen mayor presión de aire. Esta es una causa muy común del deterioro de vías terrestres de comunicación.

**d. Inclemencias del clima.**

En el transcurso de los años se ha venido relacionando el grado de deterioro de las vías asfálticas con los cambios bruscos de temperatura, condiciones climáticas (seco o lluvioso) y zonas geográficas en las alturas, en combinación con los factores mencionados anteriormente.

**e. Diseño inadecuado de vías en ciertas regiones geográficas**

Este aspecto se refleja en ciertas regiones donde el acceso es difícil, las condiciones de operación son inadecuadas y el costo es mayor en construcción y mantenimiento de caminos. En algunas regiones remotas se debe poner énfasis en diseñar vías que resistan las inclemencias del clima, el tránsito, etc., con un presupuesto bajo de mantenimiento.

No se intenta profundizar el tema, sin embargo es deseable conocer una realidad de nuestros pavimentos, donde se puede observar como cada uno de los problemas descritos anteriormente influyen en su conjunto en el deterioro de los pavimentos construídos en estas zonas.

### **2.1.9.1. PAVIMENTACIÓN EN ZONAS DE ALTURA**

La problemática de los pavimentos en las zonas de altura ubicadas por encima de los 3500 m.s.n.m., (aunque esta es una referencia altimétrica que de ninguna manera pretende ser limitante, ya que puede darse a alturas menores o en caso contrario pueden no darse a alturas mayores) está asociada directamente con los factores hidrometeorológicos que suelen producirse en tales regiones, como<sup>(4,5)</sup> bajas temperaturas, gradiente térmico, radiación solar, precipitación fluvial y nivel freático, y con la escasez de materiales, los que afectan al normal desarrollo del proceso constructivo, la durabilidad y el comportamiento en servicio de las diversas capas que lo componen (granulares y asfálticas).

Cuando se habla de pavimentos en climas fríos, en zonas de altura, es común asociarlo inmediatamente con el caso del tramo de Ticlio, en la carretera Central. Sin embargo la extensión de la red vial ubicada por encima de los 3500 m.s.n.m., en nuestro país y en Bolivia, (país donde al igual que el nuestro existe un desarrollo importante de su red vial por encima de los 3500 m.s.n.m.), sobrepasa los 4000 Km. de longitud.

El **Cuadro N°2** presenta una relación de estas vías. La inversión necesaria para la construcción y rehabilitación de esta infraestructura es aproximadamente 3.000 millones de dólares.

Por consiguiente, la tarea de diseñar y construir pavimentos que puedan resistir las condiciones adversas a las que estarán expuestos, propias de la cordillera, plantea un reto difícil que compromete los esfuerzos de los especialistas en pavimentos, para la búsqueda de soluciones originales que deben partir de un proceso iterativo basado en el retroanálisis de las propias experiencias.

### **2.1.9.2. LIMITACIONES DEL ASFALTO**

Como se puede observar, los cementos asfálticos convencionales utilizados para la construcción de pavimentos, por ejemplo en zonas de altura, constituyen un problema, al no presentar características adecuadas para su uso en condiciones severas de clima, tránsito, etc.

**CUADRO N°2**  
**RELACION DE CARRETERAS EN ZONAS DE ALTURA<sup>(5)</sup>**

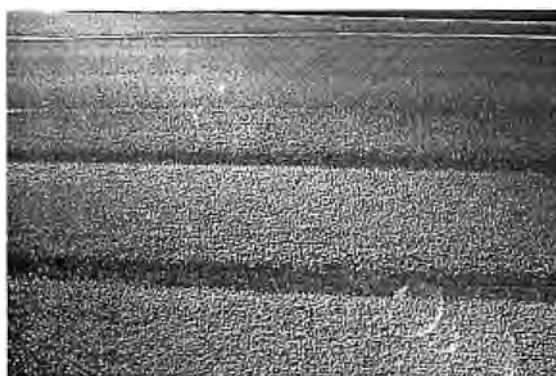
N°	RUTA PRINCIPAL	> 3500 m.s.n.m. (Km.)
	<b>PERU</b>	
1	Pativilca-Huaraz-Caraz	50
2	La Oroya-Huanuco	180
3	Lima-La Oroya	70
4	Pisco-Ayacucho	170
5	Nazca-Puquio-Chalhuanca	200
6	Ilo-Desaguadero	265
7	Arequipa-Juliaca	150
8	Huancayo-Ayacucho	300
9	Izcuchaca-Huanta-Huancaveliva	40
10	Puno-Cuzco	300
11	Tacna-Tarata-Candarace-Huaytire	150
12	Cuzco-Abancay	50
13	Ayacucho-San Francisco	200
14	Mazocruz-Ilave	75
15	Puno-Desaguadero	150
16	Lima-Canta-Cerro de Pasco	125
17	Las Vegas-Tarma	25
	<b>Total</b>	<b>2500</b>
	<b>BOLIVIA</b>	
1	Rio Seco-Desaguadero	95
2	El Alto-Viacha-Charaña	220
3	El Alto-Tiquiña-Copacabana	150
4	El Alto-Oruro-Potosi-Tarija	570
5	Patacamaya-Tambo Quemado	220
6	Oruro-Cochabamba	40
7	Oruro-Toledo-Pisiga	230
	<b>Total</b>	<b>1525</b>

Los continuos problemas de fisuramientos térmicos, ahuellamientos, deformaciones, entre otros, nos lleva a la búsqueda de un ligante bituminoso cuyas características por ejemplo de baja susceptibilidad térmica, baja propensión al envejecimiento, mejor servicio a altas y bajas temperaturas, mejor adherencia con los agregados, principalmente, garanticen la vida útil del pavimento y la seguridad vial.

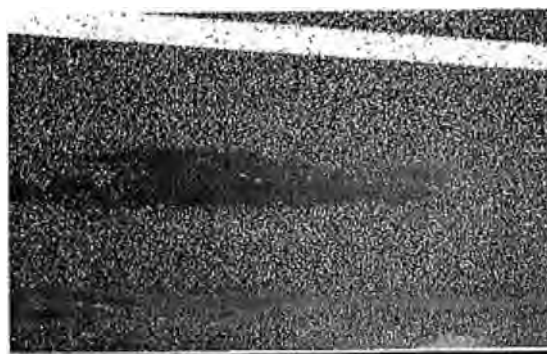
En las **figuras 4, 5, y 6** se puede observar los problemas típicos en los pavimentos actuales.



**FIGURA 4.**  
**FISURAMIENTO POR BAJAS**  
**TEMPERATURAS**



**FIGURA 5. FORMACION DE AHUELLAMIENTOS**



**FIGURA 6.**  
**SEPARACION DEL ASFALTO Y LOS AGREGADOS**

#### **2.1.10. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS ASFALTOS PARA PAVIMENTACION Y SU EVOLUCION**

Los Asfaltos de REFINERIA CONCHAN - PETROPERU, son obtenidos por Destilación Directa y sus características físico-químicas cumplen con los requerimientos de Entidades Mundiales del Asfalto como:

- Asociación Americana de Carreteras Estatales y Transportes Oficiales  
Norma AASHTO M20/M81 (Asfaltos Líquidos: AASTHO M82)
- Sociedad Americana para Ensayos y Materiales  
Norma ASTM D946/D2048 (Asfaltos Líquidos: ASTM D2027)
- Instituto del Asfalto U.S.A.
- Instituto Francés del Petróleo

Donde la clasificación de los Cementos Asfálticos es por el Ensayo de Penetración, y en el caso de los Asfaltos Diluídos por su Viscosidad a 60°C.

Las especificaciones técnicas de PETROLEOS DEL PERU incluyen ensayos complementarios, como el Índice de Penetración y la Carta de Viscosidad - Temperatura. **(Ver Cuadros N°3 y N°4: Especificaciones de PETROPERU).**

Sin embargo, la tendencia de los países europeos, es considerar el Punto de Ablandamiento como característica principal para definir las Especificaciones de los Asfaltos.

Constataciones efectuadas por el Laboratorio Central de Puentes y Calzadas de Francia<sup>(2)</sup> han mostrado que existe una relación entre el Punto de Ablandamiento del Bitumen y el comportamiento a las deformaciones de las mezclas asfálticas a temperaturas de servicio elevadas.

Para el caso de estaciones invernales, con temperaturas muy bajas, el asfalto no debe perder sus propiedades elásticas. Para evaluar su comportamiento a bajas temperaturas existe el ensayo de Punto de Ruptura FRAASS, cuyo modo operativo, está normalizado dentro de las normas francesas AFNOR.

Hasta hace poco tiempo, la información disponible en cuanto a la selección del tipo de asfalto a emplearse en mezclas en caliente, eran recomendaciones de carácter experimental y aplicables a las condiciones locales de cada país o región, fundamentadas en dos aspectos importantes, el clima y el tránsito.

Las nuevas especificaciones para ligantes asfálticos SHRP (Strategic Highway Research Program) del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras de los Estados

**CUADRO N°3  
ESPECIFICACIONES DE CALIDAD  
ASFALTOS SOLIDOS PARA PAVIMENTACION**

<b>PRUEBAS SOBRE EL LIGANTE ORIGINAL</b>									
PROPIEDADES	METODO ESTANDAR ASTM/AASTHO <sup>a</sup>	C.A. PEN 40/50		C.A. PEN 60/70		C.A. PEN 85/100		C.A. PEN 120/150	
		MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
<b>PENETRACION:</b>									
a 25°C, 100 gr, 5 seg, 0.1 mm	D 5	40	50	60	70	85	100	120	150
<b>DUCTILIDAD:</b>									
a 25°C, 5 cm/min, cm	D 113	100	—	100	—	100	—	100	—
<b>FLUIDEZ:</b>									
Viscosidad a 135°C, cSt	D 2170	240	—	200	—	170	—	140	—
<b>SOLUBILIDAD:</b>									
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	D 2042	99	—	99	—	99	—	99	—
<b>VOLATILIDAD:</b>									
Punto de Inflamación, C.O.C, °C	D 92	232	—	232	—	232	—	218	—
<b>DENSIDAD:</b>									
Gravedad Específica a 15.6/15.6°C	D 70	reportar		reportar		reportar		reportar	
<b>ADHERENCIA:</b>									
Revestimiento y Desprendimiento, %	D 1664	reportar		reportar		reportar		reportar	
<b>PRUEBAS SOBRE EL RESIDUO ENVEJECIDO ( Efecto de Calor y Aire )</b>									
<b>PELICULA FINA :</b>									
	D 1754								
- Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	D 113	reportar		50	—	75	—	100	—
- Indice de Susceptibilidad Térmica	RLB1-1964 <sup>b</sup>	reportar		reportar		reportar		reportar	
- Pérdida de masa por calentamiento, %		—	0.8	—	0.8	—	1.0	—	1.3
- Penetración Retenida, % original	D 5	55	—	52	—	47	—	42	—

<sup>a</sup> Las normas ASTM están definidas por la letra D , las normas AASTHO, por la letra T

<sup>b</sup> Prueba normada por el Instituto Francés del Petróleo

**CUADRO N°4**  
**ESPECIFICACIONES DE CALIDAD**  
**ASFALTOS LIQUIDOS PARA PAVIMENTACION**

PRUEBAS SOBRE EL LIGANTE ORIGINAL							
PROPIEDADES	METODO ESTANDAR ASTM/AASTHO	MC-30		RC-70		RC-250	
		MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
<b>FLUIDEZ:</b>							
Viscosidad Cinemática a 60°C, cSt	D 2170	30	60	70	140	250	500
<b>VOLATILIDAD:</b>							
Punto de Inflamación TAG, copa abierta, °C	D 3143	38	—	—	—	27	—
<b>DESTILACION:</b>							
% Volumen del Total Destilado hasta 360°C,							
a 190°C	D 402	—	—	10	—	—	—
a 225°C		—	25	50	—	35	—
a 260°C		40	70	70	—	60	—
a 316°C		75	93	85	—	80	—
% Vol. Residuo de la Destilación a 360°C,		50	—	55	—	65	—
<b>PRUEBAS AL RESIDUO DE LA DESTILACION:</b>							
Penetración a 25°C, 100 gr. 5 seg. 0.1mm	D 5	120	250	80	120	80	120
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	D 113	reportar		100	—	100	—
Solubilidad en tricloroetileno, % masa	D 2042	99	—	99	—	99	—
Gravedad Específica a 15.6/15.6°C	D 3142	reportar		reportar		reportar	
<b>CONTAMINANTES:</b>							
Contenido de Agua, % Volumen	D 95	—	0.2	—	0.2	—	0.2
<b>ADHERENCIA:</b>							
Revestimiento y Desprendimiento, %	D 1664	reportar		reportar		reportar	



Unidos<sup>(16)</sup> han establecido una nueva forma de evaluar a los asfaltos en función de sus propiedades físicas fundamentales y en base al clima y al tránsito imperante en la zona.

**(Ver Cuadro N°5: Especificaciones SUPERPAVE).**

Estas especificaciones se basan en la medida de las propiedades físicas de los asfaltos, que están estrechamente vinculadas con las principales formas de fallas de los pavimentos flexibles, tales como:

Deformaciones permanentes

Fisuramiento por Contracción Térmica

Fisuramiento por Fatiga

El programa de investigación sobre asfaltos SHRP es un nuevo sistema conocido como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). Fundamentalmente representa un sistema avanzado de especificaciones de los materiales componentes, diseños de mezclas, su análisis y la predicción del comportamiento de los pavimentos.

El nuevo sistema especifica a los asfaltos en base al clima y a la temperatura prevista en el pavimento. Las propiedades físicas exigidas se mantienen sin cambios, pero cambia la temperatura a la cual el ligante debe cumplir esas propiedades.

El grado de performance denominando PG que los clasifica, señala la temperatura máxima y mínima, dentro de las cuales las propiedades exigidas se mantienen adecuadas.

La temperatura a la cual los requerimientos deben cumplirse, es lo que diferencia a los grados de ligantes. Si un ligante es clasificado como PG 64-22, debe satisfacer los requerimientos de las propiedades físicas a altas temperaturas hasta 64°C y a bajas temperaturas hasta -22°C del pavimento.

Las nuevas especificaciones de los SUPERPAVE han sido normalizadas según AASTHO MP1 y son de aplicación también para los ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS<sup>(2)</sup>.

**CUADRO N°5**  
**ESPECIFICACION SUPERPAVE DE LIGANTES ASFALTICOS**  
**Especificación del Grado de Performance del Ligante (MP1)**

Grado de Performance	PG 52							PG 58					PG 64					PG 70			
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28
Temperatura de diseño del pavimento promedio 7 días máximo, °C <sup>a</sup>	<52							<58					<64					<70			
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C <sup>a</sup>	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28
Ligante Original																					
Temperatura del Punto de Inflamación, T 48: mínimo, °C	230																				
Viscosidad ASTM D 4402: <sup>b</sup> máximo, 3 Pa.s (3000 cP) Temperatura de Ensayo, °C	135																				
Cizallamiento Dinámico, TP5: <sup>c</sup> G*/senodelta, (mínimo 1,00 kPa) Temperatura de ensayo @ 10 rad/seg, °C	52							58					64					70			
Residuo del Ensayo de Película Delgada Rotatoria (T 240) o Película Delgada (T 179)																					
Pérdida de masa, máximo, %	1																				
Cizallamiento Dinámico, TP5: <sup>c</sup> G*/senodelta, (mínimo 2,2 kPa), °C Temperatura de ensayo @ 10 rad/seg, °C	52							58					64					70			
Residuo de la Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV)																					
Temperatura de Envejecimiento PAV, °C <sup>d</sup>	90							100					100					100(110)			
Cizallamiento Dinámico, TP5: <sup>c</sup> G*/senodelta, (máximo 5000 kPa), °C Temperatura de ensayo @ 10 rad/seg, °C	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	28	25	22	19	16	34	31	28	25
Reporte																					
Endurecimiento Físico: <sup>e</sup> Módulo de Rigidez, TP1: <sup>f</sup> S (máximo 300 MPa), °C Valor m, mínimo 0,300 Temperatura de ensayo @ 60 seg, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18
Tensión Directa, TP3: <sup>f</sup> Deformación en la falla mínimo 1,0% Temperatura de ensayo @ 1,0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18

**Notas:**

- <sup>a</sup> Temperaturas de pavimentos pueden ser estimadas de la temperatura de aire usando un algoritmo contenido en el software del programa SUPERPAVE o puede ser proporcionado por las especificaciones de la agencia o siguiendo los procedimientos señalados en PPX.
- <sup>b</sup> Este requerimiento puede ser obviado a criterio de la agencia si el proveedor garantiza que el ligante asfáltico puede ser adecuadamente bombeado y mezclado a temperaturas según los estándares de seguridad.
- <sup>c</sup> Para el control de calidad de la producción de los cementos asfálticos no modificados, medidas de la viscosidad del cemento asfáltico original puede ser sustituida por la medida del cizallamiento dinámico de G\*/sindelta a la temperatura de ensayo donde el asfalto es un fluido Newtoniano. Cualquier estándar conveniente para medir la viscosidad puede ser usado, incluyendo capilares o viscosímetro rotacional (AASHTO T 201 o T 202).
- <sup>d</sup> La temperatura de envejecimiento del PAV esta basada en las condiciones climáticas simuladas y es una de las tres temperaturas 90°C, 100°C o 110°C. La temperatura de envejecimiento del PAV es 100°C para PG 58 - y por encima, excepto en climas desérticos, donde ésta es de 110°C.
- <sup>e</sup> Dureza Física -TP 1 es realizada en un set de vigas de asfalto excepto que el tiempo es extendido a 24 horas +/- 10 minutos a 10°C por encima de la temperatura realizada. La rigidez a las 24 horas y el valor de m son reportados sólo para propósitos de información.
- <sup>f</sup> Si el Módulo de Rigidez es por debajo de 300 MPa, la prueba de Tensión Directa no es requerida. Si el Módulo de Rigidez está entre 300 y 600 MPa, la Tensión Directa puede ser usada en lugar del Módulo de Rigidez. El valor de m debe satisfacerse en ambos casos.

## **2.2. LOS POLIMEROS**

### **2.2.1. DEFINICION DE POLIMEROS**

Los polímeros o macromoléculas son compuestos de estructura molecular grande, de alto peso molecular, que están formados por la unión covalente de muchas unidades simples llamadas monómeros.

### **2.2.2. CARACTERISTICAS BASICAS DE LOS POLIMEROS**

Las características básicas de los polímeros, como estructura, peso molecular, enlaces, transiciones de fase y solubilidad, se detallan brevemente a continuación.

#### **2.2.2.1. ESTRUCTURA**

Los polímeros presentan dos características básicas<sup>(23)</sup>: estructura química y distribución del peso molecular. Estas dos características determinan todas las propiedades de los polímeros. De modo directo, ellas determinan fuerzas cohesivas, densidad de empaquetamiento (cristalinidad), movilidad molecular (transiciones de fase). De modo indirecto ellas controlan la morfología y fenómenos de relajación. La estructura química comprende:

La naturaleza de las unidades de repetición.

La naturaleza de los grupos terminales.

La composición de las posibles ramificaciones y redes entrelazadas.

La naturaleza de los defectos en la secuencia estructural.

La molécula del polímero consiste de un esqueleto que puede ser lineal, ramificado o reticulado con grupos de átomos periféricos. Cuando el esqueleto del polímero es lineal, se tienen los polímeros de cadena lineal, que se dividen en dos clases: polímeros de homocadena que contienen átomos de carbono en la cadena principal y son obtenidos por polimerización de adición o reacción en cadena, y los polímeros de heterocadena que pueden contener otros átomos como parte de la cadena, son obtenidos por polimerización de condensación o reacción por etapas.

Los copolímeros pueden ser distinguidos en injertados, alternados, en bloque, etc., en función de la posición de cada monómero en la cadena del polímero.

Los polímeros obtenidos por polimerización o por condensación de monómeros bifuncionales deben ser lineales, más la polimerización por adición puede generar ramificaciones cortas y largas, generando los polímeros ramificados. Estas ramificaciones afectan las propiedades mecánicas de los polímeros.

#### **2.2.2.2. PESO MOLECULAR**

El alto peso molecular de los polímeros es responsable de muchas de las propiedades que los hacen valiosos como una clase de materiales. Los polímeros están constituidos por cadenas de diferentes tamaños, lo que da lugar a una distribución en los tamaños de cadena, y por lo tanto, de los pesos moleculares.

Las propiedades de los polímeros son afectadas por el peso molecular medio y también por la forma y extensión de la distribución del peso molecular. Por ejemplo, la resistencia a la tracción y al impacto son gobernadas por las moléculas pequeñas.

Por otra parte, la viscosidad es función del peso molecular medio. El peso molecular medio puede ser determinado por osmometría de presión de vapor y la distribución del peso molecular puede ser determinada por cromatografía por permeación en gel<sup>(24)</sup>, entre otras técnicas.

#### **2.2.2.3. ENLACES**

Generalmente, las grandes moléculas (macromoléculas) de los polímeros tiene enlaces covalentes, mientras que las moléculas o segmentos de las mismas macromoléculas se atraen entre sí por fuerzas intermoleculares, llamadas también secundarias (de Van der Waals, puentes Hidrógeno, etc.).

Los enlaces covalentes se caracterizan por altas energías, de 35 a 150 Kcal/mol, por distancias interatómicas cortas, de 0.11 a 0.16 nm, y por ángulos relativamente constantes entre enlaces sucesivos<sup>(24)</sup>

Las fuerzas secundarias son más difíciles de caracterizar debido a que operan entre moléculas o segmentos de las mismas macromoléculas, más que entre un par de átomos. Estas fuerzas aumentan en presencia de grupos polares y disminuyen al aumentar la distancia entre moléculas.

#### 2.2.2.4. TRANSICIONES DE FASE

Moléculas simples pueden presentarse en tres estados: gaseoso, líquido y sólido. Los cambios de fases son transiciones de primer orden asociadas al equilibrio termodinámico y corresponden a variaciones de entalpía y volumen. En el caso de los polímeros la situación es más compleja. Los polímeros no se pueden evaporar, pues se descomponen antes de la ebullición. En el estado sólido, los polímeros son en general parcial o bastante amorfos, solo algunos polímeros son puramente cristalinos. En el estado líquido los polímeros son muy viscosos<sup>(23)</sup>.

Para muchos polímeros hay una sola temperatura a la cual comienza el movimiento de los segmentos, se denomina la temperatura de transición vítrea, **T<sub>g</sub>**, conocida como transición de segundo orden. Por debajo de esta temperatura, el volumen libre es semejante para todos los polímeros.

De modo semejante, para aquellos polímeros que cristalizan en cierto grado, hay una sola temperatura de fusión, **T<sub>m</sub>**, por encima de esta temperatura el polímero puede ser líquido, viscoelástico, o gomoso de acuerdo a su peso molecular.

Sin embargo, tanto en las fases cristalinas como en las amorfas pueden ocurrir rearrreglos adicionales o procesos de relajamiento. Generalmente estos no originan cambios obvios en las propiedades. Como la cristalinidad depende parcialmente de la regularidad, más no de la **T<sub>g</sub>**, es concebible que algunos copolímeros puedan estar en estado vítreo antes de que cristalicen. Este es el caso de los copolímeros del etileno-propileno con proporción equimolar aproximada. Para los materiales parcialmente cristalinos, **T<sub>m</sub>** es siempre mayor que **T<sub>g</sub>**, y la diferencia es máxima para los homopolímeros<sup>(24)</sup>.

### **2.2.2.5. PARAMETROS DE SOLUBILIDAD**

La primera etapa del proceso de solubilización de un material polimérico por un buen solvente es el hinchamiento.

De acuerdo con el concepto de Hildebrand<sup>(12)</sup>, el polímero se disuelve si los valores  $\delta$  (parámetro de solubilidad) del polímero y el solvente son semejantes.

La disolución de un polímero en un líquido de bajo peso molecular hace que la hélice desordenada se expanda y ocupe un volumen mayor del que ocuparía cuando no está en solvente y en el estado amorfo. Si el polímero está compuesto de cadenas individuales, puede haber flujo viscoso y la viscosidad aumentará a medida que el polímero se expanda. Si el polímero tiene una red entrelazada, no se obtendrá solución, pero las partes individuales de las cadenas del polímero, por ejemplo segmentos del polímero, pueden solvatare para dar un gel hinchado.

### **2.2.3. POLIMEROS MODIFICADORES DE ASFALTOS**

La búsqueda de un mejor desempeño de los ligantes asfálticos utilizados en pavimentación, llevó al estudio de varios materiales macromoleculares o polímeros en combinación con materiales bituminosos y cementos asfálticos de petróleo.

Debido al impacto positivo en las propiedades de los pavimentos, como su inherente resistencia a las fallas por fatiga y deformación permanente junto con su característica de impermeabilidad, ciertos polímeros han logrado un rol importante en el futuro de los pavimentos y su mantenimiento, y es por esto que en la actualidad a varios de ellos se les encuentra como productos comerciales para esta aplicación.

### **TIPOS DE POLIMEROS MODIFICADORES DE ASFALTOS**

No todos los polímeros pueden ser utilizados para modificar asfaltos, pues no todos se comportan igual. Algunos polímeros tienen adecuadas propiedades para altas temperaturas, otros en cambio tienen adecuadas propiedades para bajas temperaturas. Pero existen los polímeros premium que exhiben adecuadas propiedades para ambas condiciones: altas y bajas temperaturas.

En el mercado de los polímeros modificadores de asfaltos tenemos dos grupos:

- POLIMEROS PLASTOMEROS
- POLIMEROS ELASTOMEROS

Sin embargo, algunos autores consideran un **tercer grupo**<sup>(12)</sup> al que pertenecen los **cauchos recuperados de neumáticos**, y que también se describirán.

### 2.2.3.1. POLIMEROS PLASTOMEROS

Poliétileno, polipropileno, policloruro de vinilo (PVC), copolímeros del etileno tales como el EVA, copolímero del etileno y metil acrilato (EMA) y copolímero del etileno y acrilato de butilo (EBA), son usados en aplicaciones para pavimentación.

Los copolímeros del etileno son macromoléculas ramificadas, obtenidas por polimerización vía radicales libres a alta presión del etileno con un co-monómero.

La **fig. 7** muestra la termoreversibilidad de los copolímeros de etileno que son descritos como semi cristalinos. Los bloques del polietileno cocrystalizan y forman áreas que actúan como nudos para uniones cruzadas y llevan a la vulcanización.

La cristalinidad está directamente relacionada con el contenido del monómero. Los fenómenos de cristalización y fusión (como en la vulcanización y desvulcanización) son termoreversibles.

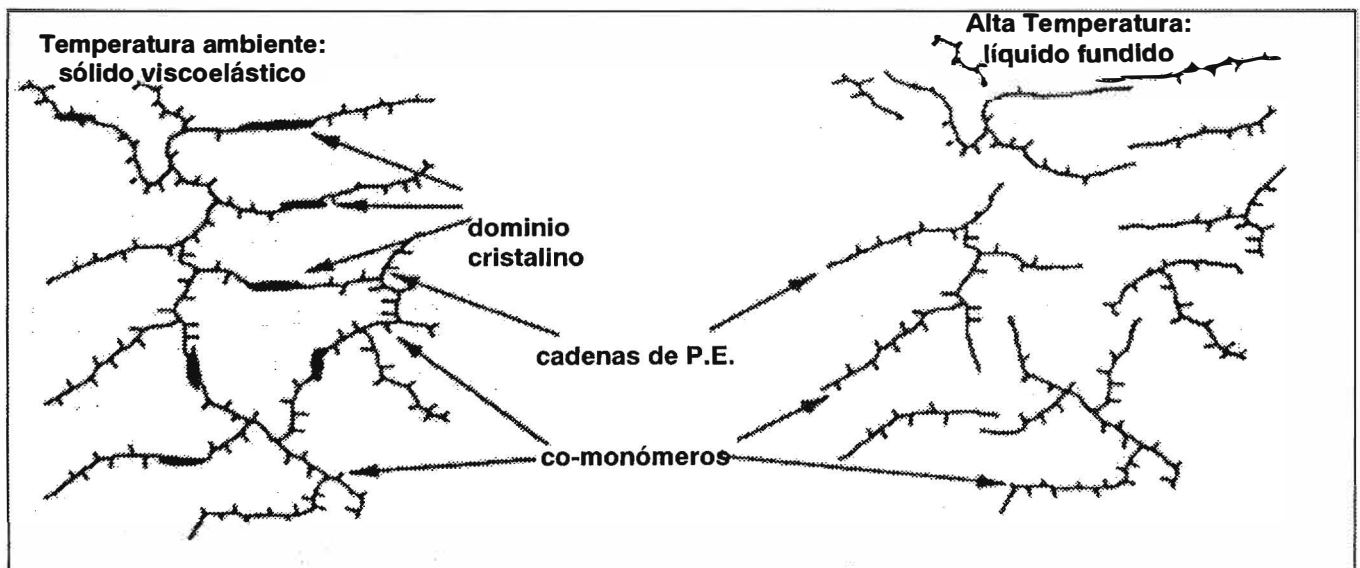


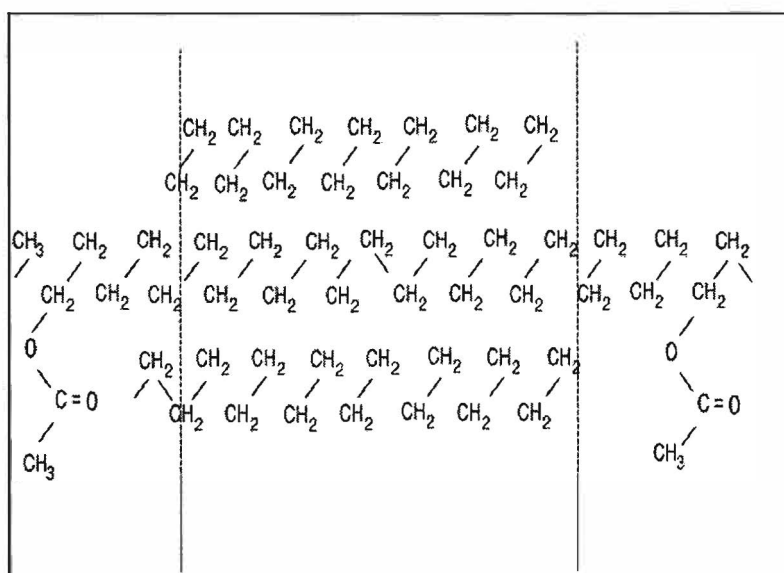
FIGURA 7

ESQUEMA DE TERMOREVERSIBILIDAD DE LOS COPOLIMEROS DEL ETILENO<sup>(25)</sup>

A continuación se describe más detalladamente algunos polímeros plastómeros comúnmente utilizados:

### a. EVA

Es un copolímero de etileno y acetato de vinilo, cuya composición puede variar desde un mínimo de acetato hasta cerca de 50%. De acuerdo con esta proporción, las propiedades varían desde un termoplástico muy semejante al polietileno de baja densidad hasta un elastómero. Los segmentos de etileno son semicristalinos, mientras que los que contienen grupos de acetato constituyen la fase amorfa<sup>(25)</sup>, conforme a la **fig.8**. En estos copolímeros, la reducción de acetato trae como consecuencia el aumento de la cristalinidad, y como consecuencia del módulo de rigidez, de las temperaturas de ablandamiento y de fusión, y la disminución de la temperatura de fragilidad.



**FIGURA 8**  
**CONFORMACION PLANAR DE LAS MOLECULAS DE EVA<sup>(25)</sup>**

El EVA se solubiliza en fracciones saturadas debido a su naturaleza alifática, en virtud de la existencia de secuencias etilénicas de elevado peso molecular, modificando el drenaje del material.

Sus mayores ventajas son la resistencia a la flexión y la estabilidad térmica, además de un costo razonable.



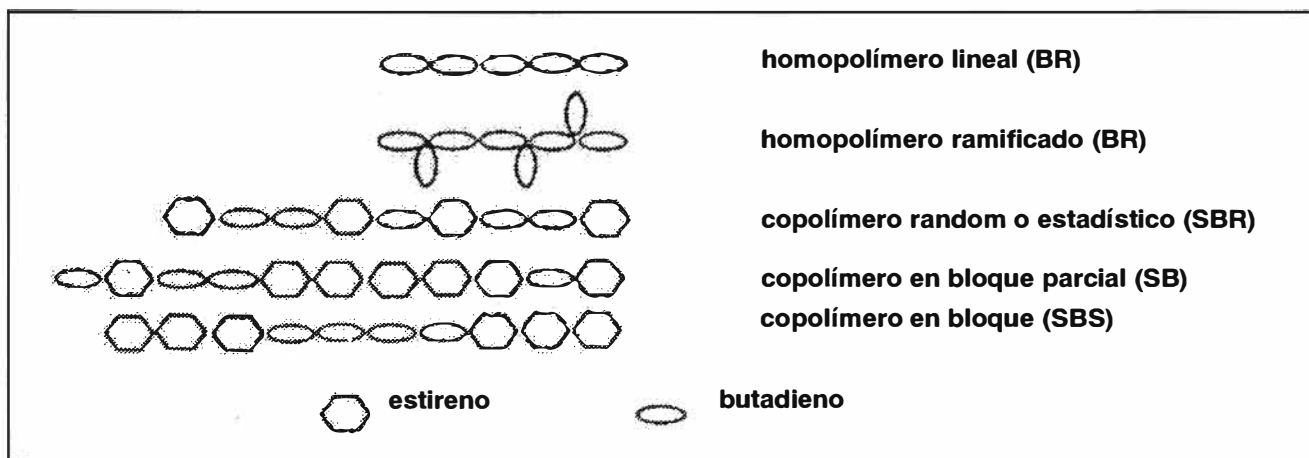
## b. LPE

El polietileno lineal, así como el EVA, fluye irreversiblemente cuando deja de ser sometido a una tensión cizallante. El LPE presenta una conformación plana en zig-zag, regularidades de cadena que propician alta cristalinidad. En la práctica, mezclas de polietileno y polipropileno isotáctico con diversos tipos de asfalto tienden rápidamente a la separación de fases, como consecuencia da lugar al deterioro de las propiedades<sup>(26)</sup>.

### 2.2.3.2. POLIMEROS ELASTOMEROS

La modificación de los Cementos Asfálticos con elastómeros dan lugar a ligantes conocidos como elastoméricos. En general consisten de una mezcla física, más pueden también ocurrir encadenamientos cruzados. Varios tipos de homopolímeros y copolímeros pueden ser usados. Los más comunes son copolímeros SBR, copolímeros en dibloques SB o tribloques SBS. Los tribloques pueden ser lineales o ramificados o parcialmente hidrogenados SEBS. Otros ejemplos son también los copolímeros del estireno isopreno SIS, terpolímeros EPDM, policloroprenos y polímeros SBS carboxilados<sup>(25)</sup>. La siguiente figura muestra una representación de varios elastómeros.

**FIGURA 9. REPRESENTACION DE VARIOS ELASTOMEROS<sup>(25)</sup>**



La temperatura de transición vítrea de los polímeros hidrogenados se sitúa encima de la temperatura ambiente, debido a la saturación de los dobles enlaces del polibutadieno. Las macroestructuras de los copolímeros ramificado y lineal tienen efecto en el comportamiento reológico de las mezclas con asfalto.

Los copolímeros parcialmente en bloques SB, pertenecen a un grupo de copolímeros que pueden variar de dibloques a estructuras complejas, donde los bloques puros y secciones de

monómeros coexisten distribuídas en ramificaciones. Desde el punto de vista reológico, el SB se comporta entre el SBR y SBS. La estructura en bloque puede producir un sistema bifásico similar al SBS, más las fases no son lo suficientes para garantizar el comportamiento del caucho vulcanizado. En tanto, este comportamiento puede ser conseguido por la aplicación de un proceso de vulcanización convencional. La presencia de los bloques de estireno en el SB significa mejores propiedades termoplásticas que el SBR<sup>(25)</sup>.

A continuación se describe más detalladamente algunos de los principales polímeros elastómeros utilizados en la modificación de asfaltos:

#### **a. SBS/SIS**

Son copolímeros en bloque del estireno y butadieno o estireno e isopreno. Poseen las características de los elastómeros termoplásticos, o sea son materiales que fluyen libremente cuando son calentados, además, de presentar buenas propiedades de resistencia mecánica y de resiliencia cuando están a temperatura ambiente. Esto se debe a la morfología de esos polímeros que muestran una tendencia a la incompatibilidad entre los bloques de estireno y dieno, y que resultan en una matriz de dieno, en que los dominios de poliestireno están dispersos. Estos dominios actúan como centros de fuerzas de anclaje, de la misma manera que los encadenamientos cruzados en el caucho vulcanizado. Además de estas propiedades, los copolímeros de SBS y SIS presentan propiedades de fluidez superiores cuando se mezclan con asfalto lo que es altamente favorable, por no haber un aumento significativo de la viscosidad<sup>(25)</sup>.

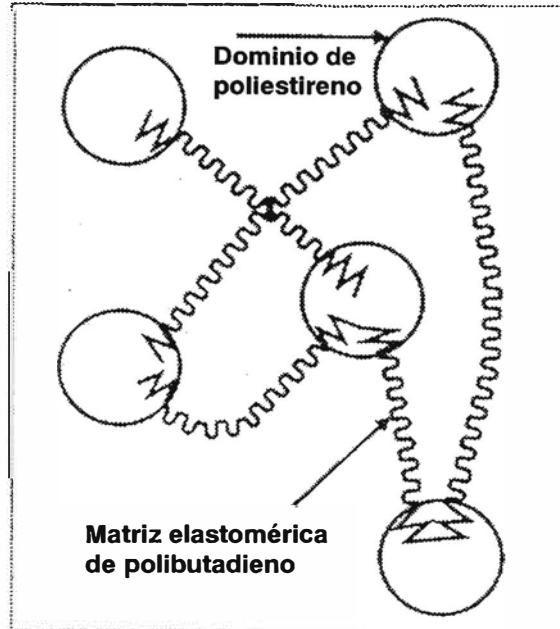
La conformación espacial del SBS está formada de dos regiones distintas<sup>(25)</sup>, llamadas microdominios de estirénicos y butadiénicos donde ocurre la microseparación de fases. A temperatura ambiente estos microdominios son incompatibles, conforme a lo observado en la **fig. 10**.

Las esferas son los microdominios estirénicos y las cadenas los microdominios butadiénicos. El SBS posee un comportamiento elastomérico, pues los microdominios estirénicos actúan como puntos de reticulación. Cuando el SBS es disuelto en un cemento asfáltico apropiado, una porción estirénica será solvatada por los compuestos aromáticos del asfalto, formando un gel estabilizado, en que la secuencia butadiénica mantiene la estructura en cierta conformación

espacial. De ahí que proporciona las propiedades reológicas mejoradas de este material en relación al cemento asfáltico no modificado.

Existen diversos tipos de copolímeros en bloque de estireno y butadieno, siendo los más

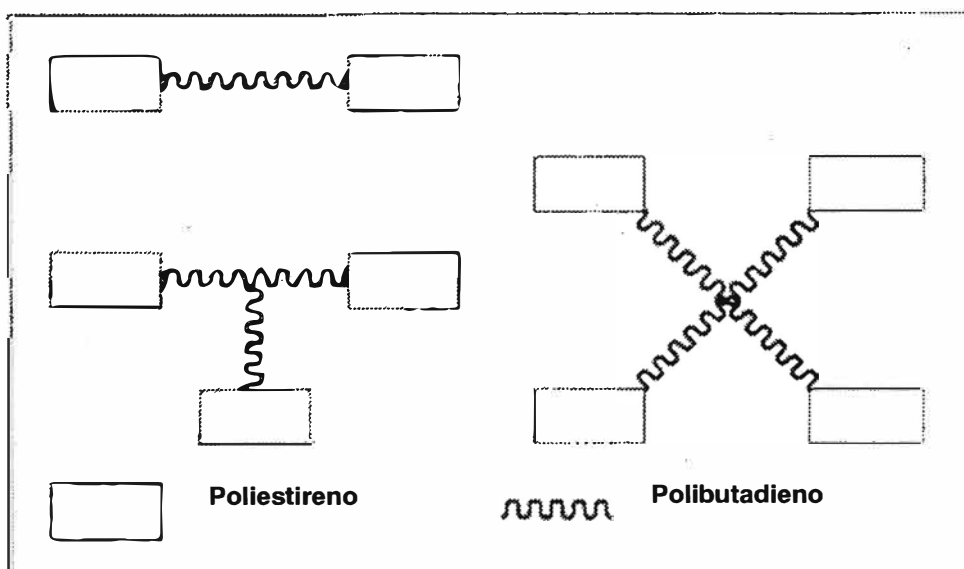
**FIG. 10. ESTRUCTURA DEL ELASTOMERO TERMOPLASTICO SBS<sup>(7)</sup>**



significativos los lineales y los ramificados, tal como se muestra en la **fig. 11**.

Para los pesos moleculares iguales, los copolímeros ramificados tienen viscosidades bastante inferiores a la de los lineales. Considerando que la viscosidad es un factor limitante para el drenaje de las mezclas asfalto/polímero cuando se utiliza el polímero ramificado, se puede

**FIG. 11. CAUCHOS TERMOPLASTICOS LINEALES Y RAMIFICADOS<sup>(7)</sup>**



trabajar a una adecuada viscosidad con polímeros de peso molecular más alto, o que garanticen propiedades físicas más interesantes<sup>(25)</sup>.

#### **b. SBR**

Son copolímeros aleatorios de estireno butadieno, obtenidos principalmente por proceso de polimerización en emulsión. Presentan propiedades elastoméricas de resiliencia y buena compatibilidad con los asfaltos. Sus propiedades mecánicas son intrínsecamente bajas, pero pueden ser grandemente mejoradas con una vulcanización que es conseguida por la reacción con el azufre o peróxidos. El proceso de preparación de SBR en emulsión, produce un polímero finamente dividido, en forma de un látex, que facilita su dispersión en el asfalto. La técnica de dispersión del látex puede también ser utilizada a partir del caucho natural.

#### **c. EPDM**

Son copolímeros del etileno, propileno y un dieno. Presentan buena resistencia al oxígeno, al ozono, al calor y a la luz, además de presentar buenas propiedades mecánicas de flexibilidad al frío. La compatibilidad en relación al asfalto dependerá mucho de la composición del asfalto.

### **2.2.3.3. CAUCHOS RECUPERADOS DE NEUMATICOS**

Razones económicas ligadas al alto costo de polímeros, asociadas al problema real de eliminación de neumáticos inservibles para vehículos conducen a la tentativa de modificar las propiedades del asfalto con cauchos recuperados de neumáticos. Como el caucho de neumáticos es vulcanizado, características tales como solubilidad y el hinchamiento son diferentes a los cauchos no vulcanizados. En países como Estados Unidos utilizan caucho recuperado de neumáticos en cemento asfáltico, en concentraciones que varían de 5 a 30%, en mezclas densas y abiertas, principalmente en revestimientos superficiales, más también en membranas absorbedoras de tensión. Las experiencias realizadas han demostrado mejora en la resistencia a la fatiga, a la deformación permanente y mayor durabilidad<sup>(27)</sup>.

Además de los polímeros descritos, en el **cuadro n°6** se presenta la relación de polímeros de interés en pavimentación, así como los nombres del fabricante y los nombres comerciales.

**CUADRO N°6**  
**POLÍMEROS USADOS EN MODIFICACIÓN DE ASFALTOS<sup>(28)</sup>**

<b>Polímero</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Nombre Comercial</b>
Caucho recuperado de neumáticos	GRF 80	Rouse Rubber
Caucho recuperado de neumáticos	IGR	Baker
Caucho recuperado de neumáticos	Envirotire, Inc	Pluaride II
Copolímeros del etileno	DuPont	Elvaloy
Copolímeros del etileno	ARE, Inc	Starflex
Copolímeros del etileno	ARE, Inc	Modiflex
Copolímeros del etileno	Exxon Chemical	Polybilt
Copolímeros en bloque estirénicos	Dexco Polymers	Vector
Copolímeros en bloque estirénicos	Shell	Kraton
EPDM	Huls	Vestoplast
EVA	DuPont	Elvax
LPDE	Adv. Asphalt Tech.	Novophalt
PE funcionalizado	Eastman	Finaprene
Poliamina (mejorador de adhesión)	Morton Int.	Pave Bond
Polibutadieno	Goodyear	UP-5000
Policloropreno látex	DuPont	Neoprene
SBR	Goodyear	UP-70, UP7289,...
SBR	Rub-R-road	R-504, R-550
SBR	BASF	Butonal
SBS	Ergon	Sealo-flex
SBS	Enichem	Europrene Solt
SBS	FINA	---

### **2.3. MODIFICACION DE ASFALTOS POR INCORPORACION DE POLIMEROS**

Los requisitos impuestos a los ligantes para su uso en pavimentación permite establecer el perfil del ligante ideal, el cual debería ser poco susceptible a la temperatura, así mismo poco susceptible en relación a los tiempos de carga, además de ofrecer elevada resistencia a la deformación permanente, a la ruptura y a la fatiga.

Paralelamente, debe mantener las buenas propiedades de adhesión de los ligantes convencionales y mejorar la resistencia al envejecimiento, tanto durante la aplicación como durante su uso en los pavimentos.

### **2.3.1. LA INCOMPATIBILIDAD ENTRE EL POLIMERO Y EL ASFALTO, PRINCIPAL PROBLEMA EN LA BUSQUEDA DE LA FORMULACION IDEAL**

Al referirse a los problemas comunes que existen en la búsqueda de la formulación ideal, se puede pensar que estos están en la determinación errónea de los parámetros que influyen principalmente en la mezcla, sin embargo el principal motivo de los problemas en la performance de la mezcla, es la **INCOMPATIBILIDAD** entre el polímero y el asfalto, dando como resultado la **SEPARACION DE FASES**, y por consiguiente errores en la determinación de los parámetros de mezcla.

#### **2.3.1.1. SEPARACION DE FASES**

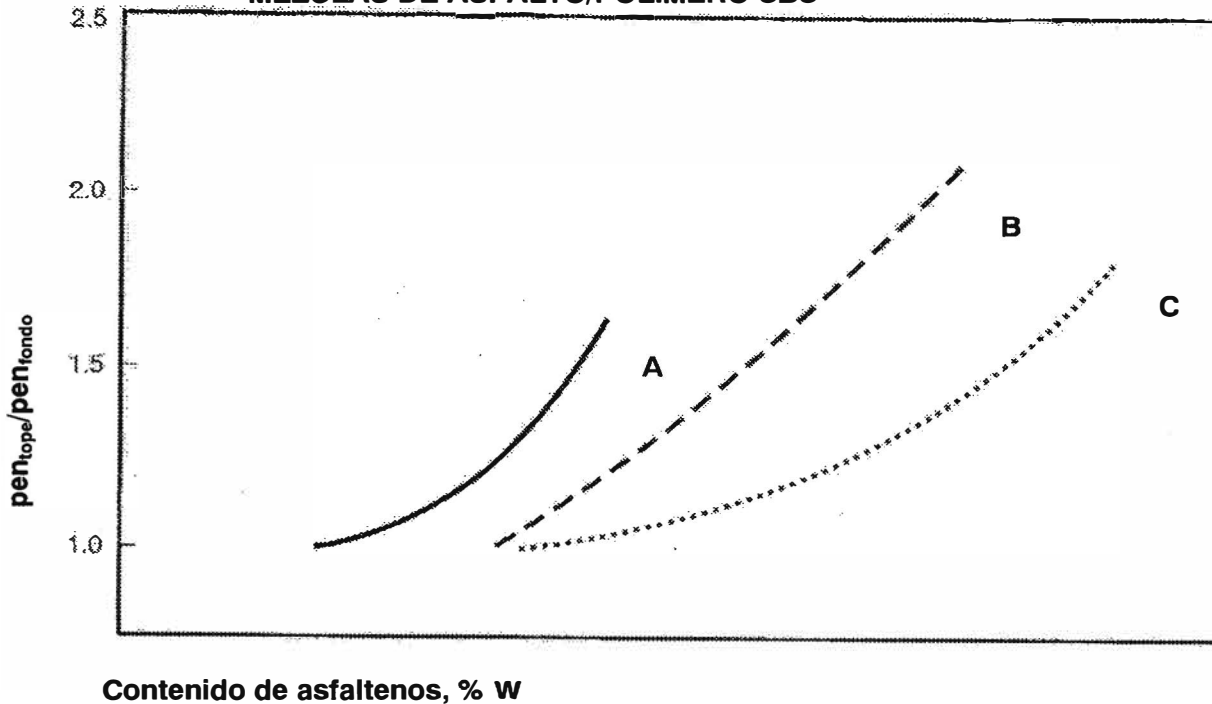
Los polímeros y los asfaltos tienen una tendencia a separarse y cuando esto sucede el polímero generalmente va al tope del tanque y el asfalto queda en el fondo del mismo. El real desafío por consiguiente, es mantenerlos almacenados en una mezcla homogénea hasta que puedan ser usados.

La separación de fases puede ser demostrada en una simple prueba de estabilidad al almacenamiento, donde una mezcla de asfalto con polímero es colocada en un tubo de aluminio, el cual es mantenido a una temperatura de 163°C por un período de 48 horas; concluido este periodo se evalúa el punto de ablandamiento de las porciones del tope y fondo del tubo (aunque algunos evalúan además del punto de ablandamiento, la viscosidad y la penetración). Si dichas propiedades son esencialmente iguales, se habrá logrado una buena dispersión del polímero en el asfalto dando lugar a una mezcla compatible, de lo contrario la muestra será incompatible.

La compatibilidad entre el polímero y el asfalto depende del tipo de polímero que se trate, de la composición química del asfalto y el proceso utilizado para su preparación y es la pieza clave para asegurar que cada una de las propiedades del asfalto modificado se dan en toda su extensión.

En el siguiente caso, la relación de  $pen_{top}/pen_{fondo}$  fue utilizada para demostrar si se da lugar o no la separación de fases. Ver la **fig. 12**, donde A, B y C representan tres muestras de distintos asfaltos.

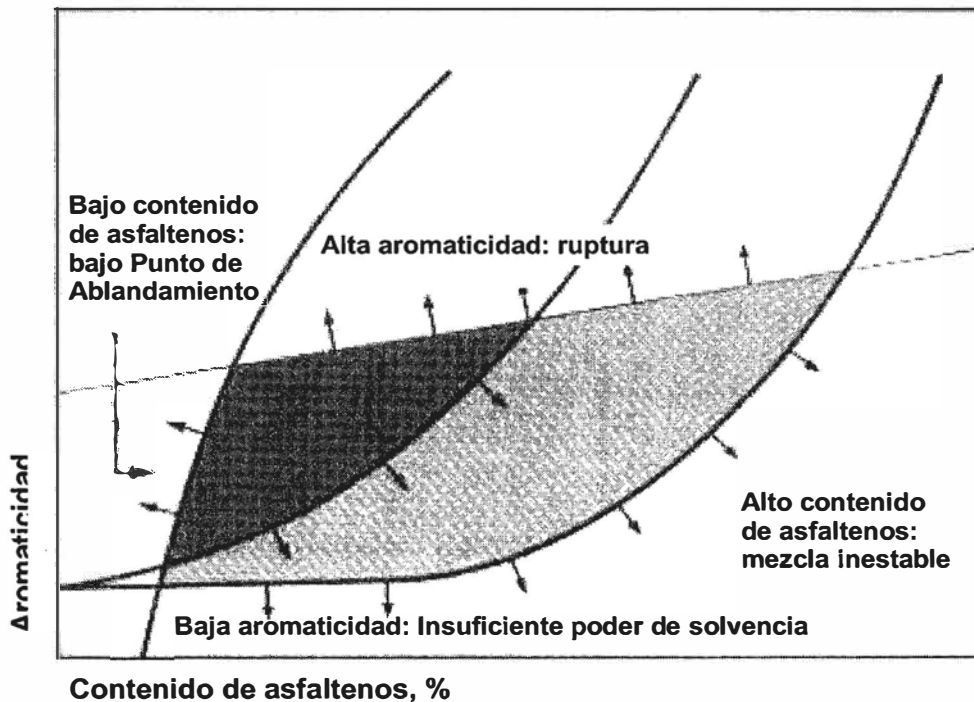
**FIGURA 12 EFECTO DEL CONTENIDO DE ASFALTENO EN LA RELACION DE  $pen_{tope}/pen_{fondo}$  DESPUES DEL ALMACENAMIENTO EN CALIENTE EN MEZCLAS DE ASFALTO/POLIMERO SBS<sup>(7)</sup>**



La estabilidad de un sistema depende de muchos factores, como la cantidad y tamaño de asfaltos y las moléculas de polímeros, la estructura de polímero, la aromaticidad de la fase de maltenos, etc. En la **figura 13** puede observar que una alta aromaticidad debe ser evitada pues causa la ruptura de los dominios del poliestireno (SBS), los cuales resultan en un bajo punto de ablandamiento y baja resistencia al flujo. Un bajo contenido de aromáticos no contribuye a que el polímero sea suficientemente incorporado, lo cual también da como resultado una baja resistencia al flujo y por consiguiente un bajo grado de mejora.

El contenido de asfaltos puede ser cuidadosamente balanceado. Una cierta cantidad de asfaltos es requerido para formar asociaciones con el polímero, resultando una gran resistencia al flujo y puntos de ablandamiento más altos. Sin embargo, la cantidad de asfaltos debería no ser tan grande para evitar la separación de fases.

**FIGURA 13. INFLUENCIA DEL BALANCE ENTRE AROMATICIDAD Y CONTENIDO DE ASFALTENOS EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA ASFALTO/POLIMERO SBS<sup>(7)</sup>**



Obviamente, el contenido permisible de asfalteno depende del contenido de polímero, los pesos moleculares del polímero y los asfaltenos y de la aromaticidad. La **fig. 13** muestra el rol del asfalteno y la aromaticidad en términos cualitativos. El rango de bitumen adecuado para un bajo contenido de polímero está indicado por el área de color negro, un alto contenido de polímero en el bitumen es adecuado para el área ploma.

Si el contenido de asfalteno es cuidadosamente balanceado con el contenido de polímero la mezcla obtenida resultará estable, y por lo tanto se observará una fase continua y se logrará el máximo beneficio del polímero. Estas mezclas son llamadas **MEZCLAS COMPATIBLES**.

Existen también otros criterios para poder predecir la compatibilidad entre el asfalto y el polímero y evitar separación de fases. Por ejemplo, Constantínides<sup>(28)</sup>, realizó estudios con diferentes polímeros y asfaltos, en la búsqueda de establecer en función de la proporción de asfaltenos/resinas y saturados/aromáticos las zonas de compatibilidad.

La **figura 14** muestra el campo de compatibilidad del CAP con el polímero:



**Zona A.** Representa la composición del CAP que se compatibiliza bien con el 20% del copolímero del etileno-propileno.

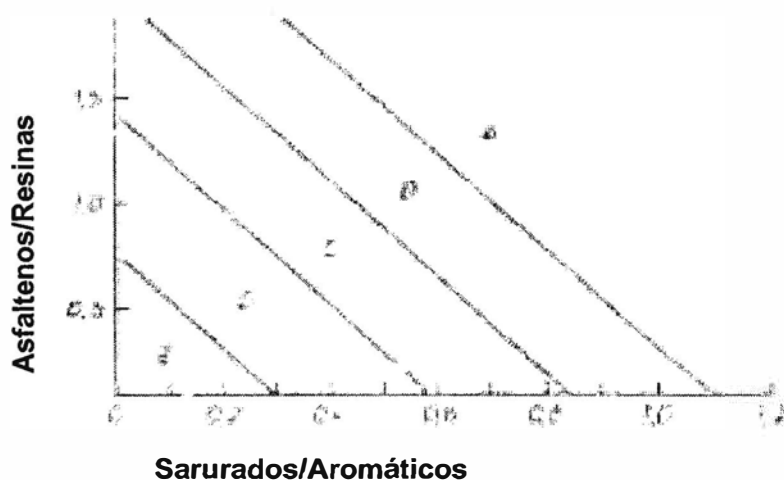
**Zona B.** Representa la composición del CAP que se compatibiliza bien con el 10% del polipropileno atáctico y el 10% del copolímero del etileno-polipropileno.

**Zona C.** Representa la composición del CAP que se compatibiliza bien con el 20% del polipropileno atáctico.

**Zona D.** Representa la composición del CAP que se compatibiliza bien con el 10% de SBS.

**Zona E.** CAP muy aromático para ser mezclado con polímero igualmente elastomérico.

**FIGURA 14. ZONAS DE COMPATIBILIDAD DEL CAP CON DIFERENTES POLIMEROS<sup>(28)</sup>**



Algunos estudiosos<sup>(28,29)</sup> afirman que los polímeros cuyos parámetros de solubilidad de Hildebrand se encuentran entre 7.6 y 8.6 son más compatibles con los asfaltos. Algunos ejemplos son:

Copolímeros de etileno y acetato de vinilo, EVA: 7.6

Copolímeros de etileno, propileno y un dieno, EPDM: 8.0

Copolímeros de butadieno-estireno, SBR: 8.3

Poliiolefinas: 7.8

Polisopreno, IR: 8.1

Polibutadieno, BR: 8.6

Los polímeros con parámetros de solubilidad de aproximadamente 7.6 mezclan bien con el asfalto rico en saturados, en tanto que los que se encuentran alrededor de 8.6 requieren asfaltos con elevado nivel de aromáticos.

Sin lugar a duda, la necesidad de la existencia de compatibilidad entre el polímero y el asfalto es uno de los factores principales, objeto de estudio para obtener la mezcla ideal, sin embargo la compatibilidad puede ser mejorada al incorporar aditivos compatibilizantes aromáticos y nafténicos, y manteniendo agitación continua.

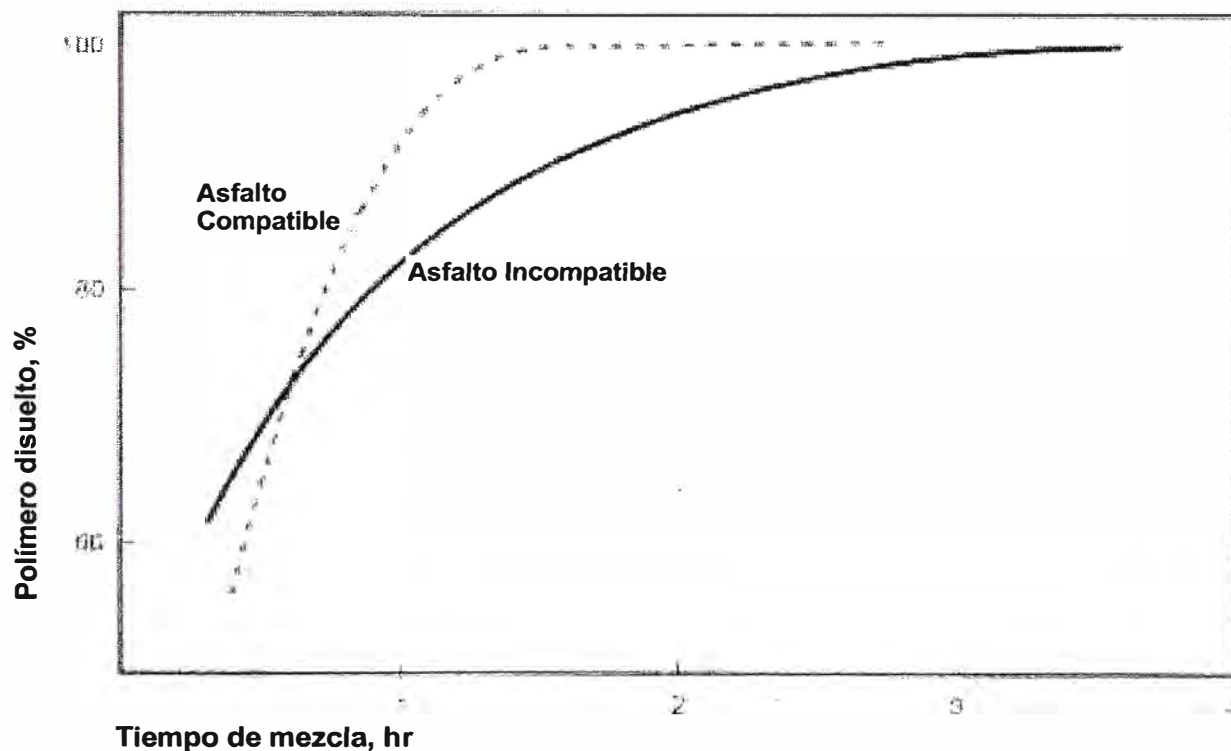
El uso de asfaltos compatibles ofrece un gran número de ventajas:

Durante la mezcla; menores tiempos, ver **fig. 15**.

Durante el almacenamiento: estabilidad, ver **fig. 13**.

Además de otorgar mejores condiciones de performance, respecto al asfalto convencional.

**FIG.15. CONDICION DE BAJO CIZALLAMIENTO PARA MEZCLA CON POLIMERO SBS<sup>(7)</sup>**



### 2.3.1.2. GELACION

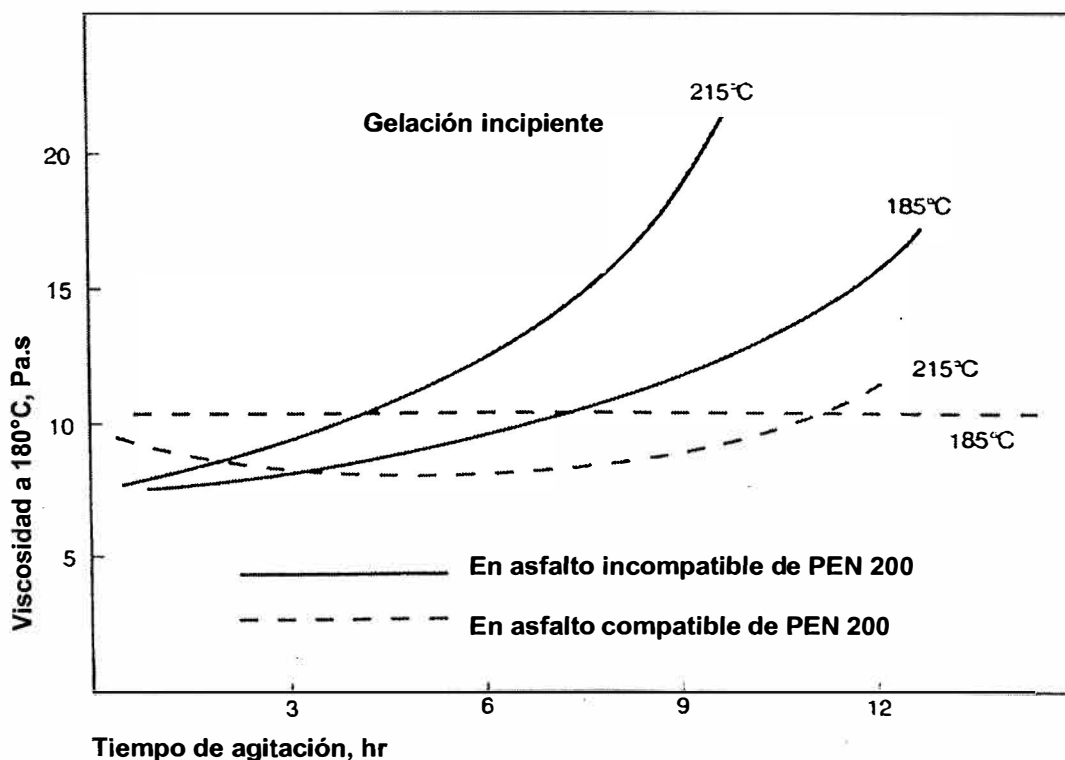
Todos los cauchos basados en butadieno están sujetos al riesgo de gelación causado por el encadenamiento cruzado, independiente de la presencia de oxígeno; además los elastómeros termoplásticos muy comúnmente utilizados para mezclas con asfaltos también son vulnerables.

Este encadenamiento cruzado puede resultar en un incremento considerable de la viscosidad de la mezcla, y en casos extremos esto puede provocar en el propio batch una infundible masa o gel. Por lo expuesto las altas temperaturas deben ser evitadas.

Independiente del proceso de gelación por el encadenamiento cruzado, los polímeros elastoméricos están sujetos a la gelación por oxígeno inducido y a reacciones indeseables, las cuales son aceleradas con altas temperaturas.

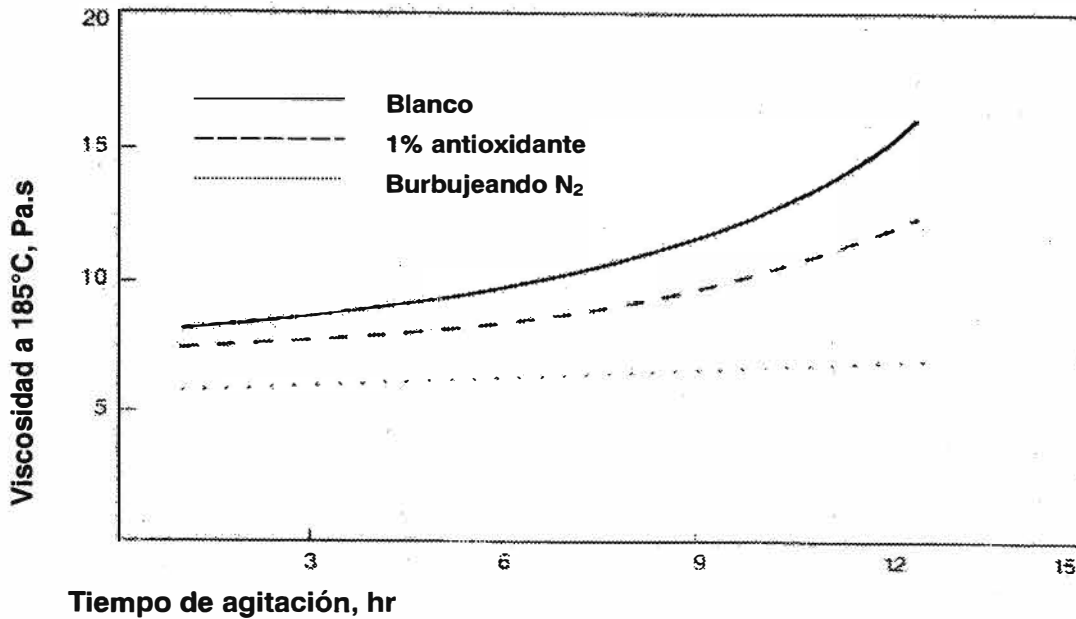
Los efectos de tiempo y temperatura de la mezcla del polímero y del asfalto pueden ser vistos en la **fig. 16**. El riesgo de gelación es claramente más grande a altas temperaturas. Esta figura también muestra como el asfalto elegido afecta la velocidad en la cual la gelación ocurre, esta es mucho menor con asfaltos compatibles.

**FIG. 16. VARIACION DE LA VISCOSIDAD EN LA MEZCLA DE ASFALTO DE PEN 200 CON POLIMERO SBS A ELEVADAS TEMPERATURAS<sup>(30)</sup>**



Algunas medidas que pueden reducir la tendencia de gelación incluye antioxidantes, los cuales para que sean efectivos deben añadirse al antioxidante propio del polímero en concentraciones por encima de 0.5%, resultando costoso. Sin embargo otra solución que resulta más efectiva y barata es de cubrir con un gas inerte como el nitrógeno el recipiente de mezcla. Ambos métodos se ilustran en la **figura 17**.

**FIG.17. ESTABILIDAD DEL POLIMERO SBS EN EL ASFALTO DE PEN 200 A 185°C <sup>(30)</sup>**



La limpieza de los equipos es también importante. Residuales en las paredes de los recipientes, en líneas o válvulas, etc., pueden tender a producir materiales gelados o asfalto coquizado, el cual puede actuar como agente nucleante para una futura gelación del polímero.

Sin embargo la gelación raramente ocurre en mezclas con bajo contenido de polímero, lo cual es usado en aplicaciones de pavimentos. Mezclas con alto nivel de polímero y/o asfalto incompatible con alto contenido de asfaltenos, necesitan especial atención, pero una buena práctica operacional podría prevenir la gelación en cada formulación<sup>(30)</sup>.

### 2.3.2. PREPARACION DE MEZCLAS DE ASFALTOS CON POLIMEROS

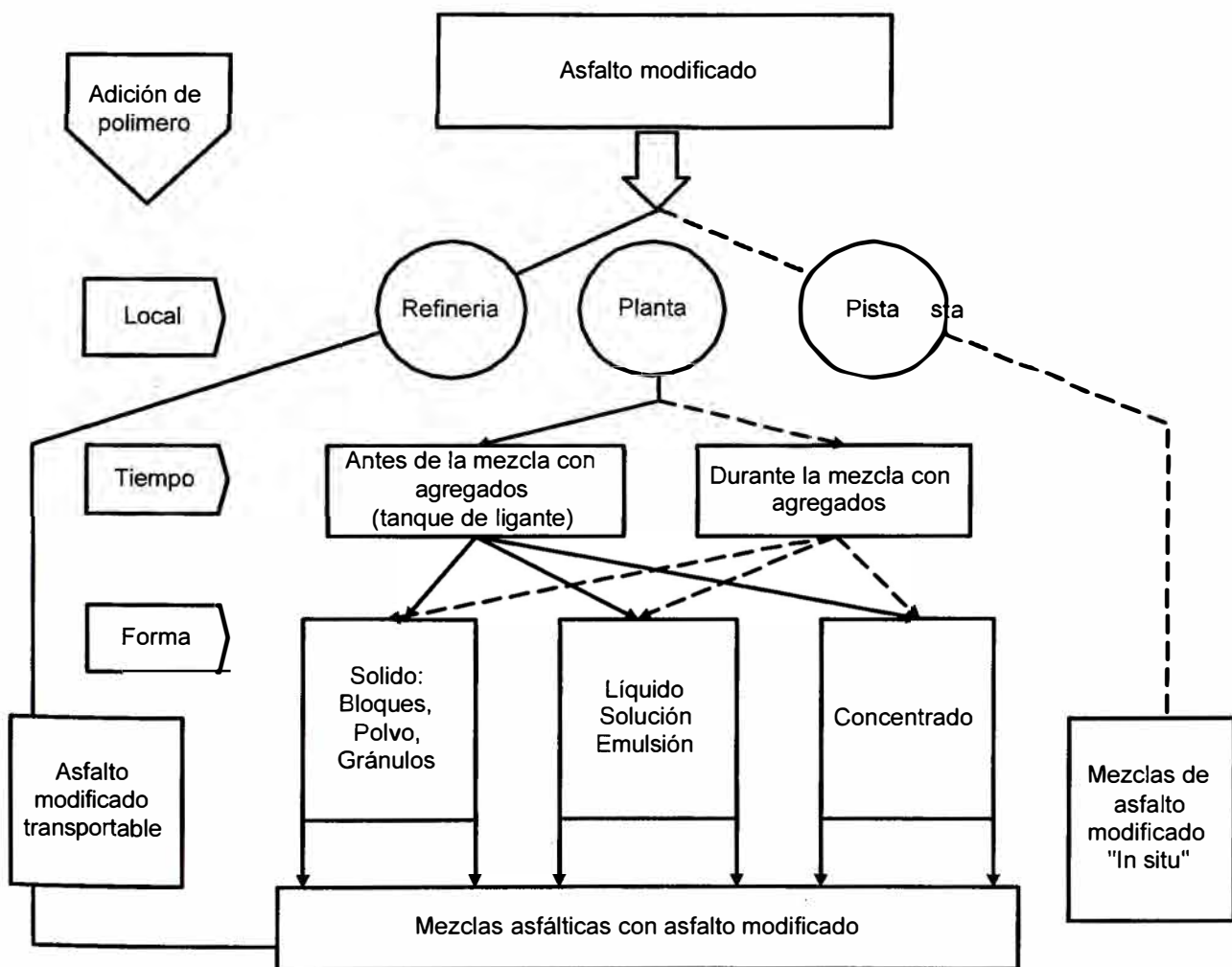
La incorporación del polímero puede darse de tres formas:

1. Producción del asfalto modificado en una fábrica de local separado y transporte del producto final a una planta de asfalto.
2. Preparación del asfalto modificado con un mezclador auxiliar en una planta de asfalto.
3. Incorporación del polímero directamente en la mezcla asfáltica durante el proceso de mezcla del asfalto con los agregados.

La producción en fábrica separada del lugar de operación significa un mejor control de calidad y mejor dispersión del polímero en el asfalto.

La segunda alternativa garantiza una mejor incorporación del polímero en el CAP que la tercera alternativa.

La **figura 18** resume varias alternativas de producción del asfalto modificado por polímeros<sup>(28)</sup>.



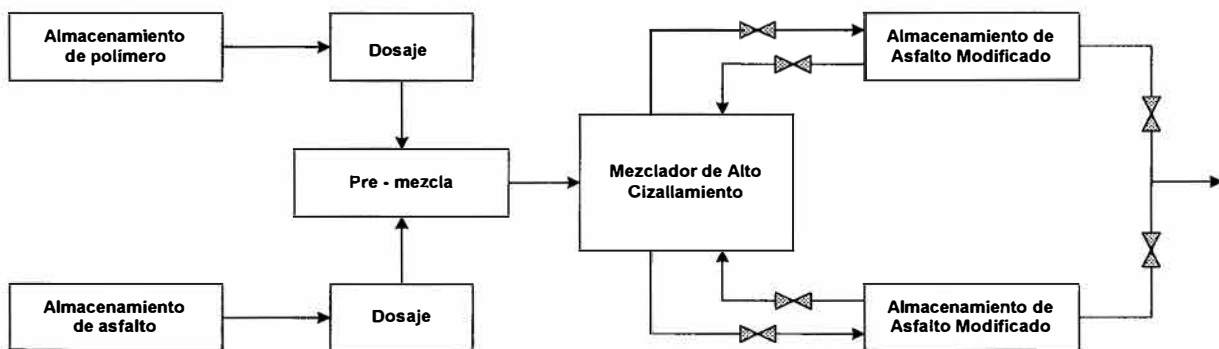
**FIGURA 18. ALTERNATIVAS DE PRODUCCION DE ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS**

### 2.3.2.1. PREPARACION DE ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS ELASTOMEROS

Varios tipos de equipos pueden ser utilizados, desde mezcladores de Bajo Cizallamiento o baja velocidad hasta mezcladores modernos de Alto Cizallamiento o Alta velocidad. El tiempo de mezcla dependerá del tipo de equipo utilizado.

La **figura 19** muestra un diagrama simplificado para la producción de Asfaltos Modificados con Polímeros Elastómeros Termoplásticos Estirénicos, donde el polímero puede ser añadido en forma de polvo, pellets o en forma de látex (SBR). El asfalto caliente y el polímero son pesados y colocados en un pre - mezclador de Bajo Cizallamiento para que el polímero sea distribuido a través del asfalto caliente. La duración y la temperatura de esta etapa son ajustadas para asegurar el hinchamiento del polímero.

La mezcla es luego transferida a un mezclador de Alto Cizallamiento donde el sistema asfalto - polímero alcanza adecuada dispersión y homogeneidad. Finalmente el asfalto modificado es transferida para el tanque. Si la dispersión de la mezcla final es inadecuada, un sistema de válvulas será usado para recircular la mezcla al agitador de Alto Cizallamiento.



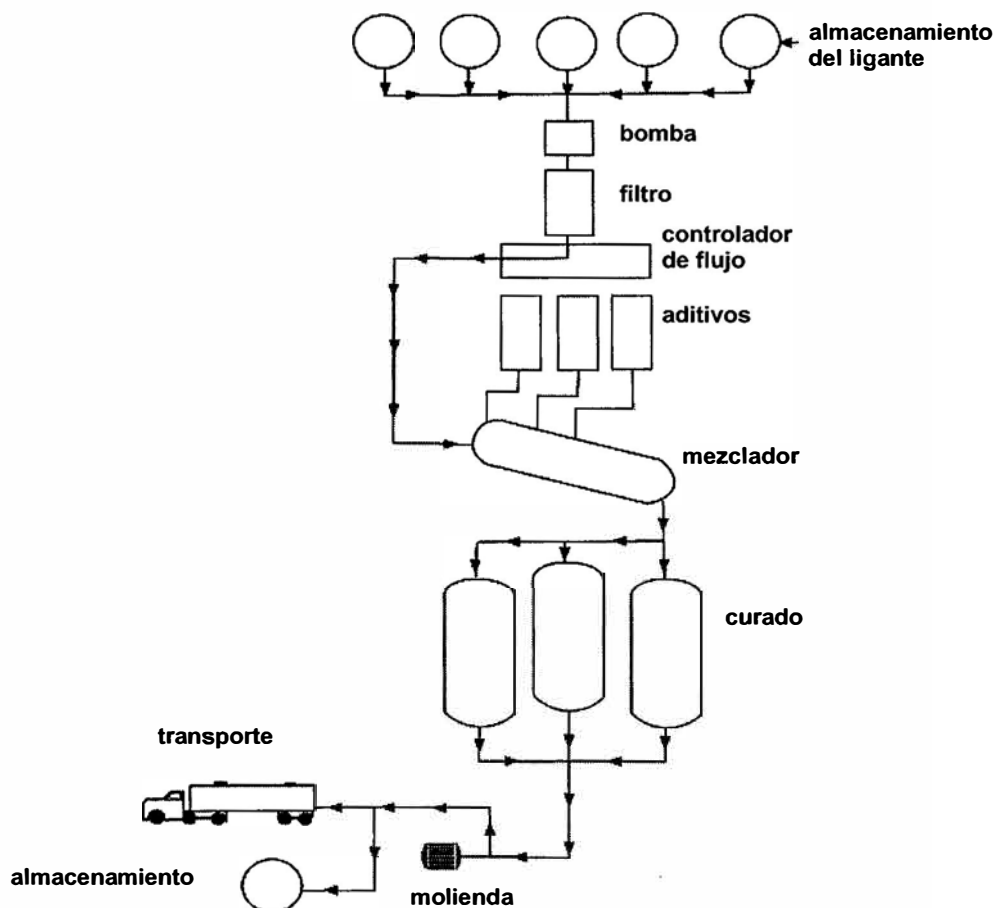
**FIGURA 19. DIAGRAMA DE PRODUCCION DE ASFALTOS MODIFICADOS CON ELASTOMEROS TERMOPLASTICOS ESTIRENICOS<sup>(25)</sup>**

Los parámetros de mezcla: velocidad de agitación y temperatura (160 - 180°C) deben ser cuidadosamente controlados, de modo de conseguir buena dispersión en un tiempo mínimo de mezcla.

### 2.3.2.2. PREPARACION DE ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS PLASTOMEROS

Los asfaltos modificados con copolímeros del etileno son en general fabricados en plantas semejantes a la mostrada en la **figura 20**. El asfalto seleccionado es calentado a temperatura de 170°C y es introducido en un mezclador donde será incorporado el polímero. Del mezclador son colocados en tres tanques de maduración donde ocurre la verdadera incorporación del polímero (hinchamiento del polímero por la fracción malténica del asfalto)<sup>(25)</sup>. La presencia de tres tanques en paralelo significa que mientras uno esta operando, el segundo está siendo cargado y el otro descargando. Al final el ligante pasa a un mezclador de Alto Cizallamiento para asegurar una microestructura fina y homogénea.

La manufactura de asfaltos modificados con EVA y PIB necesita de una etapa adicional donde la mezcla de PIB y EVA es preparada<sup>(25)</sup>.



**FIGURA 20**  
**DIAGRAMA DE PRODUCCION DE ASFALTOS**  
**MODIFICADOS CON PLASTOMEROS<sup>(25)</sup>**

### **2.3.3. PARAMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE MODIFICACION DE ASFALTOS**

Grandes volúmenes de mezclas de polímeros/asfaltos son usados en aplicaciones como techados, superficies de pavimentos e impermeabilizantes, y los procesos de mezcla empleados pueden tener un significativo efecto en las propiedades técnicas de la mezcla resultante y en la economía de la operación completa.

Un número de factores influyen en el proceso de mezclado. Dichos factores pueden ser definidos como sigue<sup>(31)</sup>:

- Naturaleza del Polímero
- Forma Física del Polímero
- Naturaleza y Grado del Asfalto
- Tipo de Equipo
- Tiempo/Temperatura durante el mezclado

El último de estos parámetros no es estrictamente una variable independiente, pero es de importancia en la subsecuente performance de la mezcla y por ello se incluye aquí.

#### **2.3.3.1. Naturaleza del Polímero**

La homogeneidad de la mezcla del polímero con el asfalto puede variar con el peso molecular del polímero, la cual se refleja en la viscosidad final del polímero y en el contenido de estireno (caso de elastómeros SBS).

Ambos, un alto peso molecular (o viscosidad) y un alto contenido de estireno, pueden dar largos tiempos de mezcla y viceversa.

#### **2.3.3.2. Forma Física del Polímero**

La forma física del polímero influye en el proceso de mezclado. Un pequeño tamaño de partícula del polímero requiere un menor tiempo en la etapa de desintegración en el proceso. En adición, pequeños tamaños de partículas tienen una mayor área superficial por unidad de masa del polímero, la penetración en el asfalto y el hinchamiento del polímero es facilitada y por lo tanto la disolución es lograda mas rápidamente.



Los polímeros en polvo son dispersados y disueltos mas rápidamente que los polímeros en pellets. En efecto, esto podría ser posible si para la mezcla del asfalto con el polímero en polvo se emplea solo equipos de bajo cizallamiento y sin ninguna etapa de desintegración.

### **2.3.3.3. Naturaleza y Grado del Asfalto**

El asfalto juega un rol importante en el proceso de mezclado, donde su composición y su viscosidad afectan a la mezcla.

Los asfaltos de alto contenido de maltenos o alto contenido de aromáticos hinchan el polímero más rápidamente que aquel bitumen que tenga un alto contenido de asfaltenos.

Los maltenos además de mantener en dispersión a los asfaltenos en el asfalto, también son requeridos para actuar como solvente para un polímero cuando es introducido en el asfalto. Insuficiente solvencia y/o un exceso de asfaltenos podría resultar tarde o temprano, durante el mezclado o durante el servicio, en la segregación de los asfaltenos y/o el polímero.

Por otra parte, una baja viscosidad en el asfalto es útil en el incremento de la velocidad de penetración e hinchamiento de las partículas del polímero.

Sin embargo, es arriesgado que la selección del asfalto sea hecha únicamente en base a su curva de viscosidad/temperatura o a su velocidad de penetración en el polímero; los aspectos de la performance de la mezcla final son factores dominantes en la elección del bitumen y el proceso de mezcla y son considerados en la formulación.

### **2.3.3.4. Tipos de Equipo**

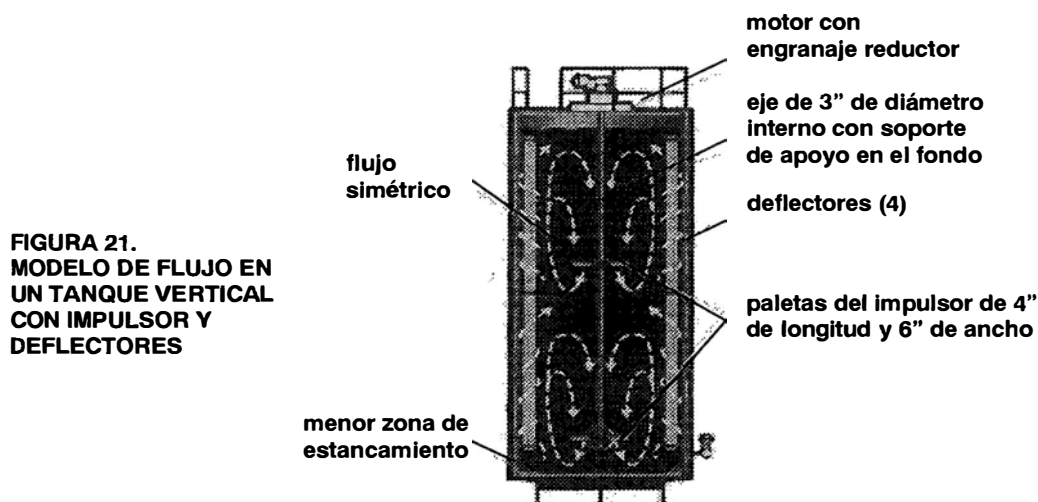
El proceso productivo de Modificación de Asfaltos con Polímeros consiste en disolver el polímero en el asfalto base mediante agitación mecánica y recirculación.

En el mercado existe una amplia variedad de mezcladores y dispersores, en la típica forma de paletas o tipo hélice. Estos, en términos generales, están divididos en equipos

de Bajo Cizallamiento con velocidades de agitación menores a 1500 rpm, y los equipos de Alto Cizallamiento con velocidades de agitación entre 1500 y 10 000 rpm.

El reactor es generalmente vertical, aislado térmicamente y con serpentines de fluido térmico para calefacción. En cuanto a la recirculación requerida para asegurar la homogeneidad de la mezcla, es recomendable que se haga a través de un molino coloidal similar a los usados en la producción de emulsiones asfálticas.

El almacenamiento se hace en tanques verticales equipados con capacidad de calefacción y agitación mecánica tal como se muestra en la **figura 21**, donde el tipo de flujo que existe origina una mínima zona de estancamiento ya que los impulsores llevan el líquido al fondo del tanque y lo hacen circular alrededor de los deflectores proporcionando un buen mezclado<sup>(32)</sup>.



Los tanques verticales tienen la ventaja además de que el área del líquido que es expuesta a airearse dentro del tanque es más pequeña que en los tanques horizontales, evitando que la oxidación sea menor. Otra ventaja de los tanques verticales es que requieren menor área cuadrada que los tanques horizontales.

Por otro lado, por ser los Asfaltos Modificados más viscosos que los Asfaltos Convencionales, el tamaño de las bombas, filtros y de las tuberías en general que son utilizadas con los Asfaltos Convencionales deberán ser incrementadas en tamaño para facilitar el bombeo de dichos productos.

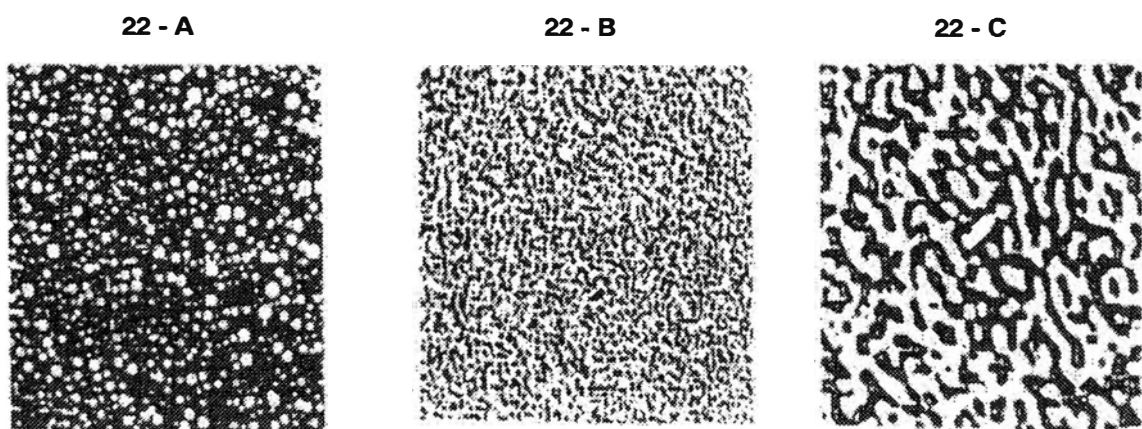
### 2.3.3.5. Tiempo/Temperatura de mezclado

El proceso ideal de mezclado tiene la menor temperatura de mezcla para el menor tiempo posible, ambos desde el punto de vista económico, y debe minimizar los cambios en el asfalto o en el polímero como resultado de los efectos térmicos. El tiempo requerido es resultado de la eficiencia de mezclado y solución, la temperatura puede ser incrementada por el tipo de asfalto y es requerimiento para lograr movilidad y un inicial hinchamiento del polímero. Sin embargo, empíricamente se ha encontrado para la combinación de polímeros con asfaltos, temperaturas óptimas de mezcla que resultan ser satisfactorias.

### 2.3.4. ESTRUCTURA MORFOLOGICA DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS

No se ha encontrado en la literatura un modelo estructural típico del asfalto modificado con polímero, dada la dificultad de definir el modelo propio del cemento asfáltico o tal vez porque el polímero se incorpora de maneras diferentes en el asfalto.

Por ejemplo, estructuras de una serie de asfaltos modificados con concentraciones crecientes de SBS observadas en el microscopio de reflexión de fluorescencia se muestran en la siguiente figura<sup>(25)</sup>.



**FIGURA 22. OBSERVACION DE ESTRUCTURAS DE ASFALTO MODIFICADO CON DIFERENTES PORCENTAJES DE SBS EN UN MICROSCOPIO DE REFLEXION DE FLUORESCENCIA<sup>(25)</sup>**

Bajos contenidos de polímero (menor a 5%) presentan la fase asfáltica continua con el polímero disperso. En esta situación, las propiedades de mezcla son modificadas

principalmente por el aumento del contenido de asfaltenos en la fase asfáltica. Ver **figura 22-A**.

Altos contenidos de polímero (mayor a 5%) presentan la fase polimérica continua con la fase rica en asfaltenos dispersa. Ver **figura 22-B**.

Contenidos de polímero alrededor del 5% presentan dos fases continuas entrelazadas. Ver **figura 22-C**.

### **2.3.5. ENVEJECIMIENTO DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS**

Los asfaltos modificados por SBS cuando sufren envejecimiento presentan pérdida de elasticidad, reducción del punto de ablandamiento y disminución de la penetración<sup>(26)</sup>:

La degradación térmica repercute en un aumento del contenido de asfaltenos en el CAP y la modificación de la estructura del polímero: el peso molecular disminuye constantemente, la concentración de grupos estirénicos libres aumenta, las ligaciones etilénicas del butadieno desaparecen.

La degradación por luz ultravioleta se traduce en la disminución progresiva del peso molecular del SBS, además de un aumento del contenido de asfaltenos.

Los cambios reológicos asociados a los asfaltos modificados con SBS pueden estar ligados a la estructura molecular del copolímero, ocasionando el envejecimiento al formarse subestructuras de bajo peso molecular<sup>(33)</sup>. La disminución de los valores del Punto de Ablandamiento después del envejecimiento en RTFOT es un indicador de la degradación parcial del polímero. Los valores son una verdadera suma algebraica del aumento debido a la oxidación del CAP y a la disminución debida a la degradación del polímero<sup>(34)</sup>.

### **2.3.6. ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS**

Con el objetivo de introducir requisitos de desempeño basados en ensayos empíricos, existen en el mundo muchas especificaciones para los Asfaltos Modificados con Polímeros, encontrándose por ejemplo:

## **ESPECIFICACIONES SEGUN NORMAS ASTM PARA LOS ASFALTOS MODIFICADOS**

Las Especificaciones ASTM fueron establecidas para proveer referencias para la especificación del asfalto modificado por polímero y reflejar las propiedades de productos comerciales actualmente disponibles. Están divididas en cuatro normas, las cuales se describen a continuación<sup>(35)</sup>:

### **1. NORMA ASTM D 5976**

#### **ESPECIFICACION PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO I**

Los Asfaltos Modificados con Polímeros Tipo I son típicamente hechos con: Copolímero Estireno/Butadieno (SB) copolímeros en bloque de Estireno/Butadieno/Estireno (SBS). Las especificaciones establecidas en esta norma se muestran en el **cuadro 7**.

### **2. NORMA ASTM D 5840**

#### **ESPECIFICACION PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS TIPO II**

Los Asfaltos Modificados con Polímeros Tipo II son típicamente hechos con: Copolímero Estireno/Butadieno (SBR) o Policloropreno - Látex. Las especificaciones establecidas en esta norma se muestran en el **cuadro 8**.

### **3. NORMA ASTM D 5841**

#### **ESPECIFICACION PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO III**

Los Asfaltos Modificados con Polímeros Tipo III son típicamente hechos con el Copolímero de Etil y Vinil Acetato (EVA). Las especificaciones establecidas en esta norma se muestran en el **cuadro 9**.

### **4. NORMA ASTM D 5892**

#### **ESPECIFICACION PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO IV**

Los Cementos Asfálticos de este tipo son modificados con Copolímeros de Estireno - Butadieno - Estireno (SBS). Las especificaciones establecidas en esta norma se muestran en el **cuadro 10**.

**CUADRO 7**  
**REQUERIMIENTO DE PROPIEDADES FISICAS**  
**PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS DE TIPO I SEGÚN ASTM D 5976**

PROPIEDADES	METODO ESTANDAR ASTM	I-A		I-B		I-C		I-D	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>PRODUCTO ORIGINAL</b>									
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	D 5	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad 60°C, Po	D 2171	1250		2500		5000		5000	
Viscosidad 135°C, cSt	D 2170		2000		2000		2000		5000
Flash Point COC, °C	D 92	232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % Masa	D 2042	99		99		99		99	
Separación, Diferencia Pto. Ablandamiento, °C	D 5976		2.2		2.2		2.2		2.2
<b>PRUEBA EN EL RESIDUO RTFOT ASTM 2872 O PELICULA FINA ASTM 1754</b>									
Recuperación Elástica, a 25°C, 10 cm elongación, %	D 5976	60		60		60		60	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	D 5	20		15		13		10	

**CUADRO 8**  
**REQUERIMIENTO DE PROPIEDADES FISICAS**  
**PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS DE TIPO II SEGÚN ASTM D 5840**

PROPIEDADES	METODO ESTANDAR ASTM	II-A		II-B		II-C		II-D	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
<b>PRODUCTO ORIGINAL</b>									
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	D 5	100		70		85		80	
Viscosidad 60°C, Po	D 2171	800		1600		800		1600	
Viscosidad 135°C, cSt	D 2170	300		300		300		300	
Ductilidad a 4°C, 5 cm/min, cm	D 113	50		50		25		25	
Flash Point, COC, °C	D 92	232		232		232		232	
Toughness, 25°C, 20 in/min, in-lb	D 5801	75		110		75		110	
Tenacidad, 25°C, 20 in/min, in-lb	D 5801	50		758		50		75	
<b>PRUEBA EN EL RESIDUO RTFOT ASTM 2872 O PELICULA FINA ASTM 1754</b>									
Ductilidad a 4°C, 5 cm/min, cm	D 113	25		25		10		10	
Viscosidad 60°C, Po	D 2171		4000		8000		4000		8000
Toughness, 25°C, 20 in/min, in-lb	D 5801					75		100	
Tenacidad, 25°C, 20 in/min, in-lb	D 5801					50		75	

**CUADRO 9  
REQUERIMIENTO DE PROPIEDADES FISICAS  
PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS DE TIPO III SEGÚN ASTM D 5841**

PROPIEDADES	METODO ESTANDAR ASTM	III-A		III-B		III-C		III-D		III-E	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>PRODUCTO ORIGINAL</b>											
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	D 5	48		35		28		22		18	
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	D 5	30	150	30	150	30	150	30	150	30	150
Viscosidad 135°C, cSt	D 2170	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500
Flash Point COC, °C	D 92	218		218		218		218		218	
Punto de Ablandamiento, °C	D 36	52		54		57		60		63	
Solubilidad en Tricloroetileno, % Masa	D 2042	99		99		99		99		99	
Separación 135 °C, 18 hr	D 5841	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
<b>PRUEBA EN EL RESIDUO RTFOT ASTM 2872 O PELICULA FINA ASTM 1754</b>											
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	D 5	24		18		14		11		9	
Pérdida de masa por calentamiento, %			1		1		1		1		1



**CUADRO 10**  
**REQUERIMIENTO DE PROPIEDADES FISICAS**  
**PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS DE TIPO IV SEGÚN ASTM D 5892**

PROPIEDADES	METODO ESTANDAR ASTM	IV-A		IV-B		IV-C		IV-D		IV-E		IV-F	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
<b>PRODUCTO ORIGINAL</b>													
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	D 5	90		75		65		50		50		35	
Viscosidad 60°C, Po	D 2171	1250		4000		2500		6000		4500		8000	
Viscosidad 135°C, cSt	D 2170		3000		3000		3000		3000		3000		3000
Flash Point COC, °C	D 92	232		232		232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % Masa	D 2042	99		99		99		99		99		99	
Separación, Diferencia Pto. Ablandamiento, °C	D 5892	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
<b>PRUEBA EN EL RESIDUO RTFOT ASTM 2872 O PELICULA FINA ASTM 1754</b>													
Recuperación Elástica, a 25°C, 10 cm elongación, %	D 5892	60		70		60		70		60		70	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	D 5	20		20		15		15		10		10	

En todos los casos, los polímeros mencionados son de referencia, puesto que cualquier polímero puede ser usado siempre y cuando den los resultados requeridos en las pruebas cuando son mezclados con el asfalto deseado.

Debe tenerse en cuenta que estas especificaciones no son entendidas como especificaciones de desempeño del Asfalto, sólo miden el grado de modificación de las propiedades del Asfalto original con el polímero.

## **ESPECIFICACIONES EUROPEAS**

Las especificaciones del Asfalto Modificado en la Comunidad Europea<sup>(35)</sup> se muestran en el **cuadro 11**.

## **ESPECIFICACIONES BELGAS<sup>(36)</sup>**

Las especificaciones del Asfalto Modificado Elastomérico, Plastomérico y con Caucho Recuperado de Neumático, se muestran en el **cuadro 12**.

## **ESPECIFICACIONES ALEMANAS<sup>(37)</sup>**

Las especificaciones de Asfalto Modificado Elastomérico y Plastomérico en Alemania, se muestran en los **cuadros 13 y 14**.

## **ESPECIFICACIONES POLACAS<sup>(38)</sup>**

Las especificaciones de Asfalto Modificado Elastomérico Tipo A, B y C y del Asfalto Modificado Plastomérico en Polonia, se muestran en los **cuadros 15, 16, 17 y 18**.

## **OTRAS ESPECIFICACIONES**

Además de las especificaciones ASTM presentadas anteriormente, existen otras especificaciones de Asfalto Modificado en EUA. Ensayos constantes de las especificaciones de asfaltos modificados de diversos estados americanos y sus respectivos límites, se muestran en el **cuadro 19<sup>(39)</sup>**.

**CUADRO 11**  
**ESPECIFICACIONES DE ASFALTO MODIFICADO EN LA COMUNIDAD EUROPEA**

ENSAYOS	10/30-70	30/50-65	50/70-65	50/70-60	70/100-60	100/150-60
<b>REQUISITOS OBLIGATORIOS</b>						
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	10 a 30	30 a 50	50 a 70	50 a 70	70 a 100	100 a 150
Punto de Ablandamiento, °C	70 mín	65 mín	65 mín	60 mín	60 mín	60 mín
Cohesividad a 5°C, J/cm <sup>2</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>
Fuerza de Ductilidad o Test de Tracción	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
Punto de Inflamación, °C	235 mín	235 mín	235 mín	235 mín	220 mín	220 mín
<b>REQUISITOS OPCIONALES</b>						
Recuperación Elástica a 25°C, % <sup>(3)</sup>	50 mín	50 mín	75 mín	50 mín	65 mín	65 mín
Punto de Ruptura FRAASS, °C	-4	-8	-132	-15	-15	-17
<b>SEPARACION<sup>(4)</sup></b>						
Diferencia Punto de Ablandamiento, °C	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx
Diferencia Penetración, dmm	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>	5 mín <sup>(1)</sup>
<b>EFFECTO DE CALOR Y AIRE RTFOT/TFOT</b>						
Penetración retenida a 25°C, %	60 mín	60 mín	60 mín	60 mín	55 mín	50 mín
Aumento de Punto de Ablandamiento, °C	8 máx	8 máx	10 máx	10 máx	12 máx	14 máx
Reducción Punto de Ablandamiento, °C	4 máx	4 máx	5 máx	5 máx	6 máx	6 máx
Recuperación Elástica a 25°C, %	50 mín	50 mín	50 mín	50 mín	50 mín	50 mín

<sup>(1)</sup> Valor sugerido a ser confirmado

<sup>(2)</sup> Valor aún no informado

<sup>(3)</sup> Sólo aplicable a los Asfaltos Modificados con Polímero con Recuperación Elástica mayor que 50%

<sup>(4)</sup> Si no son informadas las condiciones del ensayo de Estabilidad al Almacenamiento, la información debe ser proporcionada por el proveedor para evitar la separación del polímero

Las siguientes informaciones deben ser proporcionadas por el proveedor en el manual de datos del producto:

\* Dispersión del polímero, Solubilidad (usando un solvente apropiado), Densidad

\* Manipuleo (Temperatura mínima de almacenamiento, temperatura mínima de bombeo, temperatura mínima y máxima de usinagem)

**CUADRO 12**  
**ESPECIFICACIONES DE ASFALTOS MODIFICADOS DE BELGICA**

ENSAYOS	ELASTOMERICO		PLASTOMERICO		CAUCHO RECUPERADO DE NEUMATICOS
	50/85	85/130	35/65	50/80	
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	50 a 85	85 a 130	35 a 65	50 a 80	80 a 100
Punto de Ablandamiento, °C	50 mín	75 mín	55 mín	50 mín	55 mín
Punto de Ruptura FRAASS, °C	-10 máx	-18 máx	-18 máx	-15 máx	-15 máx
Viscosidad a 135°C, cSt	800 mín	900 mín	600 a 1200	600 a 1200	-
Viscosidad a 205°C, cSt	-	-	-	-	300 a 1300
Densidad a 25°/25°C	1,050 a 1,120	1,050 a 1,120	1,050 a 1,120	1,050 a 1,120	1,050 a 1,120
Ductilidad a 5°C, cm	10 mín	50 mín	2 mín	4 mín	7 mín
Recuperación Elástica a 25°C, %	25 mín	50 mín	-	-	40 mín

**CUADRO 13**  
**ESPECIFICACIONES DE ASFALTO ELASTOMERICO DE ALEMANIA**

ENSAYOS	METODO	PmB 80	PmB 65	PmB 45
Punto de Ablandamiento, °C	DIN 52011	40 a 48	48 a 55	55 a 63
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	DIN 52010	120 mín	50 mín	20 mín
Punto de Ruptura FRAASS, °C	DIN 52012	-20 máx	-15 máx	-10 máx
Ductilidad a 25°C, cm	DIN 52013			40 mín
a 13°C, cm			100 mín	
a 7°C, cm		100 mín		
Densidad a 25°C, gr/cm <sup>3</sup>	DIN 52004	1,00 a 1,10	1,00 a 1,10	1,00 a 1,10
Punto de Inflamación, °C	DIN 51376	200 mín	200 mín	200 mín
Recuperación Elástica a 25°C, %		50 mín	50 mín	50 mín
<b>SEPARACION</b>				
Diferencia Punto de Ablandamiento, °C	DIN 52011	2 máx	2 máx	2 máx
<b>EFFECTO DE CALOR Y AIRE RTFOT/TFOT</b>				
Variación de masa, %	DIN 52017	1 máx	1 máx	1 máx
Aumento de Punto de Ablandamiento, °C	DIN 52011	5 máx	5 máx	5 máx
Reducción Punto de Ablandamiento, °C		2 máx	2 máx	2 máx
Reducción de Penetración a 25°C, %	DIN 52010	30 máx	30 máx	30 máx
Aumento de Penetración a 25°C, %		10 máx	10 máx	10 máx
Ductilidad a 25°C, cm	DIN 52013			
a 13°C, cm			50 mín	
a 7°C, cm		50 mín		
Recuperación Elástica a 10°C, %		50 mín	50 mín	50 mín

**CUADRO 14**  
**ESPECIFICACIONES DE ASFALTO PLASTOMERICO DE ALEMANIA**

ENSAYOS	METODO	PmB 65	PmB 45
Punto de Ablandamiento, °C	DIN 52011	48 a 55	55 a 63
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	DIN 52010	50 mín	20 mín
Punto de Ruptura FRAASS, °C	DIN 52012	-15 máx	-10 máx
Ductilidad a 25°C, cm	DIN 52013		10 mín
a 13°C, cm		15 mín	
Densidad a 25°C, gr/cm <sup>3</sup>	DIN 52004	1,00 a 1,10	1,00 a 1,10
Punto de Inflamación, °C	DIN 51376	200 mín	200 mín
<b>SEPARACION</b>			
Diferencia Punto de Ablandamiento, °C	DIN 52011	2 máx	2 máx
<b>EFFECTO DE CALOR Y AIRE RTFOT/TFOT</b>			
Variación de masa, %	DIN 52017	1 máx	1 máx
Aumento de Punto de Ablandamiento, °C	DIN 52011	5 máx	5 máx
Reducción Punto de Ablandamiento, °C		2 máx	2 máx
Reducción de Penetración a 25°C, %	DIN 52010	30 máx	30 máx
Aumento de Penetración a 25°C, %		10 máx	10 máx
Ductilidad a 25°C, cm	DIN 52013		5 mín
a 13°C, cm		8 mín	

**CUADRO 15**  
**ESPECIFICACIONES DE ASFALTO ELASTOMERICO TIPO A DE POLONIA**

ENSAYOS	DE 30 A	DE 80 A	DE 150 A	DE 250 A
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	20 a 45	50 a 110	120 a 180	190 a 300
Punto de Ablandamiento, °C	53 a 61	45 a 53	39 a 45	31 a 39
Punto de Ruptura FRAASS, °C	-8 máx	-10 máx	-10 máx	-20 máx
Ductilidad a 25°C, cm	40 mín	-	-	-
Ductilidad a 15°C, cm	-	80 mín	-	-
Ductilidad a 5°C, cm	-	-	80 mín	80 mín
Densidad a 25°C, gr/cm <sup>3</sup>	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1
Punto de Inflamación, °C	200 mín	200 mín	200 mín	200 mín
Recuperación Elástica a 25°C, %	50 mín	50 mín	50 mín	50 mín
<b>ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO</b>				
Diferencia de Punto de Ablandamiento, °C	2 máx	2 máx	2 máx	2 máx
Diferencia Penetración, dmm	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx
<b>EFEECTO DE CALOR Y AIRE RTFOT/TFOT</b>				
Variación de masa, %	1 máx	1 máx	1 máx	1 máx
Aumento de Punto de Ablandamiento, °C	6,5 máx	6,5 máx	6,5 máx	6,5 máx
Reducción Punto de Ablandamiento, °C	2 máx	2 máx	2 máx	2 máx
Aumento de Penetración a 25°C, %	40 máx	40 máx	40 máx	40 máx
Reducción de Penetración a 25°C, %	10 máx	10 máx	10 máx	10 máx
Ductilidad a 25°C, cm	20 mín	-	-	-
Ductilidad a 15°C, cm	-	50 mín	-	-
Ductilidad a 5°C, cm	-	-	50 mín	50 mín
Recuperación Elástica a 25°C, %	50 mín	50 mín	50 mín	50 mín

**CUADRO 16**  
**ESPECIFICACIONES DE ASFALTO ELASTOMERICO TIPO B DE POLONIA**

ENSAYOS	DE 30 B	DE 80 B	DE 150 B
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	20 a 45	50 a 110	120 a 180
Punto de Ablandamiento, °C	63 a 73	53 a 63	45 a 53
Punto de Ruptura FRAASS, °C	-10 máx	-13 máx	-18 máx
Ductilidad a 25°C, cm	40 mín	-	-
Ductilidad a 15°C, cm	-	80 mín	-
Ductilidad a 5°C, cm	-	-	80 mín
Densidad a 25°C, gr/cm <sup>3</sup>	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1
Punto de Inflamación, °C	200 mín	200 mín	200 mín
Recuperación Elástica a 25°C, %	50 mín	50 mín	50 mín
<b>ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO</b>			
Diferencia de Punto de Ablandamiento, °C	2 máx	2 máx	2 máx
Diferencia Penetración, dmm	5 máx	5 máx	5 máx
<b>EFEECTO DE CALOR Y AIRE RTFOT/TFOT</b>			
Variación de masa, %	1 máx	1 máx	1 máx
Aumento de Punto de Ablandamiento, °C	6,5 máx	6,5 máx	6,5 máx
Reducción Punto de Ablandamiento, °C	2 máx	2 máx	2 máx
Aumento de Penetración a 25°C, %	40 máx	40 máx	40 máx
Reducción de Penetración a 25°C, %	10 máx	10 máx	10 máx
Ductilidad a 25°C, cm	20 mín	-	-
Ductilidad a 15°C, cm	-	50 mín	-
Ductilidad a 5°C, cm	-	-	50 mín
Recuperación Elástica a 25°C, %	50 mín	50 mín	50 mín

**CUADRO 17**  
**ESPECIFICACIONES DE ASFALTO ELASTOMERICO TIPO C DE POLONIA**

ENSAYOS	DE 30 C	DE 80 C	DE 150 C	DE 250 C
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	20 a 45	50 a 110	120 a 180	190 a 300
Punto de Ablandamiento, °C	73 a 100	63 a 100	53 a 80	39 a 60
Punto de Ruptura FRAASS, °C	-13 máx	-18 máx	-23 máx	-28 máx
Ductilidad a 25°C, cm	40 mín	-	-	-
Ductilidad a 15°C, cm	-	40 mín	-	-
Ductilidad a 5°C, cm	-	-	40 mín	40 mín
Densidad a 25°C, gr/cm <sup>3</sup>	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1
Punto de Inflamación, °C	200 mín	200 mín	200 mín	200 mín
Recuperación Elástica a 25°C, %	80 mín	80 mín	80 mín	80 mín
<b>ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO</b>				
Diferencia de Punto de Ablandamiento, °C	2 máx	2 máx	2 máx	2 máx
Diferencia Penetración, dmm	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx
<b>EFECTO DE CALOR Y AIRE RTFOT/TFOT</b>				
Variación de masa, %	1 máx	1 máx	1 máx	1 máx
Aumento de Punto de Ablandamiento, °C	4,5 máx	4,5 máx	4,5 máx	4,5 máx
Reducción Punto de Ablandamiento, °C	4 máx	4 máx	4 máx	4 máx
Aumento de Penetración a 25°C, %	30 máx	30 máx	30 máx	30 máx
Reducción de Penetración a 25°C, %	10 máx	10 máx	10 máx	10 máx
Ductilidad a 25°C, cm	20 mín	-	-	-
Ductilidad a 15°C, cm	-	20 mín	-	-
Ductilidad a 5°C, cm	-	-	20 mín	20 mín
Recuperación Elástica a 25°C, %	80 mín	80 mín	80 mín	80 mín

**CUADRO 18**  
**ESPECIFICACIONES DE ASFALTO PLASTOMERICO DE POLONIA**

ENSAYOS	DP 30 B	DP 80 B
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	20 a 45	50 a 110
Punto de Ablandamiento, °C	36 a 73	45 a 53
Punto de Ruptura FRAASS, °C	-8 máx	-10 máx
Ductilidad a 25°C, cm	10 mín	-
Ductilidad a 15°C, cm	-	15 mín
Densidad a 25°C, gr/cm <sup>3</sup>	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1
Punto de Inflamación, °C	200 mín	200 mín
<b>ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO</b>		
Diferencia de Punto de Ablandamiento, °C	2 máx	2 máx
Diferencia Penetración, dmm	5 máx	5 máx
<b>EFECTO DE CALOR Y AIRE RTFOT/TFOT</b>		
Variación de masa, %	1 máx	1 máx
Aumento de Punto de Ablandamiento, °C	6,5 máx	6,5 máx
Reducción Punto de Ablandamiento, °C	2 máx	2 máx
Aumento de Penetración a 25°C, %	40 máx	40 máx
Reducción de Penetración a 25°C, %	10 máx	10 máx

**CUADRO 19**  
**ENSAYOS CONSTANTES EN LAS ESPECIFICACIONES DE VARIOS ESTADOS**  
**AMERICANOS DE ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS**

ENSAYOS	LIMITES	
	MINIMO	MAXIMO
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	Variable con el tipo	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	Variable con el tipo	
Viscosidad a 60°C, Po	Variable con el tipo	
Viscosidad a 135°C, cSt	Variable con el tipo	
Punto de Ablandamiento, °C	Variable con el tipo	
Ductilidad a 4°C, 50 mm/min, cm	Variable con el tipo	
Punto de Inflamación, °C	232	
Solubilidad en Tricloroetileno, %	99,0	
Fuerza de Ductilidad	0,3	
Recuperación Elástica a 25°C, %	45	
Contenido de Polímero, %	2	
<b>ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO</b>		
Diferencia de Punto de Ablandamiento, °C		2,5
Toughness a 25°C, Nm	12,4	
Tenacidad a 25°C, Nm	8,5	



Cabe mencionar que algunas empresas productoras de asfaltos modificados como el caso de **SHELL**<sup>(40)</sup> y de **MOBILPLAST**<sup>(41)</sup>, también establecieron sus propias especificaciones. Ver **cuadros 20 y 21**.

## **ESPECIFICACIONES DE ASFALTO MODIFICADO POR CAUCHO RECUPERADO DE NEUMATICOS**<sup>(17)</sup>

Las especificaciones **ASTM D 6114** de asfaltos modificados por caucho recuperado de neumáticos se muestran en el **cuadro 22**, y están clasificadas en tres tipos de asfaltos.

El Tipo I es recomendado para las regiones de clima caliente, el Tipo II para regiones de clima moderado y el Tipo III para regiones de clima frío. Clima caliente significa que las temperaturas máximas del aire pueden alcanzar valores superiores a 43°C y las temperaturas mínimas de aire superiores a -1°C. Clima moderado significa que las temperaturas máximas de aire son inferiores a 43°C y las temperaturas mínimas de aire son superiores a -9°C. Clima frío significa que las temperaturas máximas de aire son inferiores a 27°C y las temperaturas mínimas de aire pueden ser inferiores a -9°C.

De los cuadros anteriores, podemos afirmar que existen ensayos que son constantes tanto para los Asfaltos Plastoméricos como para los Elastoméricos, y que a continuación se resumen.

### **1. Para Asfaltos Modificados con Polímeros Elastómeros**

- a. Consistencia: Penetración y Viscosidad
- b. Seguridad: Punto de Inflamación
- c. Densidad
- d. Elasticidad : Recuperación Elástica a 10°C y a 25°C antes y después de Película Fina
- e. Otros ensayos de Elasticidad: Toughness y tenacidad, Ductilidad a diferentes temperaturas 4, 5, 7, 10, 13, 25°C

**CUADRO 20**  
**ESPECIFICACION SHELL DE ASFALTOS ELASTOMERICOS**

ENSAYOS	METODOS	PMAC-IC SB o SBS	PMAC-ID SB o SBS	PMAC-IIB SBR
Grado de Desempeño SUPERPAVE		70-28	76-28	70-28
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	AASHTO T 49	50 a 75	40 a 75	70 mín
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	AASHTO T 49	20 mín	15 mín	-
Viscosidad a 60°C, Po	ASTM D 4957	5000 mín	5000 mín	5000 mín
Viscosidad a 135°C, cSt	AASHTO T 201	3000 máx	3000 máx	3000 máx
Punto de Ablandamiento, °C	AASHTO T 53	54 mín	71 mín	-
Ductilidad a 4°C, 50 mm/min, cm	AASHTO T 51	-	-	500 mín
Punto de Inflamación, °C	AASHTO T 48	232 mín	232 mín	232 mín
Solubilidad en Tricloroetileno, %	AASHTO T 44	99,0 mín	99,0 mín	99,0 mín
<b>ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO</b>				
Diferencia de Punto de Ablandamiento, °C		2,2 máx	2,2 máx	
Toughness a 25°C, Nm		-	-	12,4 mín
Tenacidad a 25°C, Nm		-	-	8,5 mín
<b>EFECTO DE CALOR Y AIRE, RTFOT</b>				
Recuperación Elástica a 25°C, %		45 mín	50 mín	-
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	AASHTO T 49	13 mín	13 mín	-
Viscosidad a 60°C, Po	ASTM D 4957	-	-	8000 máx
Ductilidad a 4°C, 50 mm/min, cm	AASHTO T 51	-	-	250 mín

**CUADRO 21**  
**ESPECIFICACIONES DE ASFALTOS MODIFICADOS CON EVA - MOBILPLAST**

ENSAYOS	E	G3	G7	G9	20/30	A	B
Densidad a 25°C	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1
Punto de Ruptura FRAASS, °C	<= -13	<= -9	<= -9	<= -9	<= -4	<= -16	<= -16
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	52 a 82	50 a 80	35 a 65	30 a 60	20 a 30	22 a 52	30 a 60
Punto de Ablandamiento, °C	>= 50	>= 49	>= 65	>= 67	>= 57	>= 57	>= 56
Indice de Penetración, LCPC	>= +1,0	>= +0,5	>= +3,5	>= +3,5	>= +1,5	>= +3,0	>= 2,0
Intervalo de Plasticidad	>= 63	>= 58	>= 74	>= 76	>= 61	>= 73	>= 72
Temperatura máxima de calentamiento, °C	190	190	190	190	190	190*	190
Temperatura de bombeo, °C	150	130	165	165	160	170	170
Temperatura de usinagem, °C	170	160	175	175	175	200	180

\* 16 horas @ 190°C o 2 horas a 220°C

**CUADRO 22**  
**ESPECIFICACIONES ASTM D 6114 PARA ASFALTO MODIFICADO**  
**CON CAUCHO RECUPERADO DE NEUMATICOS**

ENSAYOS	METODO	TIPO I	TIPO II	TIPO III
Viscosidad Aparente <sup>a,b</sup> a 175°C, cP	ASTM D 2196	1500 - 5000	1500 - 5000	1500 - 5000
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	25 - 75	25 - 75	50 - 100
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	10 mín	15 mín	25 mín
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	57,2 mín	54,4 mín	51,7 mín
Resiliencia a 25°C, %	ASTM D 5329	25 mín	20 mín	10 mín
Punto de Inflamación, °C	ASTM D 92	232,2 mín	232,2 mín	232,2 mín
Envejecimiento <sup>c</sup> TFOT:	ASTM D 1754			
Penetración retenida, % original	ASTM D 5	75 mín	75 mín	75 mín

<sup>a</sup> Viscosímetro BROOKFIELD puede ser usado:

Serie LV usar spindle 3 a 12 rpm

Serie RH y HA usar spindle 3 a 20 rpm

<sup>b</sup> Viscosímetro HAAKE puede ser usado con rotor n°1 mas BROOKFIELD o el método preferido

<sup>c</sup> Puede ser usado RTFOT o TFOT

- f. Compatibilidad: Variación del Punto de Ablandamiento
- g. Ensayos de Desempeño: Punto de Ablandamiento, Punto de Ruptura FRAASS, cohesividad
- h. Resistencia al Envejecimiento: Variación del Punto de Ablandamiento y Penetración

## **2. Para Asfaltos Modificados con Polímeros Plastómeros**

- a. Consistencia: Penetración y Viscosidad
- b. Seguridad: Punto de Inflamación
- c. Densidad
- d. Elasticidad : Recuperación Elástica a 10°C y a 25°C antes y después de Película Fina, con valores inferiores al del Asfalto Modificado con Polímeros Elastoméricos
- e. Otros ensayos de Elasticidad: Ductilidad a 13 y 15°C, con límites inferiores al de los Asfaltos Modificados con Elastómeros
- f. Ensayos de Desempeño: Punto de Ablandamiento, Punto de Ruptura FRAASS, cohesividad
- g. Compatibilidad: Variación del Punto de Ablandamiento o Ensayo de Separación
- h. Resistencia al Envejecimiento: Variación del Punto de Ablandamiento y Penetración

**Capítulo 3**  
**EVALUACION EXPERIMENTAL DE LA MODIFICACION DE**  
**CEMENTOS ASFALTICOS CON POLIMEROS**

La búsqueda de un mejor desempeño de los ligantes asfálticos utilizados en pavimentación llevó al estudio de varios materiales macromoleculares o polímeros en combinación con materiales bituminosos y cementos asfálticos de petróleo.

Debido al impacto positivo de las propiedades de los asfaltos modificados con polímeros, como su inherente resistencia a las fallas por fatiga y deformación permanente junto con su característica de impermeabilidad, han logrado que tenga un rol importante en el futuro de los pavimentos y su mantenimiento.

Este capítulo se divide en dos partes: una primera, corresponde a la descripción tanto de los métodos de ensayo y materiales utilizados requeridos para la caracterización del Asfalto Convencional y de los Asfaltos Modificados preparados con cada uno de los polímeros seleccionados; y finalmente una segunda parte, que corresponde a la evaluación experimental de la preparación de formulaciones asfálticas modificadas con polímeros, los resultados de dicha modificación y la discusión de los resultados respectivos.

A continuación la descripción de los métodos de ensayos y los materiales utilizados en la evaluación experimental de Asfaltos Convencionales y Asfaltos Modificados.

### **3.1. MATERIALES Y METODOS DE ENSAYOS**

#### **3.1.1. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS**

##### **3.1.1.1. CEMENTOS ASFALTICOS**

Teniendo en cuenta los intereses dados a conocer por la Refinería Conchán y luego de mutuo acuerdo, se eligió dentro de la gamma de cementos asfálticos para modificar con polímeros, los siguientes:

C.A. PEN 85/100, FORMULACION: CRUDO MEZCLA TIPO A

C.A. PEN 120/150, FORMULACION: CRUDO MEZCLA TIPO B

C.A. PEN 85/100, FORMULACION: CRUDO PURO

### **3.1.1.2. POLIMEROS**

Para fines de este estudio fueron evaluados dos polímeros plastómeros, el copolímero Etil/Vinil Acetato (EVA) y el Polietileno (PE), y dos polímeros elastómeros, el copolímero Estireno/Butadieno/Estireno (SBS) y el copolímero Estireno/Butadieno (SB), a modo de evaluar sus efectos en nuestros asfaltos.

### **3.1.2. EQUIPOS**

#### **3.1.2.1. EQUIPO PARA MEZCLA**

La modificación de asfaltos fue realizada en condiciones de Bajo Cizallamiento utilizando el agitador ARROW ENGINEERING MODELO 850, que puede alcanzar velocidades de agitación hasta de 900 rpm, con paletas de dimensiones de 2 cm de longitud y 1.5 cm de ancho. Así mismo para el calentamiento de la muestra se utilizó la Plancha de Calentamiento marca FISHER SCIENTIFIC.

La cantidad de muestra de asfalto modificado con polímero necesaria para realizar los ensayos fue de aproximadamente 2.7 Kg (siendo preparadas en recipientes de un galón de capacidad). El sistema de control de temperatura fue manual, mediante termómetros colocados en el recipiente.

#### **3.1.2.2. EQUIPOS PARA CARACTERIZACION**

Ductilómetro HUMBOLDT

Horno para prueba de Película Fina LAB LINE IMPERIAL III

Horno para prueba de Película Fina LINDBERG BLUE

Equipo para determinación del Punto de Ruptura FRAASS, PETROTEST

Penetrómetro PNR 10, PETROTEST

Penetrómetro PRECISION

Regulador de Presión CANNON INSTRUMENTS

Baños Viscosímetros CANNON INSTRUMENTS

Baño Viscosímetro PETROTEST

Bombas de Recirculación NESLAB

Bomba de Recirculación PRECISION

Estufa BLUE

Balanza PRECISION ADVANCED

Balanza Analítica SHIMADZU

Plancha de Calentamiento SYBRON

Plancha de Calentamiento FISHER SCIENTIFIC

Plancha con Sistema de Calentamiento y Agitación, FISHER SCIENTIFIC

Máquina para producción de Hielo Seco, THE RIGAH COMPANY

### **3.1.3. METODOS DE ENSAYO**

#### **3.1.3.1. CARACTERIZACION DE ASFALTOS CONVENCIONALES**

##### **a. Penetración: ASTM D-5**

Esta prueba sirve para determinar la consistencia de los asfaltos de naturaleza sólida o semisólida. La penetración se define como la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente a una muestra de un material bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura (100 gr, 25°C, 5 seg.), aunque puede emplearse otras condiciones previamente definidas.

##### **b. Ductilidad: ASTM D-113**

Consiste en someter una probeta de asfalto a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua. La prueba de Ductilidad determina la máxima longitud en centímetros de elongación, sin romperse, de los materiales bituminosos. La sección mínima de la muestra de asfalto es de 1 cm<sup>2</sup>; normalmente la velocidad a la que se lleva la prueba es de 5 cm/min y la temperatura es de 25°C.

El ensayo de ductilidad es un ensayo de identificación más que un ensayo cualitativo. Los asfaltos obtenidos de crudo de petróleo de origen nafténico, muestran en general gran ductilidad en comparación con los asfaltos obtenidos de crudos parafínicos.

##### **c. Viscosidad Cinemática: ASTM D-2170**

Es definida como la relación entre la viscosidad absoluta y la masa específica del fluido a la misma temperatura y presión.

Este ensayo se emplea para determinar la viscosidad de los asfaltos diluídos a 60°C y de los cementos asfálticos a 135°C, en un rango de viscosidad de 30 a 6000 cSt, y se utiliza para graduar a los asfaltos. El método consiste en medir el tiempo de flujo de

material bituminoso, a través de un tubo capilar calibrado, a una temperatura determinada. La viscosidad cinemática se obtiene al multiplicar el tiempo de flujo en segundos por la constante de flujo del capilar.

**d. Viscosidad Absoluta: ASTM D-2171**

Esta prueba es efectuada a semejanza de la Viscosidad Cinemática midiendo el tiempo de flujo en segundos, de determinado volumen de muestra a temperatura de 60°C utilizando un vacío constante de 300 mmHg durante toda la prueba.

**e. Prueba de Solubilidad en Tricloroetileno: ASTM D-2042**

La prueba de Solubilidad es una medida de pureza del cemento asfáltico. La porción del cemento asfáltico que es soluble en Tricloroetileno, representa los constituyentes cementantes activos. Sólo los materiales inertes como sales, carbón libre, o contaminantes no inorgánicos, son insolubles. El tricloroetileno es un disolvente adecuado para la determinación de la solubilidad de los asfaltos, pues resulta menos tóxico que el tetracloruro de carbono.

**f. Prueba de la Mancha: AASTHO T-102**

Llamada también prueba de OLIENSIS, determina la existencia de un alto nivel de asfaltenos que pueden estar presentes en el asfalto, al evaluar su solubilidad en un solvente específico como xileno, nafta, n-heptano, y en algunos casos en mezclas entre estos solventes, como por ejemplo: nafta-xileno (10% xileno).

La solubilidad del asfalto, estará indicada si no precipitan los asfaltenos y forman una mancha oscura en un papel de filtro, luego de haberlos disuelto en cualquiera de los solventes o mezclas mencionadas.

**g. Punto de Inflamación: ASTM D-92**

Mide la temperatura más baja a la cual un material bituminoso produce vapor suficiente para formar una mezcla que se enciende o se inflama en presencia de una pequeña llama. Muestra además la temperatura a la cual un material bituminoso puede calentarse (calor indirecto) sin peligro de inflamarse.



#### **h. Punto de Ablandamiento o Anillo y Bola: ASTM D-36**

En general los asfaltos no tienen una temperatura de fusión fija y definida, por lo que cuando se calientan van pasando gradual e imperceptiblemente desde una consistencia quebradiza o muy pastosa a otra más blanda y fluída.

Se denomina Punto de Ablandamiento, a la temperatura en grados celcius medida en el líquido del baño, en el instante en que se produce el contacto entre el asfalto y la placa de referencia. El conocimiento del Punto de Ablandamiento tiene utilidad en la comprobación de la uniformidad de las partidas y fuentes de suministro, y permite determinar la susceptibilidad térmica de los asfaltos.

#### **i. Oxidación en Película Fina: ASTM D-1754**

Es un ensayo que mide la durabilidad del material, o sea su capacidad de mantener sus propiedades coherentes y cementantes durante la vida útil del pavimento, consiste en colocar una muestra de asfalto de aproximadamente 50 gramos en una placa que rota entre 5 a 6 rpm, por un período de 5 horas dentro de un horno ventilado y mantenido a 163°C.

Las pruebas de ductilidad y penetración, entre otras, que se hacen al cemento asfáltico antes y después de la Oxidación en Película Fina, así como la determinación de la pérdida de masa, son consideradas como una medida de la resistencia del material a los cambios bajo las condiciones en las que se hace la prueba.

#### **j. Punto de Ruptura FRAASS: IP 80/87**

Es una de las pocas pruebas que pueden ser utilizadas para describir el comportamiento de los asfaltos a muy bajas temperaturas (-38°C). El Punto de Ruptura FRAASS es la temperatura a la cual el asfalto llega a tener una elasticidad crítica y se raja. La prueba consiste en flexionar una placa de acero de 41 mm de largo por 20 mm de ancho cubierta con 0.5 mm de asfalto. La temperatura de la placa se reduce a una razón de 1°C por minuto hasta que el asfalto se raja.

#### **k. Revestimiento y Desprendimiento: ASTM D-3625**

Con la finalidad de medir el grado de adherencia del asfalto en los agregados, esta prueba describe procedimientos de recubrimiento e inmersión estática para determinar la retención del asfalto en presencia del agua hirviendo.

## **I. Cromatografía por Adsorción: ASTM D-4124**

La separación de los asfaltenos por n-heptano es seguida por la adsorción de los maltenos en alúmina, y la subsecuente desorción con solventes de polaridad creciente, separando en saturados, naftenos aromáticos y polar aromáticos.

### **m. Índice de Penetración: RLB1-1964**

Los asfaltos que se utilizan en pavimentación tienen índices de penetración que varían de -1 a +1, de tal forma que un valor de cero significa una susceptibilidad adecuada, valores mayores que uno significa que el asfalto está oxidado (producto de un sobrecalentamiento) y altos valores negativos son indicativos de grandes cambios de consistencia con la temperatura. Sin embargo, éste rango es sólo aplicable para los llamados asfaltos del tipo S según Heukelom<sup>(22)</sup>, es decir, aquellos asfaltos cuyo cambio de consistencia con la temperatura, que es medida por la variación de la penetración con la temperatura o la viscosidad con la temperatura, varía de manera lineal en un amplio rango de ésta, y no es aplicable para los asfaltos oxidados o industriales, los asfaltos que contengan parafinas por encima de 2% y los asfaltos modificados, ya que en todos los casos para estos asfaltos los valores de índice de penetración son mayores que cero. Específicamente en el caso de los asfaltos modificados con polímeros elastómeros conforme se incrementa el porcentaje de polímero en la mezcla el índice de penetración se hace cada vez mas positivo y mayor que uno en muchos casos, lo cual si indicaría en éstos asfaltos una mejora de la susceptibilidad térmica a diferencia de un asfalto convencional o asfalto tipo S.

### **3.1.3.2. CARACTERIZACION DE ASFALTOS MODIFICADOS**

Adicionalmente a los ensayos que serán utilizados para la evaluación de los Cementos Asfálticos Convencionales, los Cementos Asfálticos Modificados con Polímeros serán sometidos a los siguientes ensayos:

#### **a. Compatibilidad: ASTM D-5892**

Una forma práctica de verificar la compatibilidad de una mezcla asfalto/polímero es colocando una muestra de asfalto en un tubo de aluminio, el cual es mantenido a una temperatura de 163°C por un período de 48 horas, luego del cual se retira el tubo del horno y se analiza el Punto de Ablandamiento de las muestras del tope y fondo del

tubo; los valores deberán ser los más cercanos posible para asegurar una buena compatibilidad entre ambos productos.

#### **b. Recuperación Elástica: ASTM D-6084**

El ensayo de Recuperación Elástica mide las características típicas de elasticidad y recuperación elástica a través del porcentaje de deformación recuperable después de una elongación de 10 cm de un cuerpo de prueba en un ductilómetro, puede ser efectuado a diferentes temperaturas antes y después del ensayo de Película Fina (ASTM D-1754).

### **3.2. MODIFICACION DE LOS ASFALTOS PEN 85/100 Y PEN 120/150 CON DIFERENTES TIPOS DE POLIMEROS**

#### **3.2.1. CARACTERIZACION DE LOS LIGANTES ASFALTICOS**

##### **ASFALTO PEN 85/100**

El Asfalto PEN 85/100 debido al grado de penetración que posee es utilizado en zonas tanto de clima moderado como frío. Con la formulación utilizada para su preparación este tipo de asfalto cumple con todas las especificaciones de calidad del asfalto convencional, asimismo es uno de los que tiene mayor demanda en el mercado nacional, por lo cual el interés en mejorar aun más sus cualidades resulta ser el objetivo de la modificación con polímeros.

##### **ASFALTO PEN 120/150**

El Asfalto PEN 120/150 debido al grado de penetración que posee es utilizado en zonas de altura, sin embargo se ha detectado en más de una oportunidad que cuando está colocado en servicio, a condiciones severas, posee una Alta Susceptibilidad Térmica originando ciertos problemas de fisuramiento en el pavimento; por lo cual el motivo de su modificación con polímeros será el proporcionarle Flexibilidad a Bajas Temperaturas y Buena Susceptibilidad Térmica mejorando así su performance.

Las propiedades físico - químicas de ambos asfaltos fueron evaluadas según especificaciones de PETROPERU con un riguroso control de calidad; los resultados se muestran en los **cuadros 23 y 24**.



**Cuadro 23**  
**PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DEL CEMENTO ASFALTICO PEN 85/100**  
**FORMULACION: CRUDO MEZCLA TIPO A**

PROPIEDADES	METODO	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES	
			Mín.	Máx.
<b>PENETRACION</b>				
a 10°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	20		
a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	89	85	100
a 30°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	154		
<b>DUCTILIDAD</b>				
a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D 113	> 150	100	
<b>FLUIDEZ</b>				
Viscosidad Cinemática a 100°C, cSt	ASTM D 2170	2440		
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	280	170	
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	1565		Reportar
<b>SOLUBILIDAD</b>				
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.86	99	
Prueba de la Mancha, 10% Xileno	AASHTO T 102	NEGATIVO		Reportar
<b>VOLATILIDAD</b>				
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	282	232	
<b>DENSIDAD</b>				
Gravedad API	ASTM D 70	7.1		Reportar
Gravedad Específica a 60/60°F	ASTM D 70	1.021		Reportar
<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b>				
Punto de Ruptura FRAASS, °C	IP 80/87	-17		Reportar
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	47.2		Reportar
Indice de Penetración	RLB1 - 1964	-0.8		Reportar
<b>Efecto de Calor y Aire (Película Fina)</b>				
Pérdida de masa por calentamiento, %		1.0		1.0
Penetración retenida, % de la original	ASTM D 5	55	47	
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D 113	81.4	75	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	555		Reportar
<b>ADHERENCIA</b>				
Revestimiento y Desprendimiento, %	ASTM D 3625	> 95		Reportar
<b>COMPOSICION QUIMICA</b>				
- Asfaltenos, % masa	ASMT D 4124	17.7		Reportar
- Saturados, % masa	ASTM D 4124	26.0		Reportar
- Naftenos Aromáticos, % masa	ASTM D 4124	38.1		Reportar
- Polar Aromáticos, % masa	ASTM D 4124	18.2		Reportar
<b>OBSERVACIONES:</b>				
<b>PRODUCTO DENTRO DE ESPECIFICACION</b>				
1. FECHA DE EXTRACCION DE MUESTRA: 5.06.2000				
2. PROCEDENCIA: TANQUE N°47 - PLANTA DE VENTAS				



**Cuadro 24**  
**PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DEL CEMENTO ASFALTICO PEN 120/150**  
**FORMULACION: CRUDO MEZCLA TIPO B**

PROPIEDADES	METODO	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES	
			Min.	Máx.
<b>PENETRACION</b>				
a 10°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	32		
a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	143	120	150
a 30°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	228		
<b>DUCTILIDAD</b>				
a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D 113	> 150	100	
<b>FLUIDEZ</b>				
Viscosidad Cinemática a 100°C, cSt	ASTM D 2170	1780		
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	227	140	
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	806		Reportar
<b>SOLUBILIDAD</b>				
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.91	99	
Prueba de la Mancha, 10% Xileno	AASTHO T 102	NEGATIVO		Reportar
<b>VOLATILIDAD</b>				
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	266	218	
<b>DENSIDAD</b>				
Gravedad API	ASTM D 70	7.9		Reportar
Gravedad Específica a 60/60°F	ASTM D 70	1.015		Reportar
<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b>				
Punto de Ruptura FRAASS, °C	IP 80/87	-16		Reportar
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	42.8		Reportar
Indice de Penetración	RLB1 - 1964	-0.4		Reportar
<b>Efecto de Calor y Aire (Película Fina)</b>				
Pérdida de masa por calentamiento, %		1.24		1.3
Penetración retenida, % de la original	ASTM D 5	46	42	
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D 113	> 150	100	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	438		Reportar
<b>ADHERENCIA</b>				
Revestimiento y Desprendimiento, %	ASTM D 3625	> 95		Reportar
<b>COMPOSICION QUIMICA</b>				
- Asfaltenos, % masa	ASMT D 4124	17.2		Reportar
- Saturados, % masa	ASTM D 4124	25.1		Reportar
- Naftenos Aromáticos, % masa	ASTM D 4124	38.6		Reportar
- Polar Aromáticos, % masa	ASTM D 4124	19.1		Reportar
<b>OBSERVACIONES:</b>				
<b>PRODUCTO DENTRO DE ESPECIFICACION</b>				
1. FECHA DE EXTRACCION DE MUESTRA: 20.11.2000				
2. PROCEDENCIA: PLANTA DE VENTAS - TANQUE 36				

### 3.2.2. ASFALTO MODIFICADO CON POLIMEROS Y COPOLIMEROS PLASTOMEROS

#### 3.2.2.1. ESPECIFICACIONES Y REQUISITOS DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON COPOLIMEROS PLASTOMEROS

Para fines de este estudio, las especificaciones y requisitos en las propiedades físico-químicas de los Asfaltos Modificados con Plastómeros serán las establecidas por la norma ASTM D 5841 para ASFALTOS MODIFICADOS TIPO III, las cuales se muestran en el **cuadro 25**.

Asimismo se consideró conveniente realizar otros ensayos establecidos a través de especificaciones que rigen en otros lugares del mundo, donde se clasifica a estos Asfaltos Modificados considerando la naturaleza plastómera del copolímero utilizado, y que permitirá una evaluación más completa del grado de modificación obtenido.

Dichos ensayos adicionales son los siguientes:

- Antes de Película Fina: Punto de Ablandamiento, Punto de Ruptura FRAASS e Índice de Penetración
- Después de Película Fina: Viscosidad Cinemática a 135°C, Punto de Ablandamiento. Adicionalmente se optó por realizar pruebas de Recuperación Elástica a diferentes condiciones de temperatura.

#### 3.2.2.2. ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO (PE)

##### A. CONDICIONES DE MEZCLA

PARAMETRO DE MODIFICACION	RANGO
Temperatura, °C	140 - 150
Tiempo, hr	0.45 - 1
Velocidad de agitación, rpm	300 - 400
Concentraciones de polímero, % masa	3%, 4%, 5%

##### B. RESULTADOS

Los resultados de la modificación de ambos asfaltos se muestran en el **cuadro 26**.

**CUADRO 25**  
**REQUERIMIENTO DE PROPIEDADES FISICAS**  
**PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS DE TIPO III SEGÚN ASTM D 5841**

PROPIEDADES	METODO ESTANDAR ASTM	III-A		III-B		III-C		III-D		III-E	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>PRODUCTO ORIGINAL</b>											
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	D 5	48		35		28		22		18	
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	D 5	30	150	30	150	30	150	30	150	30	150
Viscosidad 135°C, cSt	D 2170	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500
Flash Point COC, °C	D 92	218		218		218		218		218	
Punto de Ablandamiento, °C	D 36	52		54		57		60		63	
Solubilidad en Tricloroetileno, % Masa	D 2042	99		99		99		99		99	
Separación 135 °C, 18 hr	D 5841	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
<b>PRUEBA EN EL RESIDUO RTFOT ASTM 2872 O PELICULA FINA ASTM 1754</b>											
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	D 5	24		18		14		11		9	
Pérdida de masa por calentamiento, %			1		1		1		1		1



**Cuadro 26**  
**MODIFICACION DE CEMENTOS ASFALTICOS DE DISTINTO GRADO DE PENETRACION CON EL POLIMERO PE**

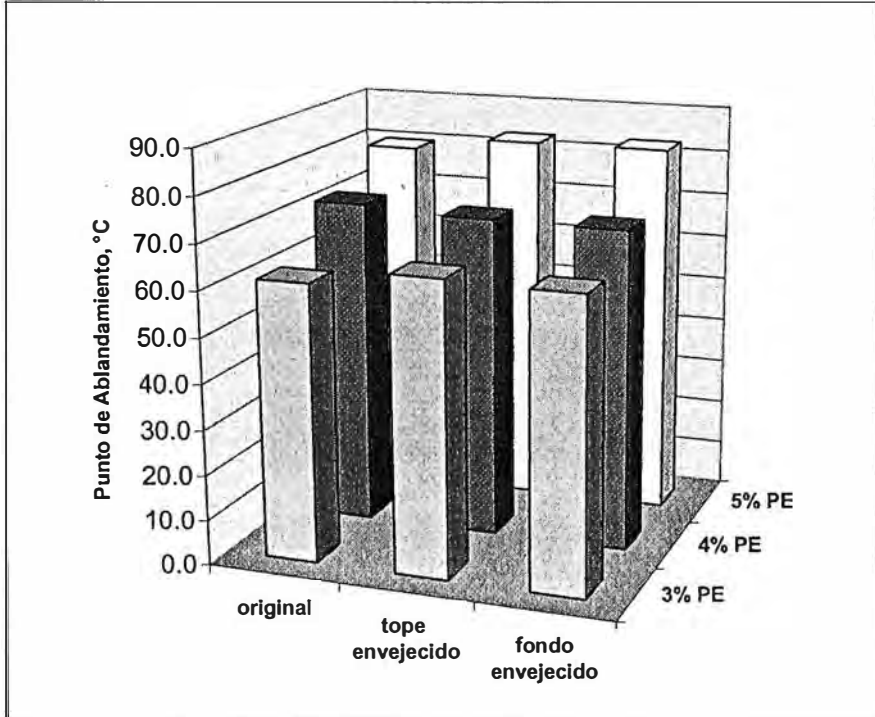
SOBRE EL LIGANTE ORIGINAL									
PROPIEDADES	METODO	C.A. 85/100	3% PE	4% PE	5% PE	C.A. 120/150	3% PE	4% PE	5% PE
<b>PENETRACION</b>									
a 30°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	154	109	108	97	228	150	142	135
a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	89	68	63	62	143	98	95	94
a 15°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	32	25	24	24	47	37	34	35
a 10°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	20	15	15	15	32	24	23	25
a 5°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	11	11	11	12	20	18	15	17
a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	38	35	34	28	53	47	41	38
<b>FLUIDEZ</b>									
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	280	333	355	375	227	264	280	297
<b>SOLUBILIDAD</b>									
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.86	99.48	99.58	99.47	99.91	99.34	99.67	99.39
<b>VOLATILIDAD</b>									
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	282	288	296	296	266	266	274	285
<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b>									
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	47.2	61.4	72.4	80.0	42.8	57.8	65.0	76.8
Punto de Ruptura FRAASS, °C	IP 80/87	-17	-18	-20	-20	-16	-16	-17	-17
Indice de Penetración	RLB1 - 1964	-0.8	-0.2	-0.1	0.4	-0.4	0.3	0.0	0.6
<b>RECUPERACION ELASTICA</b>									
a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	22	22	23	23	3	13	13	11
a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	21	27	23	26	7	13	16	13
a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	21	21	23	21	3	13	14	12
<b>COMPATIBILIDAD ASFALTO/POLIMERO</b>									
Diferencia Punto De Ablandamiento, tope/fondo, °C	ASTM D 5892	—	0.6	0.2	0.0	—	0.4	0.4	0.2
<b>SOBRE EL RESIDUO ENVEJECIDO. TFOT</b>									
<b>EFFECTO DE CALOR Y AIRE</b>									
Pérdida de masa por calentamiento, %		1.0	0.96	0.92	0.94	1.24	1.21	1.14	1.18
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	49	41	39	39	66	53	52	49
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	25	24	21	21	33	26	27	26
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	55.8	75.0	83.0	87.0	54.0	69.2	80.0	85.0
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	555	676	753	812	438	538	595	650
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	25	28	25	21	12	14	15	13
Recuperación Elástica a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	23	28	28	29	10	13	15	16
Recuperación Elástica a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	23	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> No se pudo completar el ensayo por ruptura de la muestra antes de alcanzar los 10 cm de elongación

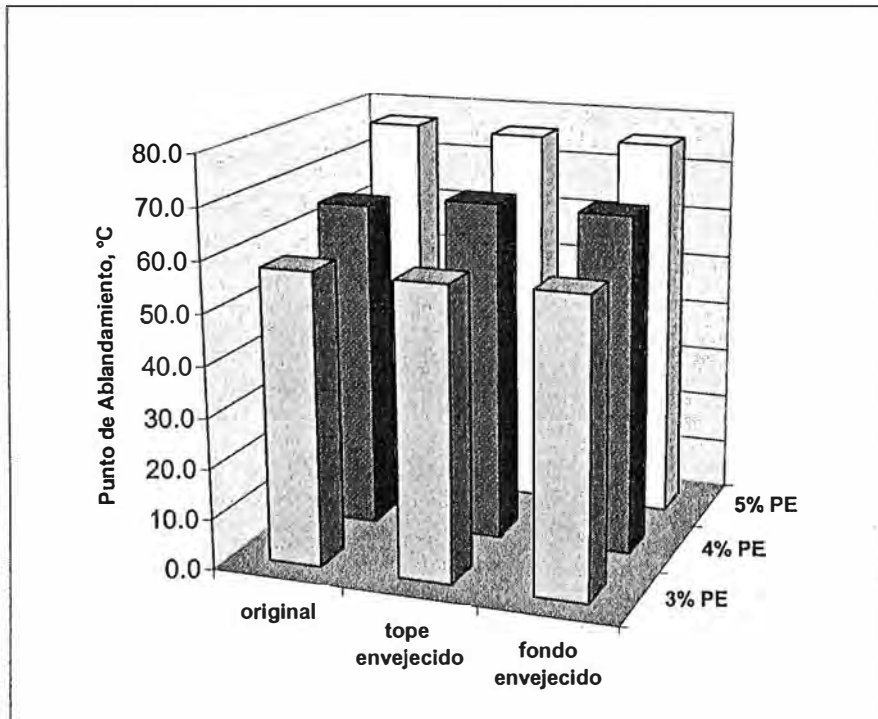


### C. COMPATIBILIDAD DEL PE Y EL ASFALTO BASE EN LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS

#### COMPATIBILIDAD POLIMERO/ASFALTO BASE PEN 85/100

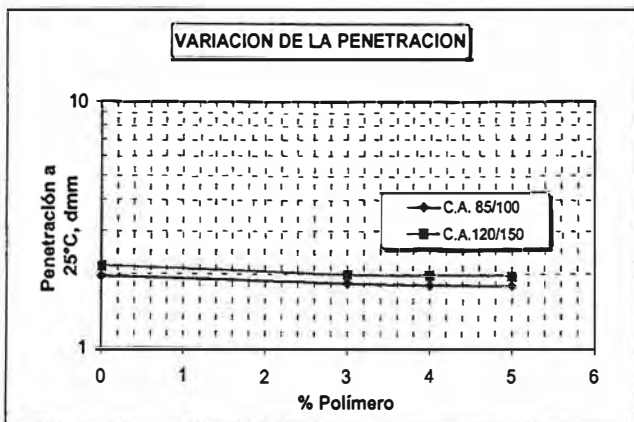


#### COMPATIBILIDAD POLIMERO/ASFALTO BASE PEN 120/150

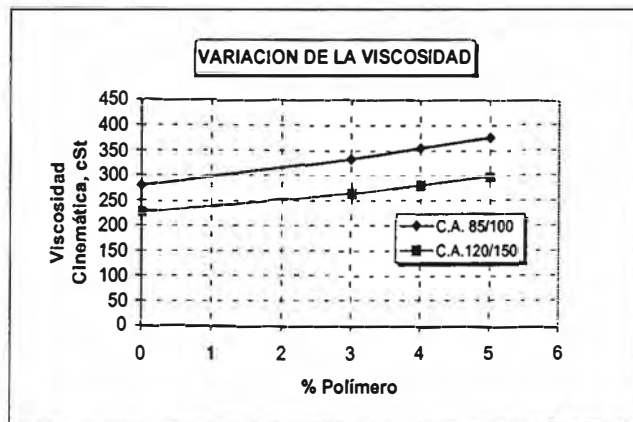


## D.EFECTOS DEL PE EN LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS LIGANTES ASFALTICOS CONVENCIONALES

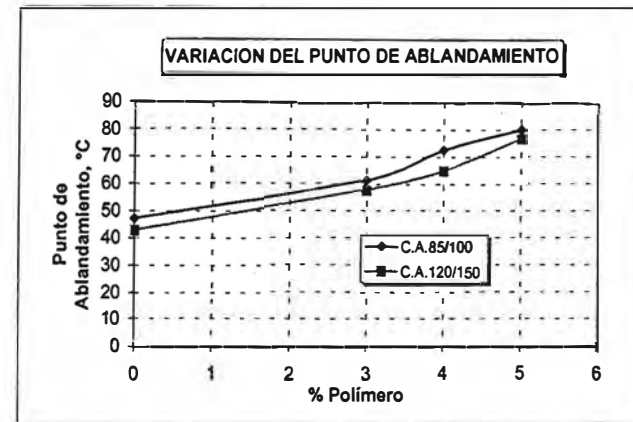
1. Penetración, ASTM D 5



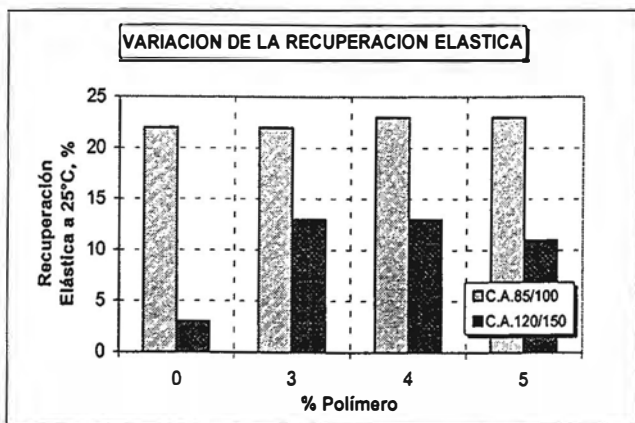
2. Viscosidad Cinemática, ASTM D 2170



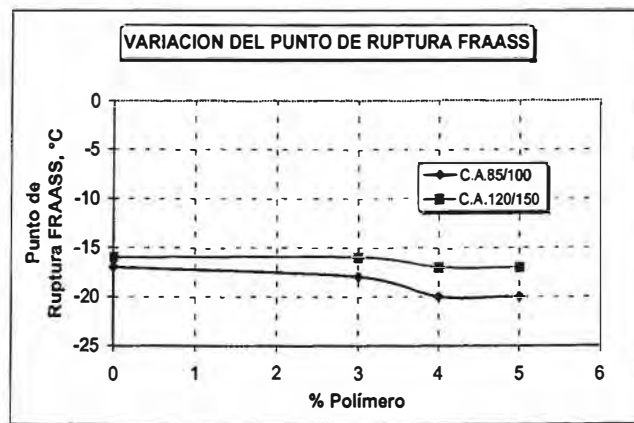
3. Punto de Ablandamiento, ASTM D 36



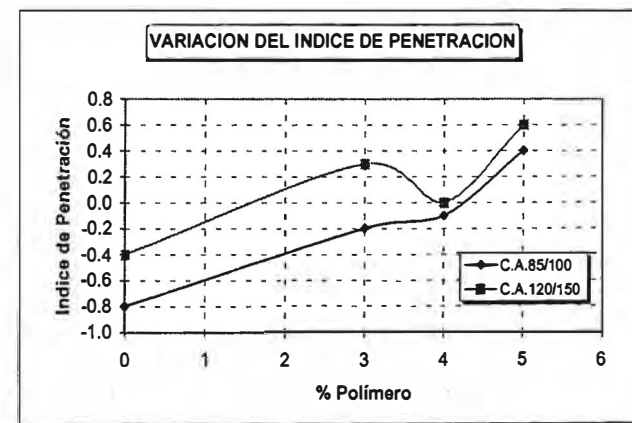
4. Recuperación Elástica, ASTM D 6084



5. Punto de Ruptura FRAASS, IP 80/87



6. Índice de Penetración, RLB1 - 1964





E. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON PE SEGÚN ASTM D 5841

ASFALTO BASE PEN 85/100

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO III										
PROPIEDADES		METODO	3% PE	4% PE	5% PE	III - A		III - B		III - C		III - D		III - E	
						Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm		ASTM D 5	35	34	28	48		35		28		22		18	
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm		ASTM D 5	68	63	62	30	150	30	150	30	150	30	150	30	150
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt		ASTM D 2170	333	355	375	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500
Punto de Inflamación, COC, °C		ASTM D 92	288	296	296	218		218		218		218		218	
Punto de Ablandamiento, °C		ASTM D 36	61.4	72.4	80.0	52		54		57		60		63	
Separación a 135°C, 18 hr <sup>(1)</sup>		ASTM D 5841	0.6	0.2	0.0	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa		ASTM D 2042	99.48	99.58	99.47	99		99		99		99		99	
RESIDUO ENVEJECIDO. ASTM D 1754															
Pérdida de masa por calentamiento, %			0.96	0.92	0.94		1		1		1		1		1
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm		ASTM D 5	24	21	21	24		18		14		11		9	

<sup>(1)</sup> La prueba de Separación o Compatibilidad fue efectuada a 163°C por un periodo de 48 horas según normas ASTM D 5892

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3		III B, III C, III D	
	4		III C, III D, III E	
	5		III C, III D, III E	

ASFALTO BASE PEN 120/150

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO III										
PROPIEDADES		METODO	3% PE	4% PE	5% PE	III - A		III - B		III - C		III - D		III - E	
						Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm		ASTM D 5	47	41	38	48		35		28		22		18	
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm		ASTM D 5	98	95	94	30	150	30	150	30	150	30	150	30	150
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt		ASTM D 2170	264	280	297	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500
Punto de Inflamación, COC, °C		ASTM D 92	266	274	285	218		218		218		218		218	
Punto de Ablandamiento, °C		ASTM D 36	57.8	65.0	76.8	52		54		57		60		63	
Separación a 135°C, 18 hr <sup>(1)</sup>		ASTM D 5841	0.4	0.4	0.2	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa		ASTM D 2042	99.34	99.67	99.39	99		99		99		99		99	
RESIDUO ENVEJECIDO. ASTM D 1754															
Pérdida de masa por calentamiento, %			1.21	1.14	1.18		1		1		1		1		1
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm		ASTM D 5	26	27	26	24		18		14		11		9	

<sup>(1)</sup> La prueba de Separación o Compatibilidad fue efectuada a 163°C por un periodo de 48 horas según normas ASTM D 5892

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3		---	
	4		---	
	5		---	

## **F. DISCUSION DE RESULTADOS**

A continuación se hace la discusión de los resultados obtenidos luego de la evaluación de propiedades de las distintas formulaciones asfálticas preparadas con PE.

### **a. Compatibilidad**

Para evaluar la Compatibilidad en mezclas preparadas con Polímeros Plastómeros, la norma ASTM D 5841, correspondiente a las especificaciones de los Asfaltos Modificados Tipo III, requieren una evaluación tan sólo cualitativa de la mezcla luego de un periodo de 18 hr de calentamiento a 135°C. Sin embargo, para fines de este estudio, se optó por evaluar la Compatibilidad o Separación de manera cuantitativa sometiendo la muestra a 163°C por un periodo de 48 horas, a fin de que estas condiciones sean iguales en todos los polímeros evaluados; esto se ha hecho evaluando el Punto de Ablandamiento de las secciones del tope y fondo de un tubo de aluminio especialmente diseñado para esta prueba, tal como se realizará en el caso de Asfaltos Modificados con Polímeros Elastómeros.

En las seis formulaciones asfálticas preparadas con PE, se observó una GRAN AFINIDAD ENTRE LOS ASFALTOS EVALUADOS Y EL PE, lo cual asegura homogeneidad de la mezcla y una buena estabilidad al almacenamiento.

### **b. Efectos del PE en el Ligante Original**

- Disminución de la Penetración
- Incremento ligero de la Viscosidad
- Alto incremento del Punto de Ablandamiento mejorando la resistencia a las deformaciones o ahuellamientos
- Incremento del Índice de Penetración, disminuyendo la Susceptibilidad Térmica
- Mínima Recuperación Elástica lo cual se explica por las características plásticas del polímero
- No afecta el Punto de Ruptura FRAASS

### **c. Resistencia al Envejecimiento**

Para evaluar la Resistencia al Envejecimiento fueron medidas propiedades como Viscosidad, Penetración y Punto de Ablandamiento, tanto antes como después del

ensayo de Película Fina, TFOT. A partir de dichos datos fue calculada la variación en % de cada una de estas propiedades.

Propiedad evaluada después del TFOT	VARIACION RESPECTO AL VALOR ORIGINAL							
	C.A.85/100	3% PE	4% PE	5% PE	C.A.120/150	3% PE	4% PE	5% PE
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	+98%	+103%	+112%	+117%	+93%	+104%	+113%	+119%
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	-45%	-40%	-38%	-37%	-54%	-46%	-45%	-48%
Punto de Ablandamiento, °C	+18%	+22%	+15%	+9%	+26%	+20%	+23%	+11%

#### d. Clasificación de los Asfaltos Modificados con PE según normas ASTM

Luego de la evaluación de propiedades físicas de las formulaciones asfálticas preparadas con PE requeridas por la norma ASTM D 5841 para ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMERO TIPO III, se llevó a cabo la clasificación de cada formulación asfáltica en los siguientes grupos:

CLASIFICACION DE LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON PE SEGUN NORMA ASTM D 5841	% POLIMERO	ASFALTO BASE	GRUPO
	3	PEN 85/100	III B, III C, III D
	4	PEN 85/100	III C, III D, III E
	5	PEN 85/100	III C, III D, III E

No se logró clasificar ninguna de las formulaciones asfálticas modificadas con PE con asfalto 120/150 como asfalto base, por el alto valor en pérdida de este asfalto, el cual a su vez no fue mejorado considerablemente con PE.

#### 3.2.2.3. ASFALTO MODIFICADO CON COPOLIMERO ETIL/VINIL ACETATO (EVA)

##### A. CONDICIONES DE MEZCLA

PARAMETRO DE MODIFICACION	RANGO
Temperatura, °C	160 - 170
Tiempo, hr	1.5 - 2.5
Velocidad de agitación, rpm	400 - 500
Concentraciones de polímero, % masa	3%, 4%, 5%

##### B. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de manera comparativa de la modificación de los Asfaltos PEN 85/100 y PEN 120/150 con el copolímero Etil/Vinil Acetato (EVA).



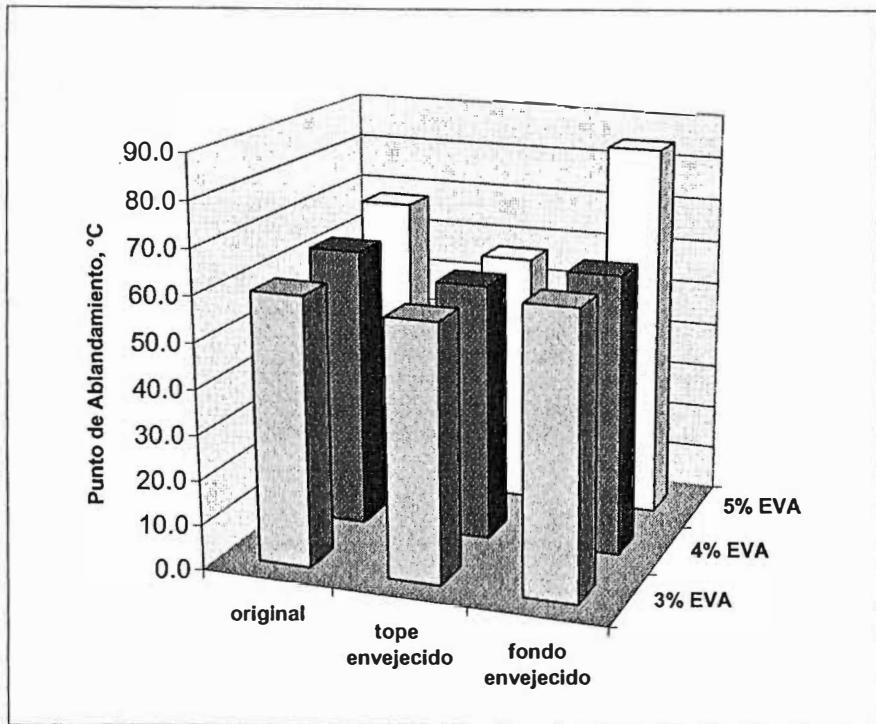
**Cuadro 27**  
**MODIFICACION DE CEMENTOS ASFALTICOS DE DISTINTO GRADO DE PENETRACION CON EL COPOLIMERO EVA**

PROPIEDADES	METODO	SOBRE EL LIGANTE ORIGINAL							
		C.A. 85/100	3% EVA	4% EVA	5% EVA	C.A. 120/150	3% EVA	4% EVA	5% EVA
<b>PENETRACION</b>									
a 30°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	154	88	72	80	228	123	107	107
a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	89	61	58	63	143	84	80	77
a 15°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	32	26	25	26	47	37	40	40
a 10°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	20	17	18	19	32	25	24	24
a 5°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	11	11	13	14	20	15	17	16
a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	38	31	28	37	53	42	43	47
<b>FLUIDEZ</b>									
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	280	1078	1370	1792	227	715	928	1515
<b>SOLUBILIDAD</b>									
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.86	99.67	99.89	99.75	99.91	99.85	99.85	99.51
<b>VOLATILIDAD</b>									
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	282	288	263	260	266	263	274	254
<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b>									
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	47.2	59.8	62.8	67.8	42.8	56.6	61.6	62.6
Punto de Ruptura FRAASS, °C	IP 80/87	-17	-18	-18	-18	-16	-18	-18	-19
Indice de Penetración	RLB1 - 1964	-0.8	0.7	1.8	1.6	-0.4	0.7	1.4	1.3
<b>RECUPERACION ELASTICA</b>									
a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	22	49	52	50	3	38	43	50
a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	21	49	47	45	7	40	33	42
a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	21	40	38	40	3	42	29	33
<b>COMPATIBILIDAD ASFALTO/POLIMERO</b>									
Diferencia Punto De Ablandamiento, tope/fondo, °C	ASTM D 5892	—	5.6	4.8	27.5	—	0.6	3.4	0.6
<b>SOBRE EL RESIDUO ENVEJECIDO, TFOT</b>									
<b>EFFECTO DE CALOR Y AIRE</b>									
Pérdida de masa por calentamiento, %		1.0	0.77	0.72	0.77	1.24	1.05	0.97	0.99
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	49	43	42	44	66	56	62	78
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	25	24	22	27	33	29	30	40
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	55.8	71.0	73.8	81.0	54.0	64.0	68.8	74.2
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	555	2096	2367	2819	438	1405	1864	2511
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	25	47	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	12	32	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>
Recuperación Elástica a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	23	40	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	10	31	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>
Recuperación Elástica a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	23	33	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	28	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>

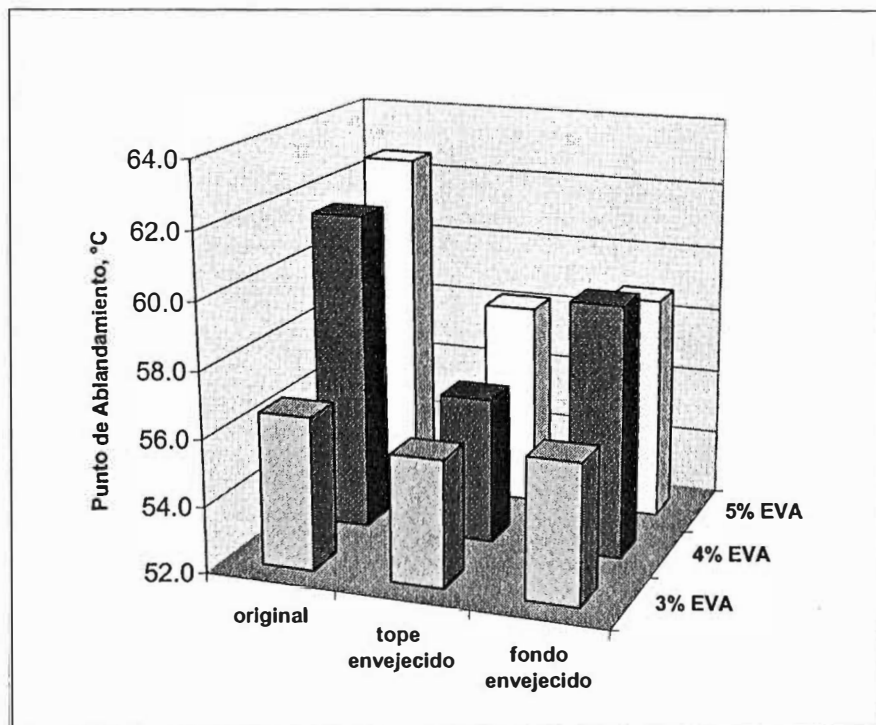
<sup>(1)</sup> No se pudo completar el ensayo por ruptura de la muestra antes de alcanzar los 10 cm de elongación

### C. COMPATIBILIDAD DEL EVA Y EL ASFALTO BASE EN LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS

#### COMPATIBILIDAD POLIMERO/ASFALTO BASE PEN 85/100

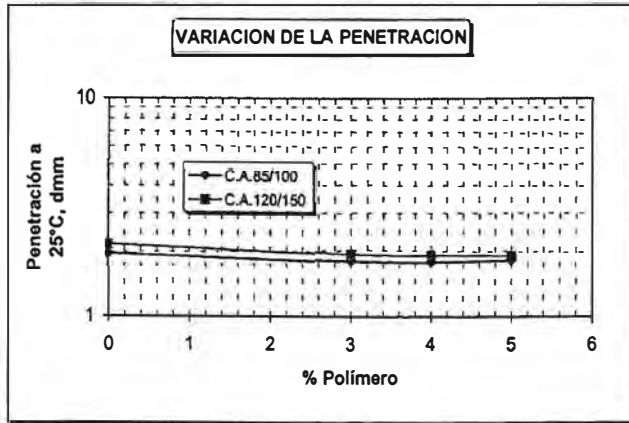


#### COMPATIBILIDAD POLIMERO/ASFALTO BASE PEN 120/150

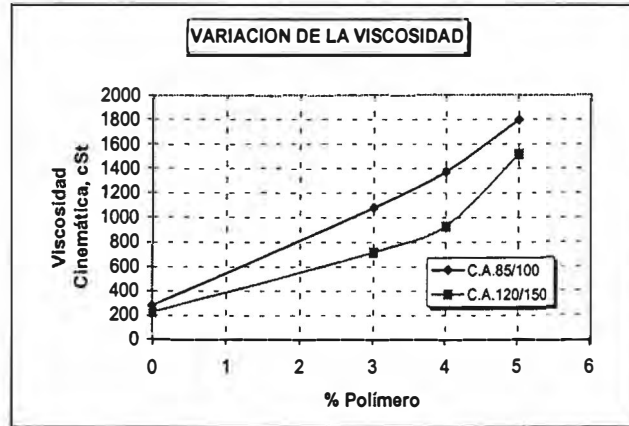


## D. EFECTOS DEL EVA EN LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS LIGANTES ASFALTICOS CONVENCIONALES

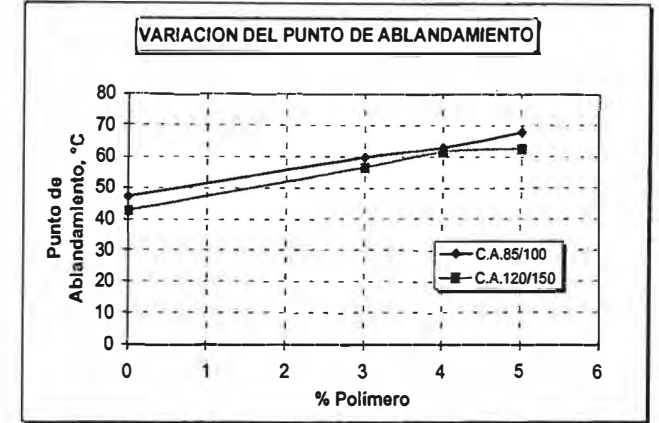
1. Penetración, ASTM D 5



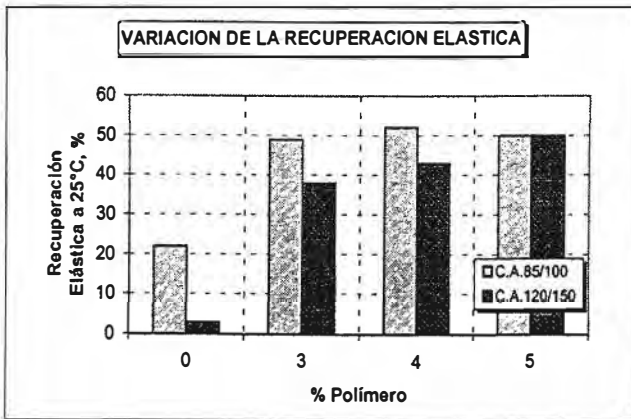
2. Viscosidad Cinemática, ASTM D 2170



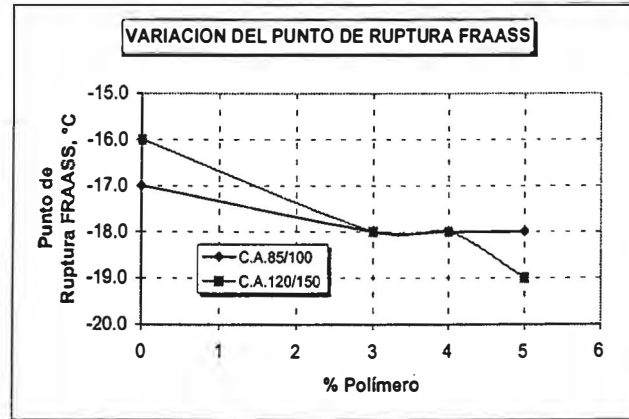
3. Punto de Ablandamiento, ASTM D 36



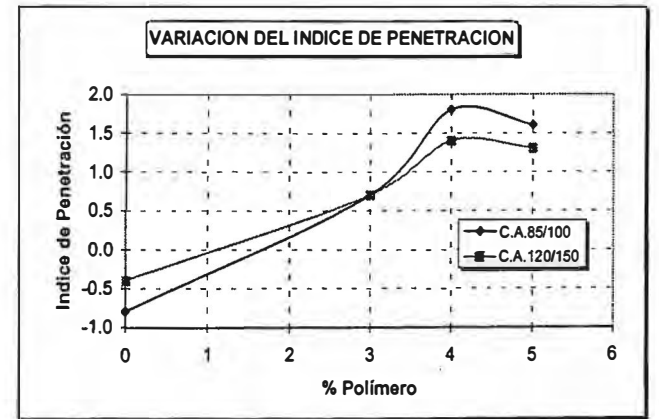
4. Recuperación Elástica, ASTM D 6084



5. Punto de Ruptura FRAASS, IP 80/87



6. Índice de Penetración, RLB1 - 1964







E. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON EVA SEGÚN ASTM D 5841

ASFALTO BASE PEN 85/100

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO III										
PROPIEDADES		METODO	3% EVA	4% EVA	5% EVA	III - A		III - B		III - C		III - D		III - E	
						Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm		ASTM D 5	31	28	37	48		35		28		22		18	
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm		ASTM D 5	61	58	63	30	150	30	150	30	150	30	150	30	150
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt		ASTM D 2170	1078	1370	1792	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500
Punto de Inflamación, COC, °C		ASTM D 92	288	263	260	218		218		218		218		218	
Punto de Ablandamiento, °C		ASTM D 36	59.8	62.8	67.8	52		54		57		60		63	
Separación a 135°C, 18 hr <sup>(1)</sup>		ASTM D 5841	5.6	4.8	27.5	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa		ASTM D 2042	99.67	99.89	99.75	99		99		99		99		99	
RESIDUO ENVEJECIDO. ASTM D 1754															
Pérdida de masa por calentamiento, %			0.77	0.72	0.77		1		1		1		1		1
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm		ASTM D 5	24	22	27	24		18		14		11		9	

<sup>(1)</sup> La prueba de Separación o Compatibilidad fue efectuada a 163°C por un periodo de 48 horas según normas ASTM D 5892

CLASIFICACION	% POLIMERO	GRUPO
	3	III C
	4	III C, III D
	5	---

ASFALTO BASE PEN 120/150

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO III										
PROPIEDADES		METODO	3% EVA	4% EVA	5% EVA	III - A		III - B		III - C		III - D		III - E	
						Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm		ASTM D 5	42	43	47	48		35		28		22		18	
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm		ASTM D 5	84	80	77	30	150	30	150	30	150	30	150	30	150
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt		ASTM D 2170	715	928	1515	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500
Punto de Inflamación, COC, °C		ASTM D 92	263	274	254	218		218		218		218		218	
Punto de Ablandamiento, °C		ASTM D 36	56.6	61.6	62.6	52		54		57		60		63	
Separación a 135°C, 18 hr <sup>(1)</sup>		ASTM D 5841	0.6	3.4	0.6	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa		ASTM D 2042	99.85	99.85	99.51	99		99		99		99		99	
RESIDUO ENVEJECIDO. ASTM D 1754															
Pérdida de masa por calentamiento, %			1.05	0.97	0.99		1		1		1		1		1
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm		ASTM D 5	29	30	40	24		18		14		11		9	

<sup>(1)</sup> La prueba de Separación o Compatibilidad fue efectuada a 163°C por un periodo de 48 horas según normas ASTM D 5892

CLASIFICACION	% POLIMERO	GRUPO
	3	---
	4	III B, III C, III D
	5	---

## **F. DISCUSION DE RESULTADOS**

### **a. Compatibilidad**

Luego de modificar el asfalto PEN 85/100, se observó una gran INCOMPATIBILIDAD con 5% de EVA, además ninguna de las formulaciones modificadas tuvieron buena estabilidad al almacenamiento ya que el Punto de Ablandamiento del asfalto envejecido varió considerablemente con el Punto de Ablandamiento del asfalto original.

En el caso de la modificación del asfalto PEN 120/150, los resultados de compatibilidad fueron mucho mejores que en el caso anterior, sin embargo la estabilidad al almacenamiento en caliente no fue mejorada.

La falta de COMPATIBILIDAD y ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO darían como consecuencia la SEPARACION DE AMBOS PRODUCTOS, ya sea luego del proceso de preparación de la mezcla o cuando se encuentre en servicio, es decir como parte del pavimento, influyendo de manera negativa en el desempeño de la carpeta asfáltica.

### **b. Efectos del EVA en el Ligante Original**

- Disminución de la Penetración
- Incremento notable de la Viscosidad
- Incrementa el Punto de Ablandamiento mejorando la resistencia a las deformaciones o ahuellamientos
- Mejora la Recuperación Elástica pese a ser un copolímero Plastómero hasta 52% (4% EVA - ASFALTO BASE PEN 85/100 - Temperatura: 25°C)
- No afecta el Punto de Ruptura FRAASS

### **c. Resistencia al Envejecimiento**

Para evaluar la Resistencia al Envejecimiento fueron medidas propiedades como Viscosidad, Penetración y Punto de Ablandamiento, tanto antes como después del ensayo de Película Fina, TFOT. A partir de dichos datos fue calculada la variación en % de cada una de estas propiedades.

Propiedad evaluada después del TFOT	VARIACION RESPECTO AL VALOR ORIGINAL							
	CA 85/100	3% EVA	4% EVA	5% EVA	CA 120/150	3% EVA	4% EVA	5% EVA
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	+98%	+94%	+73%	+57%	+93%	+97%	+101%	+66%
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	-45%	-30%	-28%	-30%	-54%	-33%	-23%	+1%
Punto de Ablandamiento, °C	+18%	+19%	+18%	+19%	+26%	+13%	+12%	+19%

#### d. Clasificación de los Asfaltos Modificados con EVA según normas ASTM

Luego de la evaluación de propiedades físicas de las formulaciones asfálticas preparadas con EVA requeridas por la norma ASTM D 5841 para ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMERO TIPO III, se llevó a cabo la clasificación de cada formulación asfáltica en los siguientes grupos:

CLASIFICACION DE LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON EVA SEGUN NORMA ASTM D 5841	% POLIMERO	ASFALTO BASE	GRUPO	ASFALTO BASE	GRUPO
	3	PEN 85/100	III C	PEN 120/150	---
	4	PEN 85/100	III C, III D	PEN 120/150	III B, III C, III D
	5	PEN 85/100	---	PEN 120/150	---

La pérdida de masa del asfalto PEN 120/150 no fue mejorada con 3% de EVA, por lo cual no obtuvo clasificación como Asfalto Modificado TIPO III. Por otro lado, las formulaciones asfálticas modificadas con EVA poseen una alta viscosidad comparada con la del asfalto original, dando lugar a que la Viscosidad Cinemática de los Asfaltos Modificados con 5% de EVA estuviera fuera del rango establecido, el cual es de 150 a 1500 cSt para los Asfaltos Modificados TIPO III, y por lo tanto no permita su clasificación.

### 3.2.3. ASFALTO MODIFICADO CON COPOLIMEROS ELASTOMEROS

#### 3.2.3.1. ESPECIFICACIONES Y REQUISITOS DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON COPOLIMEROS ELASTOMEROS

Para fines de este estudio, las especificaciones y requisitos en las propiedades físico-químicas de los Asfaltos Modificados con Elastómeros serán las establecidas por las normas ASTM D 5976 y D 5892 para ASFALTOS MODIFICADOS TIPO I y TIPO IV, las cuales se muestran en los **cuadros 28 y 29**.

Asimismo, se consideró conveniente realizar otros ensayos establecidos a través de especificaciones que rigen en otros lugares del mundo, donde se clasifica a estos

**CUADRO 28**  
**REQUERIMIENTO DE PROPIEDADES FISICAS**  
**PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS DE TIPO I SEGÚN ASTM D 5976**

PROPIEDADES	METODO ESTANDAR ASTM	I-A		I-B		I-C		I-D	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>PRODUCTO ORIGINAL</b>									
Penetración a 25°C, 100 gr. 5 seg. dmm	D 5	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad 60°C, Po	D 2171	1250		2500		5000		5000	
Viscosidad 135°C, cSt	D 2170		2000		2000		2000		5000
Flash Point COC, °C	D 92	232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % Masa	D 2042	99		99		99		99	
Separación, Diferencia Pto. Ablandamiento, °C	D 5976		2.2		2.2		2.2		2.2
<b>PRUEBA EN EL RESIDUO RTFOT ASTM 2872 O PELICULA FINA ASTM 1754</b>									
Recuperación Elástica, a 25°C, 10 cm elongación, %	D 5976	60		60		60		60	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	D 5	20		15		13		10	

**CUADRO 29**  
**REQUERIMIENTO DE PROPIEDADES FISICAS**  
**PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS DE TIPO IV SEGÚN ASTM D 5892**

PROPIEDADES	METODO ESTANDAR ASTM	IV-A		IV-B		IV-C		IV-D		IV-E		IV-F	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>PRODUCTO ORIGINAL</b>													
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	D 5	90		75		65		50		50		35	
Viscosidad 60°C, Po	D 2171	1250		4000		2500		6000		4500		8000	
Viscosidad 135°C, cSt	D 2170		3000		3000		3000		3000		3000		3000
Flash Point COC, °C	D 92	232		232		232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % Masa	D 2042	99		99		99		99		99		99	
Separación, Diferencia Pto. Ablandamiento, °C	D 5892	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
<b>PRUEBA EN EL RESIDUO RTFOT ASTM 2872 O PELICULA FINA ASTM 1754</b>													
Recuperación Elástica, a 25°C, 10 cm elongación, %	D 5892	60		70		60		70		60		70	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	D 5	20		20		15		15		10		10	

Asfaltos Modificados considerando la naturaleza elastómera del copolímero utilizado y que permitirá una evaluación más completa del grado de modificación obtenido.

Dichos ensayos adicionales son los siguientes:

- Antes de Película Fina: Recuperación Elástica a diferentes temperaturas: 25°C, 15°C y 5°C, Punto de Ablandamiento y Punto de Ruptura FRAASS
- Después de Película Fina: Viscosidad Cinemática a 135°C, Punto de Ablandamiento y Recuperación Elástica a diferentes temperaturas: 25°C, 15°C y 5°C

### 3.2.3.2. ASFALTO MODIFICADO CON COPOLIMERO SBS

#### A. CONDICIONES DE MEZCLA

PARAMETRO DE MODIFICACION	RANGO
Temperatura, °C	160 - 180
Tiempo, hr	1 - 1.5
Velocidad de agitación, rpm	350 - 450
Concentraciones de polímero, % masa	3%, 4%, 5%

#### B. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de manera comparativa de la modificación de los Asfaltos PEN 85/100 y PEN 120/150 con el copolímero Estireno/Butadieno/Estireno (SBS).



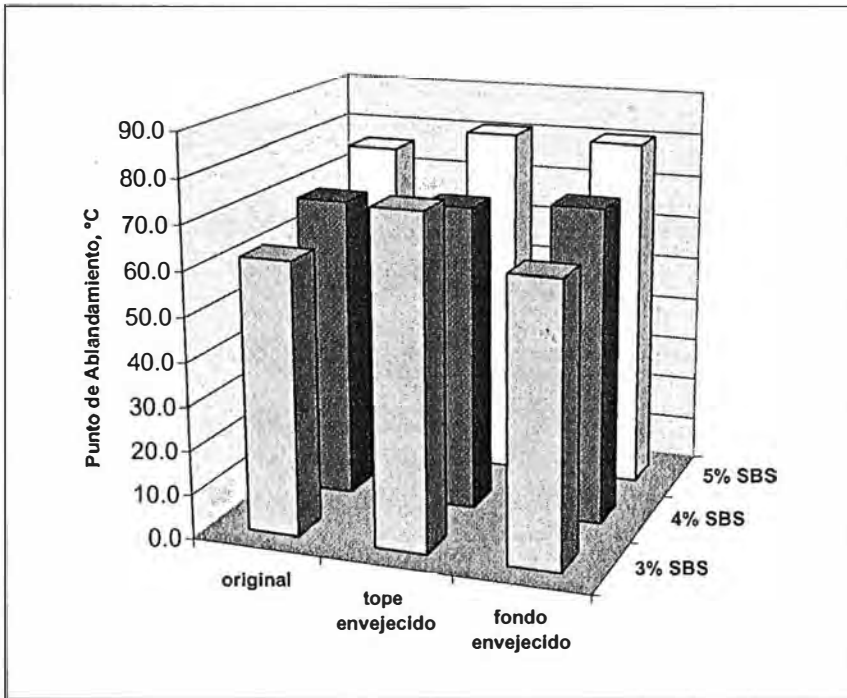
**Cuadro 30**  
**MODIFICACION DE CEMENTOS ASFALTICOS DE DISTINTO GRADO DE PENETRACION CON EL COPOLIMERO SBS**

SOBRE EL LIGANTE ORIGINAL									
PROPIEDADES	METODO	C.A. 85/100	3% SBS	4% SBS	5% SBS	C.A. 120/150	3% SBS	4% SBS	5% SBS
<b>PENETRACION</b>									
a 30°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	154	89	73	65	228	119	96	81
a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	89	60	56	56	143	80	69	62
a 15°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	32	26	24	24	47	41	31	31
a 10°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	20	17	16	16	32	26	24	25
a 5°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	11	12	11	11	20	17	17	18
a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	38	31	29	30	53	43	46	39
<b>FLUIDEZ</b>									
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	280	1153	1723	2534	227	759	1186	1843
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	1565	13833	40945	203566	806	5822	58210	222212
<b>SOLUBILIDAD</b>									
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.86	99.72	99.74	99.87	99.91	99.85	99.75	99.69
<b>VOLATILIDAD</b>									
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	282	274	286	268	266	268	268	268
<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b>									
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	47.2	62.0	69.0	76.0	42.8	57.0	69.2	72.0
Punto de Ruptura FRAASS, °C	IP 80/87	-17	-20	-23	-25	-16	-20	-22	-24
Índice de Penetración	RLB1 - 1964	-0.8	0.9	1.2	1.5	-0.4	1.3	1.9	3.0
<b>RECUPERACION ELASTICA</b>									
a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	22	83	88	89	3	83	89	90
a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	21	71	77	79	7	73	77	78
a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	21	58	56	57	3	61	62	63
<b>COMPATIBILIDAD ASFALTO/POLIMERO</b>									
Diferencia Punto De Ablandamiento, tope/fondo, °C	ASTM D 5892	—	11.6	2.0	0.5	—	14.4	12.6	5.0
<b>SOBRE EL RESIDUO ENVEJECIDO. TFOT</b>									
<b>EFECTO DE CALOR Y AIRE</b>									
Pérdida de masa por calentamiento, %		1.0	0.77	0.80	0.84	1.24	0.96	1.00	0.99
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	49	42	42	40	66	56	53	51
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	25	25	25	25	33	31	37	31
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	55.8	65.0	73.0	79.5	54.0	60.8	71.8	76.0
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	555	1372	2468	3306	438	1035	1566	2103
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	25	65	73	76	12	57	75	70
Recuperación Elástica a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	23	61	63	63	10	58	63	59
Recuperación Elástica a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	23	45	47	49	- <sup>(1)</sup>	48	48	47

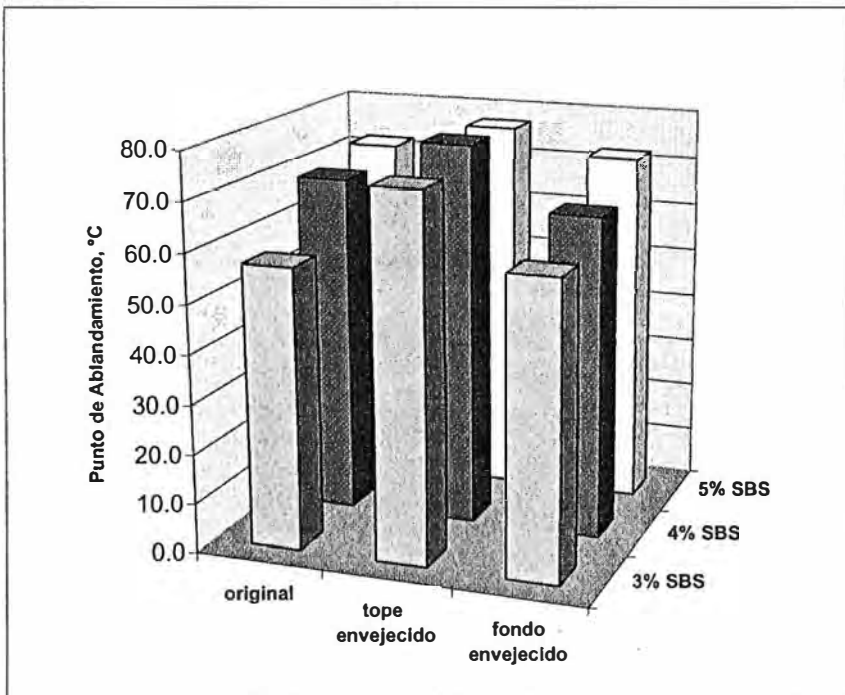
<sup>(1)</sup> No se pudo completar el ensayo por ruptura de la muestra antes de alcanzar los 10 cm de elongación

### C. COMPATIBILIDAD DEL SBS Y EL ASFALTO BASE EN LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS

#### COMPATIBILIDAD POLIMERO/ASFALTO BASE PEN 85/100



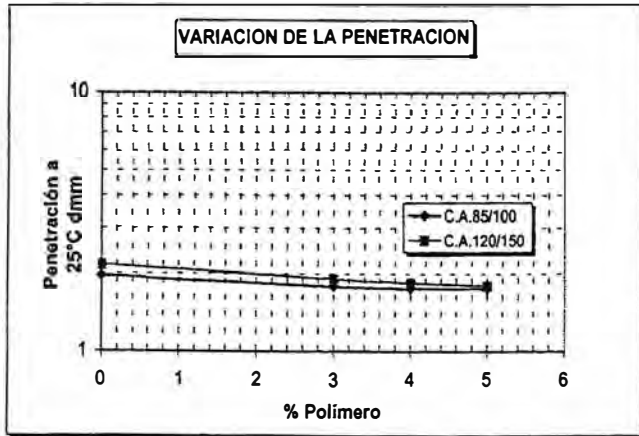
#### COMPATIBILIDAD POLIMERO/ASFALTO BASE PEN 120/150



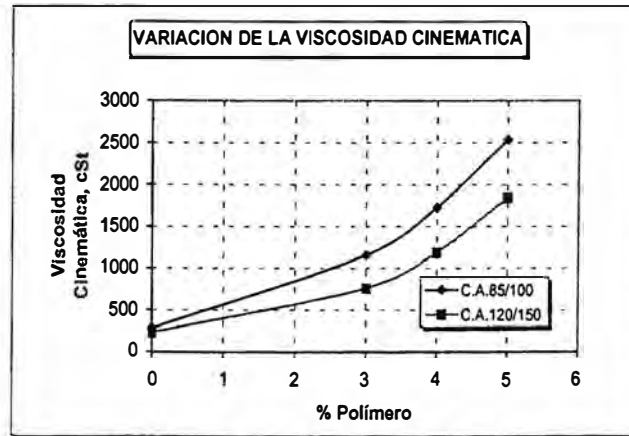


## D. EFECTOS DEL SBS EN LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS LIGANTES ASFALTICOS CONVENCIONALES

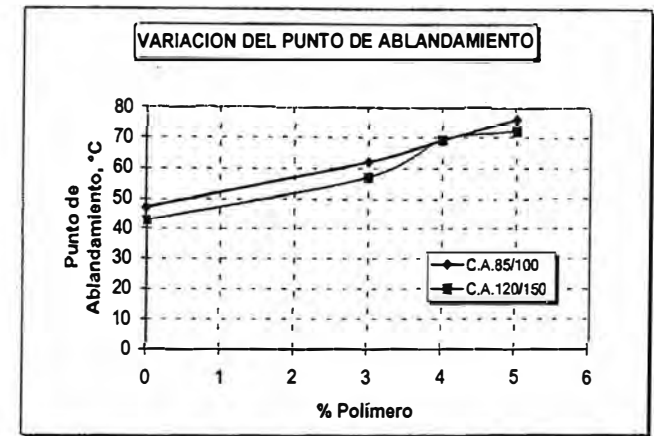
1. Penetración, ASTM D 5



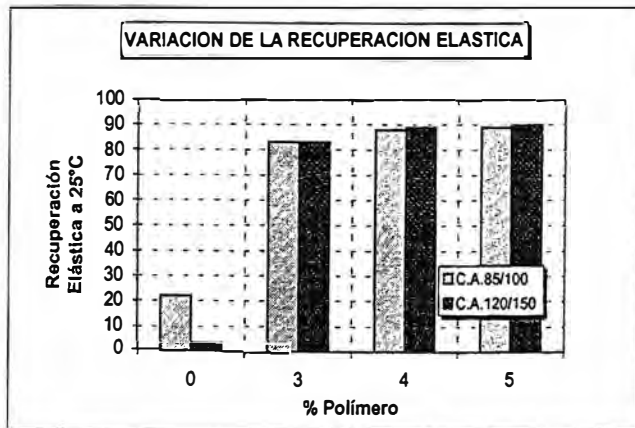
2. Viscosidad Cinemática, ASTM D 2170



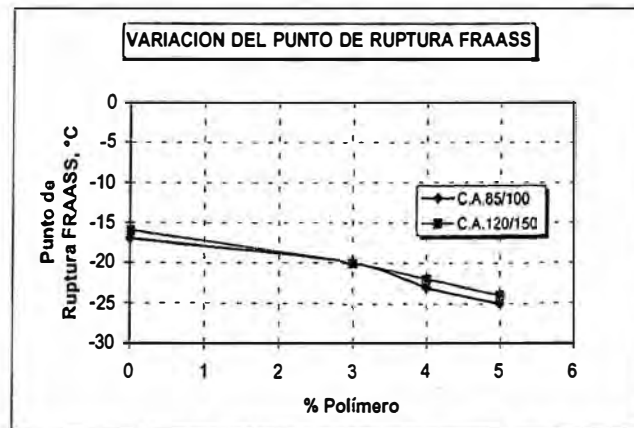
3. Punto de Ablandamiento, ASTM D 36



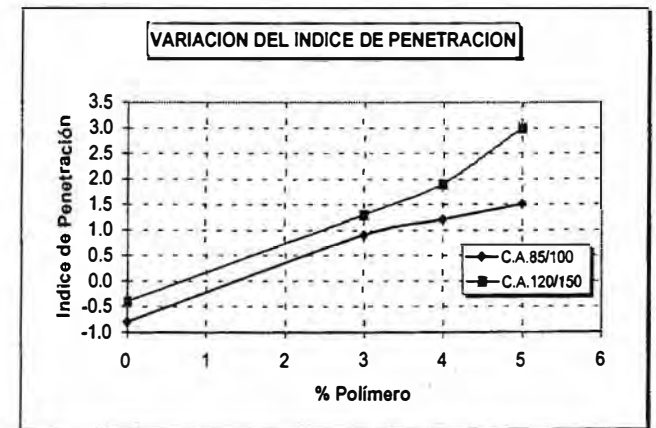
4. Recuperación Elástica, ASTM D 6084



5. Punto de Ruptura FRAASS, IP 80/87



6. Índice de Penetración, RLB1 - 1964





E. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON SBS SEGUN ASTM D 5976

ASFALTO BASE PEN 85/100

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO I							
PROPIEDADES	METODO	3% SBS	4% SBS	5% SBS	I - A		I - B		I - C		I - D	
					Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	60	56	56	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	13833	40945	203566	1250		2500		5000		5000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	1153	1723	2534		2000		2000		2000		5000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	274	286	268	232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.72	99.74	99.87	99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	11.8	2.0	0.5		2.2		2.2		2.2		2.2
RESIDUO ENVEJECIDO. ASTM D 1754												
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	65	73	76	60		60		60		60	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	25	25	25	20		15		13		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3		—	
	4		I C, I D	
	5		I D	

ASFALTO BASE PEN 120/150

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO I							
PROPIEDADES	METODO	3% SBS	4% SBS	5% SBS	I - A		I - B		I - C		I - D	
					Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	80	69	62	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	5822	58210	222212	1250		2500		5000		5000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	759	1186	1843		2000		2000		2000		5000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	268	268	268	232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.85	99.75	99.69	99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	14.4	12.6	5.0		2.2		2.2		2.2		2.2
RESIDUO ENVEJECIDO. ASTM D 1754												
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	57	75	70	60		60		60		60	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	31	37	31	20		15		13		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3		—	
	4		—	
	5		—	



F. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON SBS SEGÚN ASTM D 5892

ASFALTO BASE PEN 85/100

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO IV											
					IV - A		IV - B		IV - C		IV - D		IV - E		IV - F	
PROPIEDADES	METODO	3% SBS	4% SBS	5% SBS	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	60	56	56	90		75		65		50		50		35	
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	13833	40945	203566	1250		4000		2500		6000		4500		8000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	1153	1723	2534		3000		3000		3000		3000		3000		3000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	274	286	268	232		232		232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.72	99.74	99.87	99		99		99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	11.6	2.0	0.5	reortar		reortar		reortar		reortar		reortar		reortar	
RESIDUO ENVEJECIDO, ASTM D 1754																
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	65	73	76	60		70		60		70		60		70	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	25	25	25	20		20		15		15		10		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3		IV E	
	4		IV D, IV E, IV F	
	5		IV D, IV E, IV F	

ASFALTO BASE PEN 120/150

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO IV											
					IV - A		IV - B		IV - C		IV - D		IV - E		IV - F	
PROPIEDADES	METODO	3% SBS	4% SBS	5% SBS	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	80	69	62	90		75		65		50		50		35	
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	5822	58210	222212	1250		4000		2500		6000		4500		8000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	759	1186	1843		3000		3000		3000		3000		3000		3000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	268	268	268	232		232		232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.85	99.75	99.69	99		99		99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	14.4	12.6	5.0	reortar		reortar		reortar		reortar		reortar		reortar	
RESIDUO ENVEJECIDO, ASTM D 1754																
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	57	75	70	60		70		60		70		60		70	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	31	37	31	20		20		15		15		10		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3		—	
	4		IV C, IV D, IV E, IV F	
	5		IV D, IV E, IV F	

## G. DISCUSION DE RESULTADOS

### a. Compatibilidad

Los resultados de compatibilidad luego de modificar el asfalto PEN 85/100 muestran la gran afinidad entre ambos productos, principalmente con 4% y 5% de SBS, lo que asegura una buena compatibilidad. Por otro lado, se observó una buena estabilidad al almacenamiento que a su vez contribuye de manera positiva en la homogeneidad de la mezcla.

Los resultados de compatibilidad luego de modificar el asfalto PEN 120/150 no resultaron ser tan óptimos como en el caso anterior, sin embargo, fueron mejorados conforme se incrementó el porcentaje de SBS en la mezcla, asimismo, al incrementar el porcentaje de copolímero, la estabilidad al almacenamiento del producto modificado también fue mejorada.

### b. Efectos del SBS en el Ligante Original

- Disminución de la Penetración
- Incremento notable de la Viscosidad
- Incremento del Punto de Ablandamiento
- Altos valores de Recuperación Elástica a diferentes temperaturas, antes y después de Película Fina, independiente del grado de penetración del asfalto base
- Flexibilidad a bajas temperaturas, lo cual fue observado por la mejora notable del Punto de Ruptura FRAASS y por los altos valores de Recuperación Elástica a 5°C

### c. Resistencia al Envejecimiento

Para evaluar la Resistencia al Envejecimiento fueron medidas propiedades como Viscosidad, Penetración y Punto de Ablandamiento, tanto antes como después del ensayo de Película Fina, TFOT. A partir de dichos datos fue calculada la variación en % de cada una de estas propiedades.

Propiedad evaluada después del TFOT	VARIACION RESPECTO AL VALOR ORIGINAL							
	C.A.85/100	3% SBS	4% SBS	5% SBS	C.A.120/150	3% SBS	4% SBS	5% SBS
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	+98%	+19%	+43%	+30%	+93%	+36%	+32%	+14%
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	-45%	-30%	-25%	-29%	-54%	-30%	-23%	-18%
Punto de Ablandamiento, °C	+18%	+5%	+6%	+5%	+26%	+7%	+4%	+6%

Por consiguiente, los asfaltos modificados con SBS presentan MEJOR RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO, que el Asfalto Convencional.

#### d. Clasificación de los Asfaltos Modificados con SBS según normas ASTM

##### **ASFALTOS MODIFICADOS DEL TIPO I**

CLASIFICACION DE LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON SBS SEGUN NORMA ASTM D 5976	% POLIMERO	ASFALTO BASE	GRUPO	ASFALTO BASE	GRUPO
	3	PEN 85/100	---	PEN 120/150	---
	4	PEN 85/100	IC, ID	PEN 120/150	---
	5	PEN 85/100	ID	PEN 120/150	---

En ambos casos, la falta de compatibilidad entre el asfalto y el SBS fue el principal inconveniente para lograr la clasificación como Asfalto Modificado TIPO I.

##### **ASFALTOS MODIFICADOS DEL TIPO IV**

CLASIFICACION DE LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON SBS SEGUN NORMA ASTM D 5892	% POLIMERO	ASFALTO BASE	GRUPO	ASFALTO BASE	GRUPO
	3	PEN 85/100	IV E	PEN 120/150	---
	4	PEN 85/100	IV D, IV E, IV F	PEN 120/150	IV C, IV D, IV E, IV F
	5	PEN 85/100	IV D, IV E, IV F	PEN 120/150	IV D, IV E, IV F

La baja recuperación elástica del asfalto PEN 120/150 dio lugar a que el producto modificado al 3% no obtuviera clasificación, pues la mejora en esta propiedad al agregar el SBS no alcanzó el valor límite de 60.

#### 3.2.3.3. ASFALTO MODIFICADO CON COPOLIMERO ESTIRENO/BUTADIENO (SB)

##### **A. CONDICIONES DE MEZCLA**

PARAMETRO DE MODIFICACION	RANGO
Temperatura, °C	170 - 180
Tiempo, hr	1.5 - 2.5
Velocidad de agitación, rpm	300 - 400
Concentraciones de polímero, % masa	3%, 4% y 5%

##### **B. RESULTADOS**

A continuación se muestran los resultados de manera comparativa de la modificación de los Asfaltos PEN 85/100 y PEN 120/150 con el copolímero Estireno/Butadieno (SB).



Cuadro 31

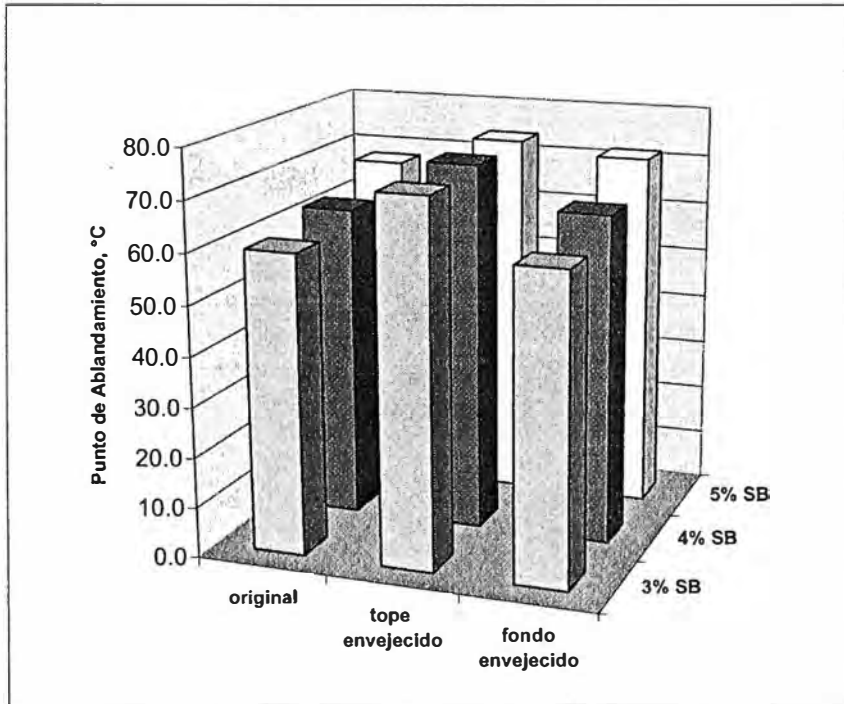
MODIFICACION DE CEMENTOS ASFALTICOS DE DISTINTO GRADO DE PENETRACION CON EL COPOLIMERO SB

PROPIEDADES	METODO	SOBRE EL LIGANTE ORIGINAL							
		C.A. 85/100	3% SB	4% SB	5% SB	C.A. 120/150	3% SB	4% SB	5% SB
<b>PENETRACION</b>									
a 30°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	154	104	85	73	228	145	110	92
a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	89	71	59	52	143	87	74	61
a 15°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	32	32	26	25	47	40	35	34
a 10°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	20	19	18	17	32	25	24	21
a 5°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	11	12	11	12	20	19	15	14
a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	38	32	31	29	53	47	40	35
<b>FLUIDEZ</b>									
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	280	753	1015	1521	227	568	748	1089
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	1565	6315	13058	59228	806	3120	7758	39451
<b>SOLUBILIDAD</b>									
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.86	99.79	99.95	99.65	99.91	99.90	99.76	99.95
<b>VOLATILIDAD</b>									
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	282	254	268	285	266	282	285	260
<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b>									
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	47.2	55.0	61.4	68.2	42.8	49.4	58.4	67.4
Punto de Ruptura FRAASS, °C	IP 80/87	-17	-18	-18	-18	-16	-16	-17	-17
Indice de Penetración	RLB1 - 1964	-0.8	0.4	0.9	1.6	-0.4	0.8	1.1	1.5
<b>RECUPERACION ELASTICA</b>									
a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	22	74	76	79	3	75	81	83
a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	21	54	78	73	7	66	68	73
a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	21	47	53	53	3	50	60	53
<b>COMPATIBILIDAD ASFALTO/POLIMERO</b>									
Diferencia Punto De Ablandamiento, tope/fondo, °C	ASTM D 5892	—	11.4	8.0	2.2	—	19.4	11.4	2.2
<b>SOBRE EL RESIDUO ENVEJECIDO. TFOT</b>									
<b>EFFECTO DE CALOR Y AIRE</b>									
Pérdida de masa por calentamiento, %		1.00	0.80	0.98	0.83	1.24	1.18	0.92	0.96
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	49	45	41	38	66	53	55	45
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	25	24	23	24	33	32	30	30
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	55.8	62.0	70.2	71.0	54	59.4	63.4	69.0
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	555	1234	1836	2412	438	955	1271	1536
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	25	43	53	66	12	51	70	76
Recuperación Elástica a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	23	48	55	53	10	60	58	60
Recuperación Elástica a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	23	41	38	40	- <sup>(1)</sup>		48	

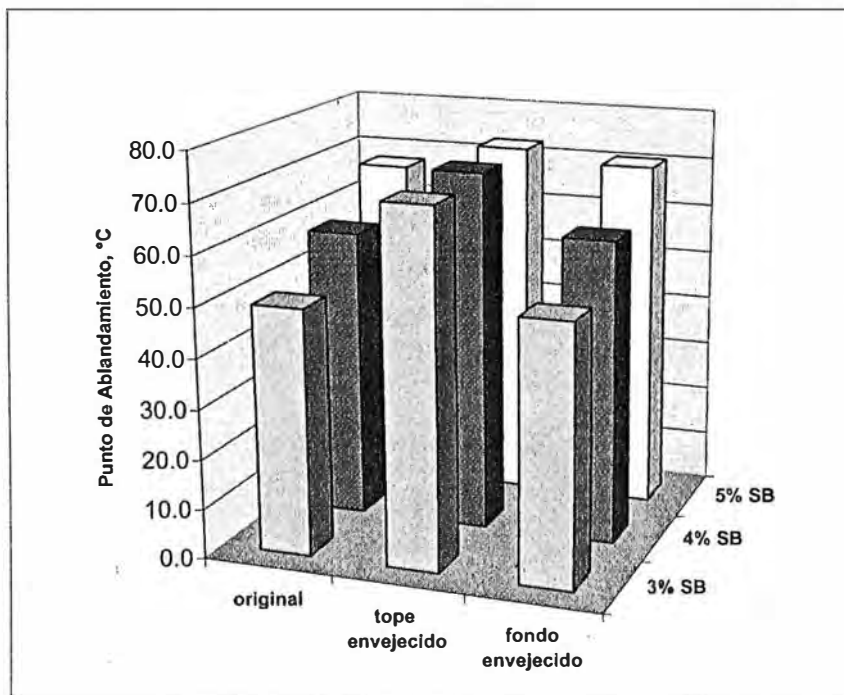
<sup>(1)</sup> No se pudo completar el ensayo por ruptura de la muestra antes de alcanzar los 10 cm de elongación

### C. COMPATIBILIDAD DEL SB Y EL ASFALTO BASE EN LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS

#### COMPATIBILIDAD POLIMERO/ASFALTO BASE PEN 85/100

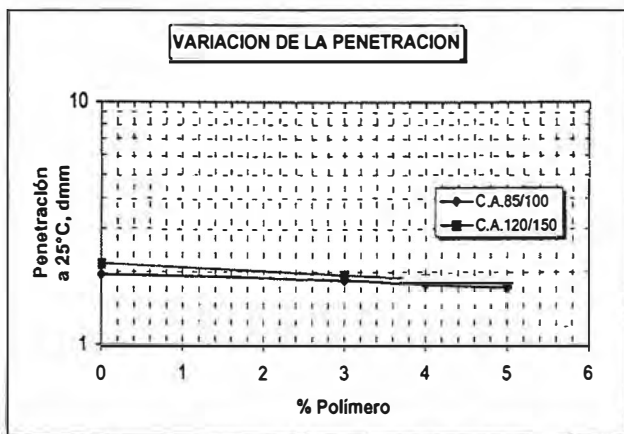


#### COMPATIBILIDAD POLIMERO/ASFALTO BASE PEN 120/150

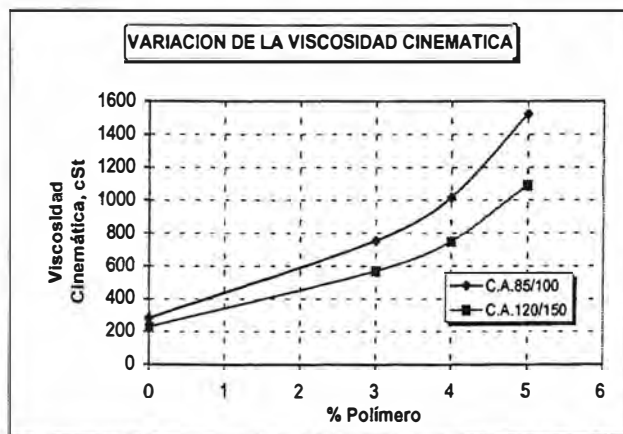


## D.EFECTOS DEL SB EN LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS LIGANTES ASFALTICOS CONVENCIONALES

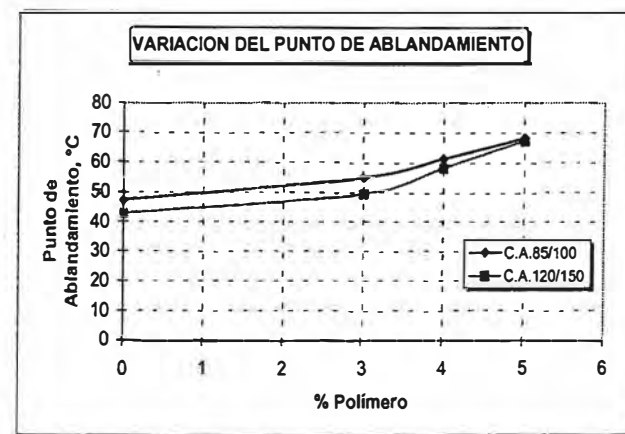
1. Penetración, ASTM D 5



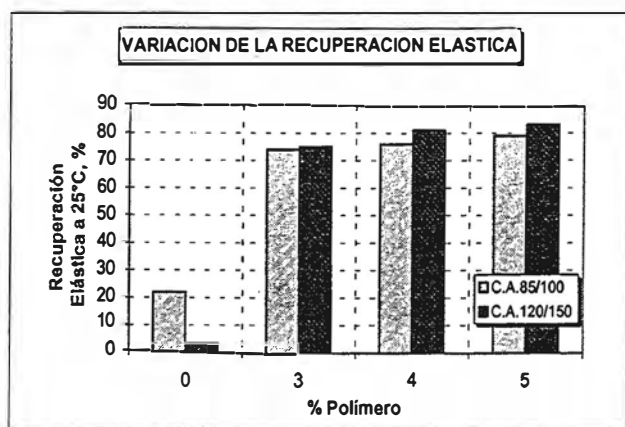
2. Viscosidad Cinemática, ASTM D 2170



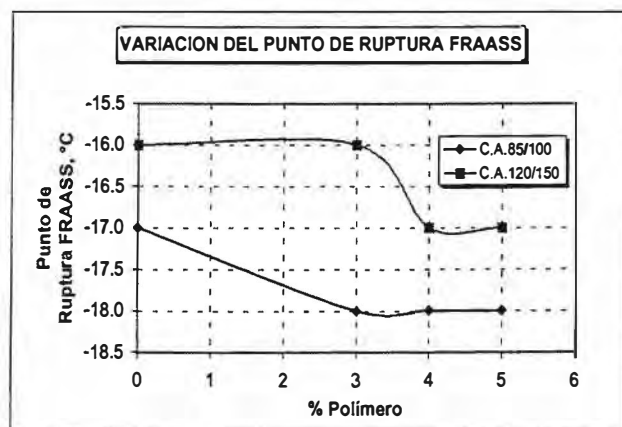
3. Punto de Ablandamiento, ASTM D 36



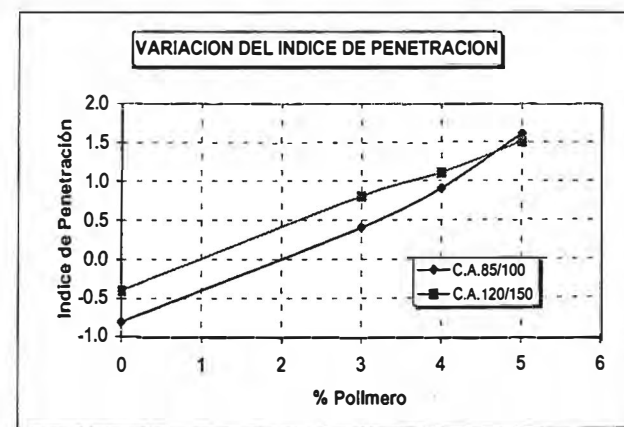
4. Recuperación Elástica, ASTM D 6084



5. Punto de Ruptura FRAASS, IP 80/87



6. Índice de Penetración, RLB1 - 1964







E. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON SB SEGÚN ASTM D 5976

ASFALTO BASE PEN 85/100

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO I							
PROPIEDADES	METODO	3% SB	4% SB	5% SB	I - A		I - B		I - C		I - D	
					Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	71	59	52	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	6315	13058	59228	1250		2500		5000		5000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	753	1015	1521		2000		2000		2000		5000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	254	268	285	232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.79	99.95	99.65	99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	11.4	8.0	2.2		2.2		2.2		2.2		2.2
RESIDUO ENVEJECIDO, ASTM D 1754												
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	43	53	66	60		60		60		60	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	24	23	24	20		15		13		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO
	3		—
	4		—
	5		IC, ID

ASFALTO BASE PEN 120/150

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO I							
PROPIEDADES	METODO	3% SB	4% SB	5% SB	I - A		I - B		I - C		I - D	
					Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	87	74	61	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	3120	7758	39451	1250		2500		5000		5000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	568	748	1089		2000		2000		2000		5000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	282	285	260	232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.9	99.76	99.95	99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	19.4	11.4	2.2		2.2		2.2		2.2		2.2
RESIDUO ENVEJECIDO, ASTM D 1754												
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	51	70	76	60		60		60		60	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	32	30	30	20		15		13		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO
	3		—
	4		—
	5		IC, ID



F. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON SB SEGÚN ASTM D 5892

ASFALTO BASE PEN 85/100

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO IV											
PROPIEDADES	METODO	3% SB	4% SB	5% SB	IV - A		IV - B		IV - C		IV - D		IV - E		IV - F	
					Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	71	59	52	90		75		65		50		50		35	
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	6315	13058	59228	1250		4000		2500		6000		4500		8000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	753	1015	1521		3000		3000		3000		3000		3000		3000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	254	268	285	232		232		232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.79	99.95	99.65	99		99		99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	11.4	8.0	2.2	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
RESIDUO ENVEJECIDO, ASTM D 1754																
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	43	53	66	60		70		60		70		60		70	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	24	23	24	20		20		15		15		10		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3		—	
	4		—	
	5		IV E	

ASFALTO BASE PEN 120/150

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO IV											
PROPIEDADES	METODO	3% SB	4% SB	5% SB	IV - A		IV - B		IV - C		IV - D		IV - E		IV - F	
					Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	87	74	61	90		75		65		50		50		35	
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	3120	7758	39451	1250		4000		2500		6000		4500		8000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	568	748	1089		3000		3000		3000		3000		3000		3000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	282	285	260	232		232		232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.9	99.76	99.95	99		99		99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	19.4	11.4	2.2	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
RESIDUO ENVEJECIDO, ASTM D 1754																
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	51	70	76	60		70		60		70		60		70	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	32	30	30	20		20		15		15		10		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3		—	
	4		IV C, IV D, IV E	
	5		IV D, IV E, IV F	

## G. DISCUSION DE RESULTADOS

A continuación la discusión de los resultados obtenidos luego de la evaluación de propiedades de las distintas formulaciones asfálticas preparadas con el copolímero elastómero SB.

### a. Compatibilidad

De los resultados obtenidos se observó gran INCOMPATIBILIDAD con un porcentaje de 3 y 4% de SB, lo que daría como consecuencia la SEPARACION DE AMBOS PRODUCTOS, ya sea luego del proceso de preparación de la mezcla o cuando se encuentre en servicio, es decir como parte del pavimento, influyendo de manera negativa en el desempeño de la carpeta asfáltica.

Unicamente con un porcentaje de 5% de SB (en ambos casos modificando el asfalto PEN 85/100 y asfalto PEN 120/150) se obtuvo una buena compatibilidad y estabilidad al almacenamiento.

### b. Efecto del SB en el Ligante Original

- Disminución de la Penetración
- Incremento notable de la Viscosidad
- Incrementa el Punto de Ablandamiento mejorando la resistencia a las deformaciones o ahuellamientos
- Altos valores de Recuperación Elástica, a diferentes temperaturas, antes y después de Película Fina
- No afecta el Punto de Ruptura FRAASS

### c. Resistencia al Envejecimiento

Para evaluar la Resistencia al Envejecimiento fueron medidas propiedades como Viscosidad, Penetración y Punto de Ablandamiento tanto antes como después del ensayo de Película Fina, TFOT. A partir de dichos datos fue calculada la variación en % de cada una de estas propiedades.

Propiedad evaluada después del TFOT	VARIACION RESPECTO AL VALOR ORIGINAL							
	CA.85/100	3% SB	4% SB	5% SB	CA.120/150	3% SB	4% SB	5% SB
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	+98%	+64%	+81%	+59%	+93%	+68%	+70%	+41%
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	-45%	-37%	-31%	-27%	-54%	-39%	-26%	-26%
Punto de Ablandamiento, °C	+18%	+13%	+14%	+4%	+26%	+20%	+9%	+2%

#### d. Clasificación de los Asfaltos Modificados con SB según normas ASTM

##### **ASFALTOS MODIFICADOS DEL TIPO I**

CLASIFICACION DE LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON SB SEGUN NORMA ASTM D 5876	% POLIMERO	ASFALTO BASE	GRUPO	ASFALTO BASE	GRUPO
	3	PEN 85/100	---	PEN 120/150	---
	4	PEN 85/100	---	PEN 120/150	---
	5	PEN 85/100	IC, ID	PEN 120/150	IC, ID

La falta de compatibilidad entre los asfaltos y el SB (3% y 4%) fue el principal motivo por el cual las formulaciones asfálticas modificadas no lograron clasificación como Asfalto Modificado TIPO I.

##### **ASFALTOS MODIFICADOS DEL TIPO IV**

CLASIFICACION DE LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON SB SEGUN NORMA ASTM D 5892	% POLIMERO	ASFALTO BASE	GRUPO	ASFALTO BASE	GRUPO
	3	PEN 85/100	---	PEN 120/150	---
	4	PEN 85/100	---	PEN 120/150	IVC, IV D, IV E
	5	PEN 85/100	IV E	PEN 120/150	IV D, IV E, IV F

La Recuperación Elástica del asfalto original fue mejorada al agregar SB, sin embargo no se alcanzó los valores límites establecidos, lo que no permitió la clasificación de algunas de las formulaciones asfálticas modificadas.

### **3.3. MODIFICACION DEL ASFALTO PEN 85/100 (FORMULACION: CRUDO PURO) CON EL COPOLIMERO ESTIRENO/BUTADIENO/ESTIRENO (SBS)**

#### **3.3.1. CARACTERIZACION DEL LIGANTE ASFALTICO**

Los cementos asfálticos procedentes de este crudo no poseen una buena ductilidad, principalmente luego del ensayo de Película Fina, lo que hace que el producto esté fuera de especificación como Asfalto Convencional y que requiera la mezcla de otro crudo, para poseer tal propiedad y cumplir con los requisitos de especificación.

En el **cuadro 32** se muestra los resultados de la caracterización del Asfalto PEN 85/100 (FORMULACION: CRUDO PURO).



**Cuadro 32**  
**PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DEL CEMENTO ASFALTICO PEN 85/100**  
**FORMULACION: CRUDO PURO**

PROPIEDADES	METODO	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES	
			Mín.	Máx.
<b>PENETRACION</b>				
a 10°C, 100 gr, 5 seg; dmm	ASTM D 5	26		
a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	94	85	100
a 30°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	149		
<b>DUCTILIDAD</b>				
a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D 113	> 150	100	
<b>FLUIDEZ</b>				
Viscosidad Cinemática a 100°C, cSt	ASTM D 2170	2405		
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	264	170	
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	1618		Reportar
<b>SOLUBILIDAD</b>				
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.87	99	
Prueba de la Mancha, 10% Xileno	AASTHO T 102			Reportar
<b>VOLATILIDAD</b>				
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	274	232	
<b>DENSIDAD</b>				
Gravedad API	ASTM D 70	6.8		Reportar
Gravedad Especifica a 60/60°F	ASTM D 70	1.023		Reportar
<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b>				
Punto de Ruptura FRAASS, °C	IP 80/87	-11		Reportar
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	47.0		Reportar
Indice de Penetración	RLB1 - 1964	0.4		Reportar
<b>Efecto de Calor y Aire (Película Fina)</b>				
Pérdida de masa por calentamiento, %		0.9		1.0
Penetración retenida, % de la original	ASTM D 5	60	47	
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D 113	38	75	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	580		Reportar
<b>ADHERENCIA</b>				
Revestimiento y Desprendimiento, %	ASTM D 3625	> 95		Reportar
<b>COMPOSICION QUIMICA</b>				
- Asfaltenos, % masa	ASMT D 4124	20.60		Reportar
- Saturados, % masa	ASTM D 4124	25.3		Reportar
- Naftenos Aromáticos, % masa	ASTM D 4124	35.0		Reportar
- Polar Aromáticos, % masa	ASTM D 4124	19.1		Reportar
<b>OBSERVACIONES:</b>				
<b>PRODUCTO FUERA DE ESPECIFICACION</b>				
1. FECHA DE EXTRACCION DE MUESTRA: 16.10.2000				
2. PROCEDENCIA: PLANTA				

### 3.3.2. ASFALTO MODIFICADO CON COPOLIMERO SBS

#### A. ESPECIFICACIONES Y REQUISITOS DE CALIDAD

Los asfaltos modificados con copolímero SBS deberán cumplir las especificaciones establecidas por las normas ASTM para ASFALTOS MODIFICADOS TIPO I o TIPO IV, las cuales fueron mostradas en los cuadros 28 y 29.

#### B. CONDICIONES DE MEZCLA

PARAMETRO DE MODIFICACION	RANGO
Temperatura, °C	160 - 180
Tiempo, hr	1 - 1.5
Velocidad de agitación, rpm	350 - 450
Concentraciones de polímero, % masa	3%, 4%, 5%

#### C. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de la modificación del Asfalto PEN 85/100 (FORMULACION: CRUDO PURO) con el copolímero SBS.



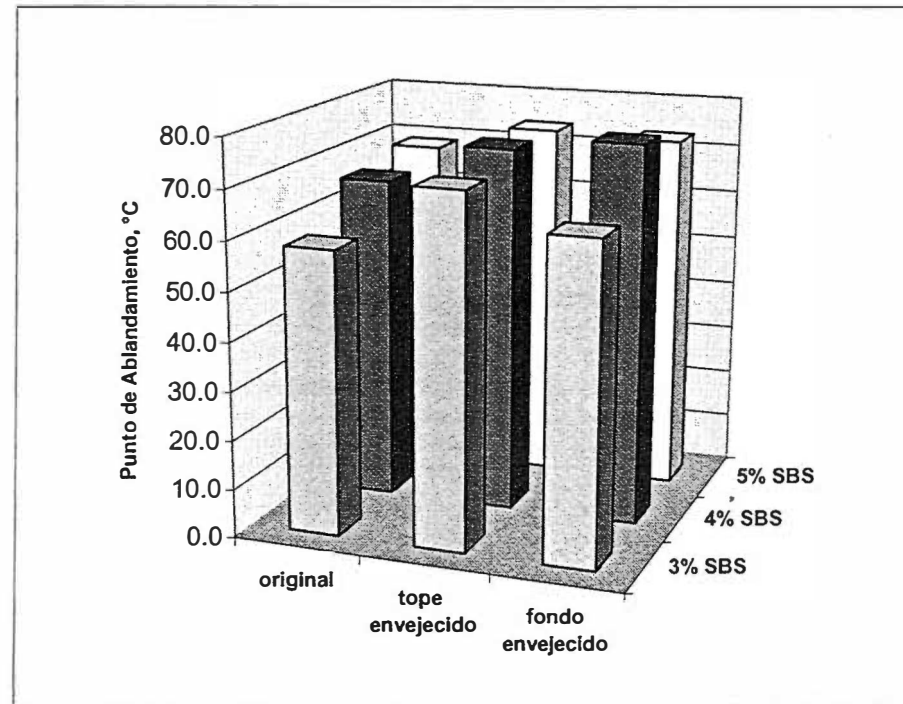
Cuadro 33

## MODIFICACION DEL CEMENTO ASFALTICO PEN 85/100 (FORMULACION: CRUDO PURO) CON EL COPOLIMERO SBS

SOBRE EL LIGANTE ORIGINAL					
PROPIEDADES	METODO	C.A. 85/100	3% SBS	4% SBS	5% SBS
<b>PENETRACION</b>					
a 30°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	149	94	76	71
a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	94	69	57	56
a 15°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	40	32	31	30
a 10°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	26	25	23	21
a 5°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	17	16	15	15
a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	44	42	39	39
<b>FLUIDEZ</b>					
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	264	1077	2035	2898
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	1618	13269	50508	95623
<b>SOLUBILIDAD</b>					
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.87	99.85	99.62	99.75
<b>VOLATILIDAD</b>					
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	274	277	254	249
<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b>					
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	47.0	58.0	66.4	68.8
Punto de Ruptura FRAASS, °C	IP 80/87	-11	-14	-17	-24
Indice de Penetración	RLB1 - 1964	0.4	1.9	2.6	2.7
<b>RECUPERACION ELASTICA</b>					
a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	--- <sup>(1)</sup>	60	70	66
a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	10	53	67	67
a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	14	49	59	62
<b>DUCTILIDAD</b>					
a 25°C, 5 cm/seg, cm	ASTM D 113	> 150	52	32	41
a 15°C, 5 cm/seg, cm	ASTM D 113	81	28	20	24
a 5°C, 5 cm/seg, cm	ASTM D 113	8	20	16	25
<b>COMPATIBILIDAD ASFALTO/POLIMERO</b>					
Diferencia Punto De Ablandamiento, tope/fondo, °C	ASTM D 5892	---	7.0	2.6	0.8
<b>SOBRE EL RESIDUO ENVEJECIDO. TFOT</b>					
<b>EFECTO DE CALOR Y AIRE</b>					
Pérdida de masa por calentamiento, %		0.9	0.82	0.75	0.77
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	56	51	48	55
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	32	33	34	34
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	55.4	66.6	73.8	78.8
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	580	1863	2705	3269
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	11	53	60	65
Recuperación Elástica a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	13	55	57	54
Recuperación Elástica a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	10	40	35	51
Ductilidad a 25°C, 5 cm/seg, cm	ASTM D 113	38	17	10	9
Ductilidad a 15°C, 5 cm/seg, cm	ASTM D 113	9	10	8	7
Ductilidad a 5°C, 5 cm/seg, cm	ASTM D 113	3	9	4	4

<sup>(1)</sup> La muestra no presentó recuperación elástica

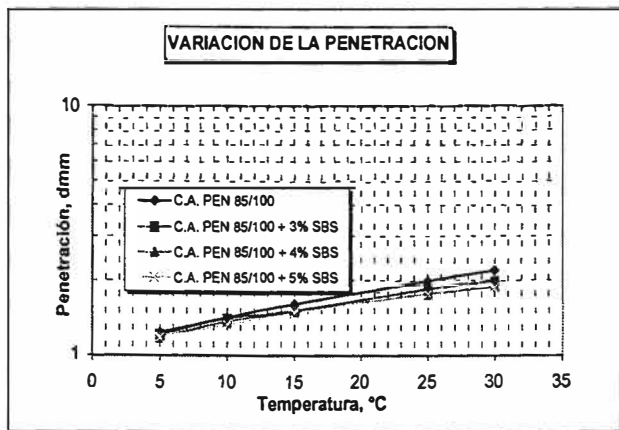
## D. COMPATIBILIDAD DEL SBS Y EL ASFALTO BASE EN LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS



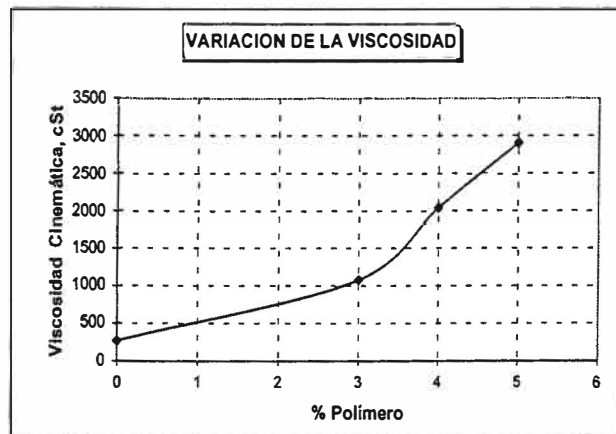


## E. EFECTOS DEL SBS EN LAS PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO PEN 85/100 (FORMULACION: CRUDO PURO)

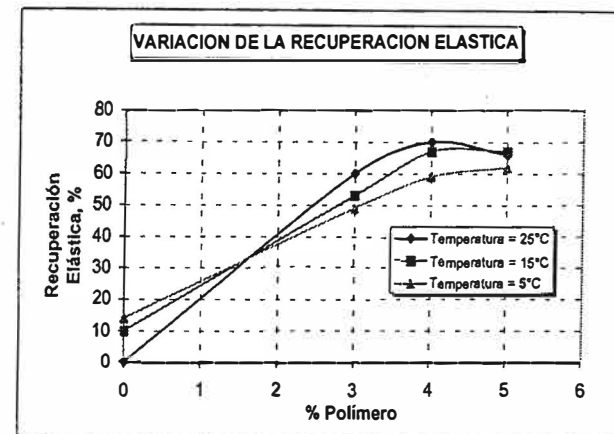
1. Penetración, ASTM D 5



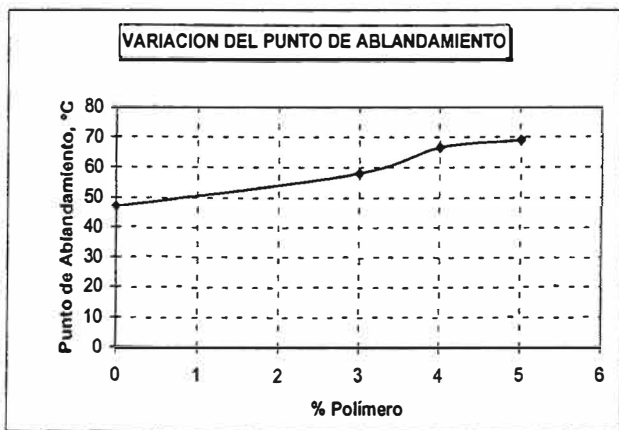
2. Viscosidad Cinemática, ASTM D 2170



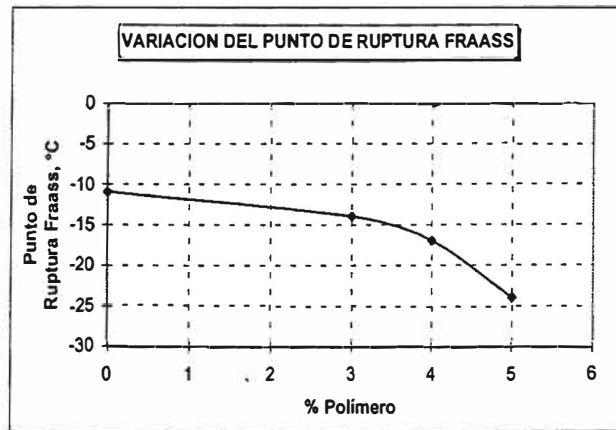
3. Recuperación Elástica, ASTM D 6084



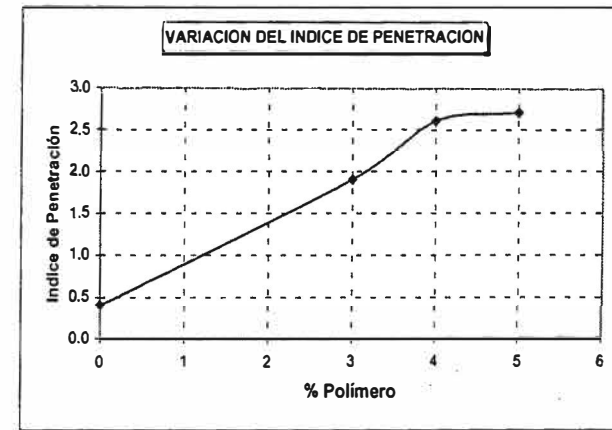
4. Punto de Ablandamiento, ASTM D 36



5. Punto de Ruptura FRAASS, IP 80/87



6. Índice de Penetración, RLB1 - 1964





F. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON SBS SEGÚN ASTM D 5976

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO I							
PROPIEDADES	METODO	3% SBS	4% SBS	5% SBS	I - A		I - B		I - C		I - D	
					Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	69	57	56	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	13269	50508	95623	1250		2500		5000		5000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	1077	2035	2898		2000		2000		2000		5000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	277	254	249	232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.85	99.62	99.75	99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	7.0	2.6	0.8		2.2		2.2		2.2		2.2
RESIDUO ENVEJECIDO, ASTM D 1754												
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	53	60	65	60		60		60		60	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	33	34	34	20		15		13		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3			—
	4			—
	5			I D



G. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON SBS SEGÚN ASTM D 5892

RESULTADOS					ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS TIPO IV											
PROPIEDADES	METODO	3% SBS	4% SBS	5% SBS	IV - A		IV - B		IV - C		IV - D		IV - E		IV - F	
					Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	68	57	56	90		75		65		50		50		35	
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	13269	50508	95623	1250		4000		2500		6000		4500		8000	
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	1077	2037	2898		3000		3000		3000		3000		3000		3000
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	277	254	249	232		232		232		232		232		232	
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.85	99.62	99.75	99		99		99		99		99		99	
Compatibilidad, Diferencia Pto. de Ablandamiento, °C	ASTM D 5976	7.0	2.6	0.8	reportar		reportar		reportar		reportar		reportar		reportar	
<b>RESIDUO ENVEJECIDO. ASTM D 1754</b>																
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	53	60	65	60		70		60		70		60		70	
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	33	34	34	20		20		15		15		10		10	

CLASIFICACION	% POLIMERO		GRUPO	
	3			—
	4			IV E
	5			IV E

## **H. DISCUSION DE RESULTADOS**

A continuación la discusión de los resultados obtenidos luego de la evaluación de propiedades de las distintas formulaciones asfálticas preparadas con el copolímero elastómero SBS.

### **a. Compatibilidad**

Respecto a la Compatibilidad de las formulaciones asfálticas preparadas de los resultados obtenidos se observó mejor afinidad entre ambos productos con concentraciones de SBS de 4% y 5%, asegurando con estos resultados la homogeneidad de la mezcla. Sin embargo, luego de someterse las muestras a la prueba de envejecimiento, TFOT, fue notoria la SEPARACION ENTRE AMBOS PRODUCTOS con lo cual la Estabilidad al Almacenamiento en Caliente no es satisfactoria, es decir que este producto modificado en caliente se separa ya que la temperatura altera la uniformidad de la mezcla.

### **b. Efecto del SBS en el Ligante Original**

- Disminución de la Penetración
- Incremento notable de la Viscosidad
- Incremento del Punto de Ablandamiento
- Altos valores de Recuperación Elástica, a diferentes temperaturas, antes y después de Película Fina
- Flexibilidad a bajas temperaturas, lo cual fue observado por la notable mejora del Punto de Ruptura FRAASS y los altos valores de Recuperación Elástica a 5°C
- Con respecto a la Ductilidad, se observó una gran disminución a temperaturas intermedias: 25°C y 15°C; sin embargo, a bajas temperaturas: 5°C, el polímero proporciona la flexibilidad que no posee el asfalto por si solo, por lo cual los valores de Ductilidad se ven incrementados.

### **c. Resistencia al Envejecimiento**

Para evaluar la Resistencia al Envejecimiento fueron medidas propiedades como Viscosidad, Penetración y Punto de Ablandamiento, tanto antes como después del

ensayo de Película Fina, TFOT. A partir de dichos datos fue calculada la variación en % de cada una de estas propiedades.

Propiedad evaluada después del TFOT	VARIACION RESPECTO AL VALOR ORIGINAL			
	C.A.85/100	3% SBS	4% SBS	5% SBS
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	+120%	+73%	+33%	+13%
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	-40%	-26%	-16%	-2%
Punto de Ablandamiento, °C	+18%	+15%	+11%	+15%

#### d. Clasificación de los Asfaltos Modificados con SBS según normas ASTM

##### ASFALTOS MODIFICADOS DEL TIPO I

Las formulaciones asfálticas modificadas con 3% y 4% de SBS, no obtuvieron clasificación como Asfalto Modificado del Tipo I debido a la incompatibilidad ofrecida entre ambos productos: asfalto y polímero.

CLASIFICACION DE LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON SBS SEGUN NORMA ASTM D 5976	% POLIMERO	ASFALTO BASE	GRUPO
	3	PEN 85/100	---
	4	PEN 85/100	---
	5	PEN 85/100	II

##### ASFALTOS MODIFICADOS DEL TIPO IV

La falta de recuperación elástica del asfalto base (a 25°C) dió lugar a que el producto modificado al 3% no obtuviera clasificación, pues la mejora en esta propiedad al agregar el polímero no alcanzó el valor límite de 60.

CLASIFICACION DE LAS FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON SBS SEGUN NORMA ASTM D 5892	% POLIMERO	ASFALTO BASE	GRUPO
	3	PEN 85/100	---
	4	PEN 85/100	IV E
	5	PEN 85/100	IV E

#### 3.4. ANALISIS COMPARATIVO DE LA MODIFICACION DEL CAP 85/100 (FORMULACION: CRUDO PURO) VERSUS CAP 85/100 (FORMULACION: CRUDO MEZCLA)

A modo de evaluar la influencia de la composición química de los asfaltos en las propiedades finales de las formulaciones modificadas, a continuación se hará un análisis de los resultados que fueron obtenidos modificando con SBS dos tipos de asfaltos de grado PEN 85/100 pero de distinta procedencia química. Dichos resultados se muestran de manera comparativa en el **cuadro 34**.



Cuadro 34

CUADRO COMPARATIVO DE LA MODIFICACION DE LOS CEMENTOS ASFALTICOS PEN 85/100 DE DISTINTA NATURALEZA QUIMICA CON EL COPOLIMERO SBS

SOBRE EL LIGANTE ORIGINAL									
PROPIEDADES	METODO	MUESTRA A	3% SBS + A	4% SBS + A	5% SBS + A	MUESTRA B	3% SBS + B	4% SBS + B	5% SBS + B
<b>PENETRACION</b>									
a 30°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	149	94	76	71	154	89	73	65
a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	94	69	57	56	89	60	56	56
a 15°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	40	32	31	30	32	26	24	24
a 10°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	26	25	23	21	20	17	16	16
a 5°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	17	16	15	15	11	12	11	11
a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	44	42	39	39	38	31	29	30
<b>FLUIDEZ</b>									
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	264	1077	2035	2898	280	1153	1723	2534
Viscosidad Absoluta a 60°C, Po	ASTM D 2171	1618	13269	50508	95623	1565	13833	40945	203566
<b>SOLUBILIDAD</b>									
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042	99.87	99.85	99.62	99.75	99.86	99.72	99.74	99.87
<b>VOLATILIDAD</b>									
Punto de Inflamación, COC, °C	ASTM D 92	274	277	254	249	282	274	286	268
<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b>									
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	47.0	58.0	66.4	68.8	47.2	62.0	69.0	76.0
Punto de Ruptura FRAASS, °C	IP 80/87	-11	-14	-17	-24	-17	-20	-23	-25
Indice de Penetración	RLB1 - 1964	0.4	1.9	2.6	2.7	-0.8	0.9	1.2	1.5
<b>RECUPERACION ELASTICA</b>									
a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	— <sup>(1)</sup>	60	70	66	22	83	88	89
a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	10	53	67	67	21	71	77	79
a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	14	49	59	62	21	58	56	57
<b>COMPATIBILIDAD ASFALTO/POLIMERO</b>									
Diferencia Punto De Ablandamiento, tope/fondo, °C	ASTM D 5892	—	7.0	2.6	0.8	—	11.6	2.0	0.5
<b>SOBRE EL RESIDUO ENVEJECIDO. TFOT</b>									
<b>EFECTO DE CALOR Y AIRE</b>									
Pérdida de masa por calentamiento, %		0.9	0.82	0.75	0.77	1.0	0.77	0.80	0.84
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg, dmm	ASTM D 5	56	51	48	55	49	42	42	40
Penetración a 4°C, 200 gr, 60 seg, dmm	ASTM D 5	32	33	34	34	25	25	25	25
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D 36	55.4	66.6	73.8	78.8	55.8	65.0	73.0	79.5
Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D 2170	580	1863	2705	3269	555	1372	2468	3306
Recuperación Elástica a 25°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	11	53	60	65	25	65	73	76
Recuperación Elástica a 15°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	13	55	57	54	23	61	63	63
Recuperación Elástica a 5°C, 10 cm de elongación, %	ASTM D 6084	10	40	35	51	23	45	47	49

<sup>(1)</sup> La muestra no presentó Recuperación Elástica

Muestra A: CAP 85/100, FORMULACION: CRUDO PURO

Muestra B: CAP 85/100, FORMULACION: CRUDO MEZCLA TIPO A

La influencia del copolímero SBS en la penetración y viscosidad cinemática de las formulaciones asfálticas modificadas tanto con asfalto procedente de crudo puro y con el asfalto procedente de crudo mezcla, se mantuvieron en un rango similar.

Respecto al Punto de Ruptura FRAASS, el cual fue bastante favorecido gracias a la flexibilidad proporcionada por este polímero a bajas temperaturas, los resultados en ambos casos también fueron similares.

En cuanto a la Recuperación Elástica, se obtuvieron mejores resultados al modificar el asfalto procedente de crudo mezcla, ya que originalmente los valores de dicha propiedad fueron más altos que la Recuperación Elástica del asfalto procedente de crudo puro.

Respecto al Índice de Penetración, indicativo de la Susceptibilidad Térmica, en todos los casos se observó un incremento del Índice de Penetración de los asfaltos base, con lo cual se asegura que dichas formulaciones modificadas presentan menor Susceptibilidad a los cambios de Temperatura que los asfaltos sin modificar.

Respecto a la Pérdida de Masa, cabe mencionar que los dos asfaltos tanto el procedente de crudo puro como el procedente de crudo mezcla, tuvieron altos valores de pérdida de masa, la cual fue mejorada conforme se incrementaba el porcentaje de polímero en la mezcla, ya que la red de polímero impedía la evaporación de fracciones volátiles del asfalto con lo cual el valor de pérdida de masa disminuía.

Finalmente, la Resistencia al Envejecimiento la cual fue medida a través de la variación de propiedades como Viscosidad, Penetración y Punto de Ablandamiento, luego que las distintas muestras fueran sometidas a las mismas condiciones de envejecimiento, TFOT, demostraron que los asfaltos modificados con SBS, poseen una GRAN RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO, comparada con el Asfalto Convencional respectivo, aún incluso cuando el asfalto y el SBS no son compatibles.

**Capítulo 4**  
**EVALUACION ECONOMICA A NIVEL DE PERFIL**  
**DE LA MODIFICACION DE ASFALTOS CON POLIMEROS**

Siendo el interés principal de este estudio investigar los aspectos técnicos de la Formulación y Producción de Asfaltos Modificados con Polímeros, la Evaluación Económica que se realizará a continuación sólo es a Nivel de Perfil, la cual incluye una sección denominada Estudio de Mercado, con el objetivo de definir el horizonte de planeamiento y el tamaño de planta para la producción de dichos asfaltos, una sección denominada Diseño de Planta, que incluye el Dimensionamiento de Equipos y los requerimientos operativos, y finalmente una sección denominada Evaluación Económica del Sistema de Producción de Asfalto Modificado, que incluye el estimado de la Inversión, de los Costos Operativos y del Precio de Venta del Asfalto Modificado. Asimismo, se incluye el Análisis de Rentabilidad del sistema propuesto a partir del cálculo de los indicadores de rentabilidad.

**4.1. ESTUDIO DE MERCADO**

En nuestro país las ventas de asfaltos realizadas por las refinerías Conchan, Talara y Pampilla cubren la Demanda de dichos productos a Nivel Nacional. En el cuadro 35, se muestra la Data Histórica del Consumo de Asfaltos (Sólidos y Líquidos) de los últimos nueve años, de donde se observa que no existe tendencia definida

Cuadro 35  
**DEMANDA NACIONAL DE ASFALTOS (MBDC)**

AÑO	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	E-N 2000
<b>Refinería Conchán</b>									
Asfalto Sólido	0.38	0.94	1.95	1.49	0.89	1.29	1.96	1.34	0.50
Asfalto Líquido	0.41	0.36	0.16	0.30	0.27	0.38	0.41	0.31	0.32
<b>TOTAL</b>	<b>0.79</b>	<b>1.30</b>	<b>2.11</b>	<b>1.79</b>	<b>1.16</b>	<b>1.67</b>	<b>2.37</b>	<b>1.65</b>	<b>0.82</b>
<b>Refinería Talara</b>									
Asfalto Sólido	0.04	0.02	0.24	0.84	0.03	0.46	0.09	0.19	0.11
Asfalto Líquido	0.21	0.26	0.70	0.77	0.44	0.46	0.36	0.40	0.33
<b>TOTAL</b>	<b>0.25</b>	<b>0.28</b>	<b>0.94</b>	<b>1.61</b>	<b>0.47</b>	<b>0.92</b>	<b>0.45</b>	<b>0.59</b>	<b>0.44</b>
<b>Refinería La Pampilla</b>									
Asfalto Sólido	---	---	---	---	---	---	---	---	0.32
Asfalto Líquido	---	---	---	---	---	---	---	---	0.05
<b>TOTAL</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>---</b>	<b>0.37</b>
<b>DEMANDA NACIONAL</b>									
<b>ASFALTO SOLIDO</b>	<b>0.42</b>	<b>0.96</b>	<b>2.19</b>	<b>2.33</b>	<b>0.92</b>	<b>1.75</b>	<b>2.05</b>	<b>1.53</b>	<b>0.93</b>
<b>ASFALTO LIQUIDO</b>	<b>0.62</b>	<b>0.62</b>	<b>0.86</b>	<b>1.07</b>	<b>0.71</b>	<b>0.84</b>	<b>0.77</b>	<b>0.71</b>	<b>0.70</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.04</b>	<b>1.58</b>	<b>3.05</b>	<b>3.40</b>	<b>1.63</b>	<b>2.59</b>	<b>2.82</b>	<b>2.24</b>	<b>1.63</b>

DEMANDA NACIONAL: FUENTE INFORME MENSUAL DGH



Esto se explica porque la demanda de dichos productos está únicamente sujeta a los Programas y Proyectos Carreteros del Ministerio de Transportes y Comunicaciones aprobados por el Gobierno, es por ello que a fin de encontrar un indicador del Consumo Futuro de Cementos Asfálticos (principal componente de análisis en este estudio de tesis) resulta de interés investigar el estado de los Programas Carreteros establecidos para el mejoramiento de nuestra Red Vial.

La Red Vial del Perú es un patrimonio muy valioso compuesto de unos 78112 km de caminos (Fuente OPLA 1999). La profunda crisis sufrida por el país durante las últimas décadas, acentuada durante el quinquenio 1985-1990, llevó al abandono de la Conservación Vial y consecuentemente a la destrucción casi completa del Patrimonio.

En 1990 las carreteras del Perú estaban en un estado muy deteriorado. De un total de 69942 km, solo el 8% estaba en buena condición, el 16% en condición regular y el 76% en mala condición (Fuente OPLA 1999). Para revertir esta situación, en 1991 el Gobierno ejecutó un plan muy ambicioso para la recuperación y desarrollo de la infraestructura vial, como resultado de ello en 1995, el porcentaje de carreteras en buen estado había subido al 28% y el 47% estaba todavía en mal estado.

En el siguiente cuadro se muestra las condiciones de las carreteras en nuestro país durante los años de 1990, 1995, 1999 y los objetivos del Programa de Rehabilitación y Mantenimiento Vial para el año 2005 establecidos por el gobierno anterior.

Cuadro 36

**CONDICION Y METAS DE LAS CARRETERAS EN EL PROGRAMA DE REHABILITACION Y MATENIMIENTO VIAL <sup>(43)</sup>**

	1990	1995	1999	2005		
				Bueno	Regular	Malo
Ruta Nacional	15,692	16,513	16,952	70%	20%	10%
Ruta Departamental	14,444	14,331	14,251	70%	20%	10%
Ruta Vecinal	39,806	42,520	46,909	70%	20%	10%
<b>Total (Km)</b>	<b>69,942</b>	<b>73,364</b>	<b>78,112</b>			

El Programa de Inversiones en Infraestructura Vial, Período 2000 - 2005, que comprende la Construcción, Mantenimiento y Rehabilitación de Carreteras se encuentra detallado en la Página WEB: [www.mtc.gob.pe](http://www.mtc.gob.pe), y a modo de resumen se presenta el siguiente cuadro:

Cuadro 37  
PROGRAMA DE INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA VIAL  
HASTA EL AÑO 2005

Proyecto	Kms	Inversión total en millones de dólares
2001	27421.6	874.4
2002	535.9	120.7
2003	3255.2	777.9
2004	1377.0	404.0
2005	1424.0	263.9

Asimismo, cabe mencionar que dentro del Plan de Gobierno del actual Presidente, el Dr. Alejandro Toledo, en lo que respecta a Infraestructura Vial (Fuente Página WEB: [www.peruposible.org.pe](http://www.peruposible.org.pe), diapositiva #36), se afirmó que se intensificará el Programa Nacional de Carreteras en Construcción, Rehabilitación y Mantenimiento de la Red Vial Nacional con intervención financiera del Banco Mundial, Banco Interamericano y otros Organismos Internacionales y se dinamizara las concesiones.

Por consiguiente, de lo mencionado anteriormente, se estima que la demanda de asfaltos crezca, al ser estos los principales componentes de los pavimentos, pues los proyectos futuros de carreteras según la actual política gubernamental así lo indican.

### **TAMAÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCION DE ASFALTOS MODIFICADOS**

Al ser modificados en este estudio los asfaltos sólidos de grado de penetración 85/100 y 120/150, de cuya demanda sólo se posee como información las ventas realizadas por refinería Conchán durante los años 1998, 1999 y 2000, las cuales se muestran en el **cuadro 38**, se determinó para fines de este estudio, que la capacidad máxima inicial de una planta modificadora de asfaltos con polímeros estaría en el orden de **1000 barriles/día** (esto corresponde al volumen máximo de ventas entre estos dos asfaltos, año 1998). Sin embargo, cabe mencionar que luego de lograr dicho objetivo, la meta final en el futuro será cubrir toda la demanda de asfaltos, por consiguiente el volumen de producción fijado anteriormente tendería a ser mayor.

**Cuadro 38**  
**DEMANDA DE ASFALTOS SOLIDOS (MBDC)**  
**SEGUN SU GRADO DE PENETRACION**

AÑO	1998	1999	2000
Asfalto PEN 40/50	0.02	0.05	0.07
Asfalto PEN 60/70	0.83	0.47	0.30
Asfalto PEN 85/100	0.34	0.19	0.17
Asfalto PEN 120/150	0.69	0.63	0.06
TOTAL	1.88	1.34	0.60

## 4.2. DISEÑO GENERAL DE UNA PLANTA DE PRODUCCION DE ASFALTOS MODIFICADOS CON EL COPOLIMERO SBS

El sistema de producción de asfalto modificado es sencillo al ser un proceso esencialmente de mezcla de dos componentes. Sin embargo, como fue mostrado experimentalmente, el factor crítico en la producción de estos asfaltos dependerá mucho de las características físicas y químicas del polímero y del asfalto empleado, pues sólo la existencia de una afinidad química comprobada (a nivel de Laboratorio) entre ambos componentes podrá asegurar la calidad del producto final. Es más, las condiciones operativas utilizadas en el proceso de modificación juegan un rol muy importante.

El diseño de la planta de asfalto modificado para fines de este estudio sólo es general, los equipos y su dimensionamiento están basados en la información proporcionada por HEATEC<sup>(44,45)</sup>, empresa constructora de plantas de asfaltos modificados y por el Area de Servicios Técnicos para Asfalto de SHELL GLOBAL SOLUTION<sup>(46)</sup>, ya que la compañía SHELL produce asfaltos modificados con el copolímero SBS.

### 4.2.1. REQUERIMIENTOS OPERATIVOS

Para la producción de asfalto modificado se requiere esencialmente de polímero y asfalto, la cantidad necesaria se obtiene del respectivo balance de materia, el cual se realiza a continuación teniendo en cuenta el volumen de producción definido.

**Balance de Materia**

Densidad del asfalto modificado: 1.05 gr/ml (valor promedio típico obtenido del **cuadro 13, Pág. 63**)

**Volumen de producción = 1000 barriles de asfalto modificado**

$$= \frac{(1000 \text{ barriles} * 158.98 \text{ litros/barril} * 1.05 \text{ gr/ml} * 1000 \text{ ml/litro})}{(1000 \text{ gr/kg} * 1000 \text{ kg/ton})}$$

**Asfalto Modificado = 166.9 ton**

Porcentaje de asfalto = 95% masa

$$\text{Asfalto} = 0.95 * 166.94 \text{ ton}$$

**Asfalto = 158.59 ton**

Porcentaje de polímero = 5% masa

$$\text{Polímero} = 0.05 * 166.94 \text{ ton}$$

**Polímero = 8.35 ton**

A continuación y a manera de resumen, se muestra los requerimientos operativos que permiten la producción de 1000 barriles/día de asfalto modificado:

<b>Materia Prima</b>	<b>Requerimiento</b>
Asfalto	158.59 ton
Polímero	8.35 ton
<b>Suministros<sup>(46)</sup></b>	
Fluido Térmico	200 litros/24h
Electricidad	375 KW/24h
<b>Mano de Obra<sup>(46)</sup></b>	
Operadores	2 Hombres

#### 4.2.2. EQUIPOS

Para la capacidad de producción estimada de 1000 barriles/día, equivalente a 42 000 galones/día, la planta de asfalto modificado consistirá de<sup>(44,45)</sup>:

2 tanques de 4 000 galones de capacidad con mezclador

1 tanque de control (Holding Tank) de 20 000 galones de capacidad con mezclador

1 molino coloidal que incluye sistema de enfriamiento

Sistema de alimentación del polímero, incluye: box tipper con capacidad para 2500 lb, tolva de 150 pies<sup>3</sup> de capacidad, faja transportadora tubular de 14" de diámetro por 22" de longitud

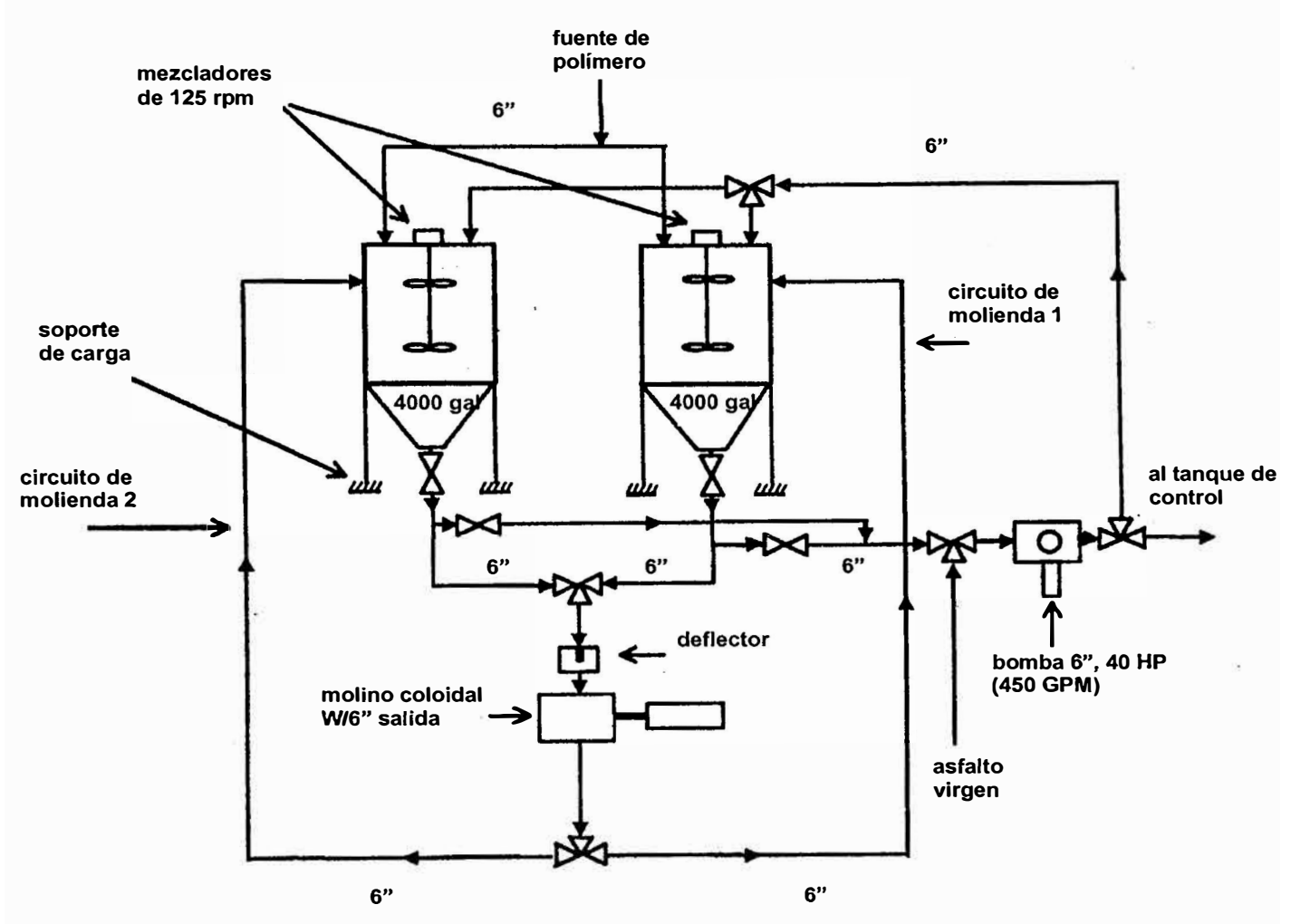
Sistema de calentamiento, incluye: serpentín helicoidal con un área superficial de 137 pies<sup>2</sup>, diseñado para una operación de dos pases, bomba de circulación, motor, quemador, controladores de temperatura, tanque de expansión y tuberías.

Panel de control eléctrico

#### 4.2.3. DESCRIPCION DEL PROCESO DE PRODUCCION DE ASFALTO MODIFICADO

A continuación se describe brevemente el proceso de producción de los asfaltos modificados con polímero tipo SBS. El asfalto base es pesado o medido fuera de un tanque de almacenamiento con sistema de calentamiento, para ingresar a los tanques de mezcla. El SBS en pellets es alimentado al sistema de mezcla a través de una tolva. En el sistema de mezcla, el cual es mostrado en la **figura 23**, el asfalto base y el SBS son mezclados hasta hacer un concentrado de cerca de 12% de polímero. Los impulsores del mezclador montado a través del tope de los tanques empujan los pellets de SBS dentro del asfalto líquido hacia abajo. Esto los humedece antes de que sean circulados a través de un molino cercano al fondo de los tanques. Los pellets de SBS son reducidos a tamaños más pequeños cada vez que hacen múltiples pasos a través del molino. Esto acelera el proceso de mezclado y asegura que todos los pellets sean disueltos. La temperatura de la mezcla es elevada aproximadamente a 170°C para asegurar el mezclado apropiado. Parte del calentamiento es debido al calor generado por el proceso de molienda.

FIGURA 23. SISTEMA DE MEZCLADO PARA LA PRODUCCION DE ASFALTO MODIFICADO CON SBS

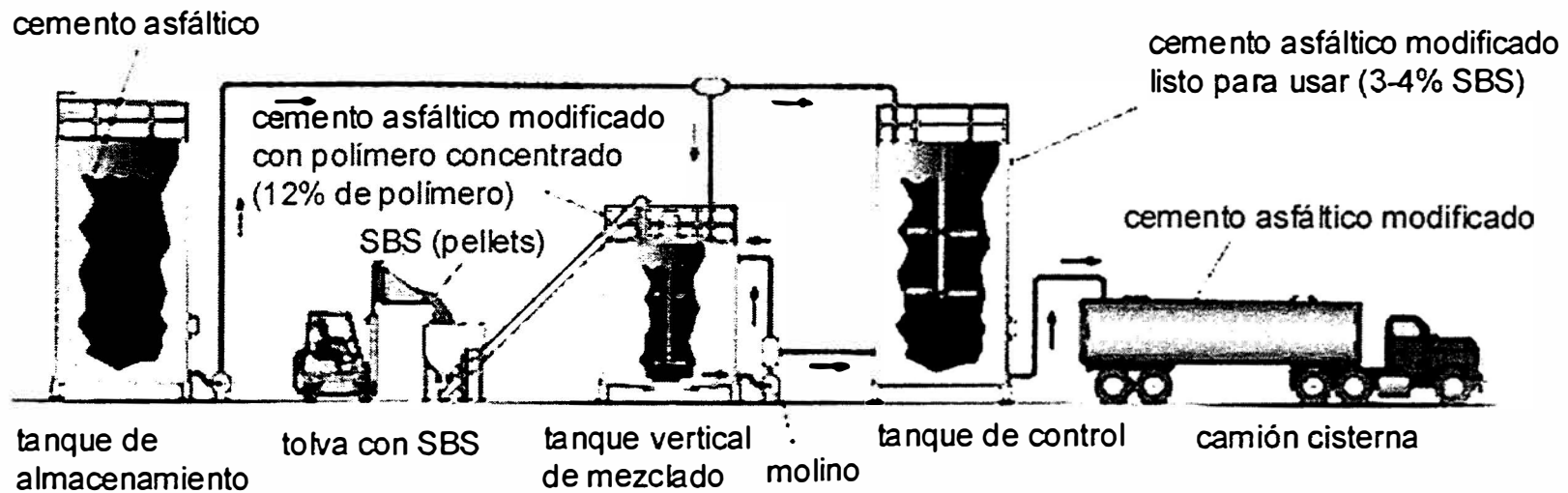


La bomba tiene un ingreso y salida de 6"

La salida de 6" de los tanques a la de 6" de la bomba (la menor distancia posible)

Molino coloidal de 1800 rpm, 350 GPM

FIGURA 24. DIAGRAMA DE PRODUCCION DE ASFALTO MODIFICADO CON SBS



La cantidad de mezcla hecha en estos tanques es usualmente limitada a pequeños lotes de concentrado. Esto es porque el molino trabaja mejor cuando las concentraciones de polímero que pasan a través de este son altas. Es más, haciendo los lotes pequeños se asegura que el control de calidad sea mejor y hay menos pérdida en caso de que exista algún problema con un lote y no pueda ser usado.

Después del mezclado inicial, el concentrado es bombeado al tanque de control donde es mezclado con asfalto adicional. El asfalto es medido para producir una mezcla de 3 a 5% de polímero. Este tanque también tiene montado un mezclador en el tope. Este mezclador continuamente agita la mezcla y evita la separación. La mezcla es mantenida a una temperatura aproximadamente de 170°C. Si la mezcla debe ser almacenada por un período de tiempo, la temperatura debe ser reducida para prevenir la degradación. Un diagrama del proceso descrito fue mostrado en la **figura 24**.

### **4.3. EVALUACION ECONOMICA DE LA PRODUCCION DE ASFALTOS MODIFICADOS**

Para efectuar la Evaluación Económica de la Producción de Asfalto Modificado con el Copolímero SBS, se tendrá en cuenta el sistema de producción descrito anteriormente. La inversión económica y los costos operativos que involucra la producción de dichos asfaltos serán tomados como referencia<sup>(44,45,46)</sup>. Seguidamente se determinará el precio de venta de dicho asfalto y se hará el análisis de la rentabilidad económica del sistema de producción propuesto a partir del cálculo de los indicadores de rentabilidad, ello permitirá justificar o no la Producción de Asfalto Modificado a nivel de Planta.

#### **4.3.1. INVERSION ECONOMICA**

La inversión económica requerida para (a) la adquisición e instalación de los equipos mencionados en el **item 4.2.2**, a los cuales se añaden dos tanques para el almacenamiento del producto, con características similares al tanque de control y para (b) los trabajos civiles y de laboratorio necesarios para la Planta de Producción de Asfalto Modificado, asciende aproximadamente a **1100 MUS\$**<sup>(44, 45,46)</sup>.



### 4.3.2. COSTOS OPERATIVOS

La producción de Asfalto Modificado, para fines de este estudio, tiene como base las instalaciones de la refinería Conchán, al ser esta la proveedora de uno de los principales componentes en la formulación del asfalto modificado, y porque en ella solo se necesitaría adaptar los equipos utilizados en el Sistema de Mezclado, que permita la elaboración de dicho producto. Por consiguiente, los costos operativos que involucra tal producción serán esencialmente de materia prima, suministros y mano de obra.

Teniendo en cuenta que la Capacidad Máxima de Producción para la planta es de **1000 barriles/día** y que el **porcentaje de polímero en el producto modificado es de 5%**, en base a los resultados obtenidos en Laboratorio, a continuación se efectuara el cálculo de los costos operativos.

#### CALCULO DE LOS COSTOS OPERATIVOS

Para el cálculo de los costos operativos se tendrá en cuenta los requerimientos de producción, mencionados en el **item 4.2.1**.

#### Costo de Materia Prima

##### a. Costo de Asfalto

Para el cálculo del costo de asfalto requerido para la producción de asfalto modificado, se tendrá en cuenta el costo de producción del asfalto puro y no su precio de venta, ya que como fue mencionado anteriormente, el sistema diseñado formará parte de las instalaciones de la refinería Conchán, la cual provee el asfalto puro. Luego:

Costo de asfalto puro = 20.06 US\$/barril

Densidad de asfalto puro = 1.01 gr/ml

Costo de asfalto = 158.59 ton\*1000 kg/ton\*1000 gr/kg\*20.06 US\$/barril  
 1.01 gr/ml\*1000 ml/litro\*158.987 litro/barril

**Costo de asfalto = 19808.02 US\$**

**b. Costo de Polímero**

Precio de polímero<sup>(47)</sup> = 1520 US\$/ton

Costo de polímero = 8.35 ton\*1520 US\$/ton

**Costo de polímero = 12692.00 US\$**

**Costo de Suministros**

Debido a la función que cumple el Fluido Térmico, como medio de calentamiento en el sistema y considerando que sólo hay mínimas pérdidas de éste en el proceso, su costo fue considerado en la Inversión Inicial y por lo tanto sólo se hará el cálculo del costo de energía eléctrica.

**a. Costo de Energía Eléctrica**

Precio de energía eléctrica<sup>(49)</sup> = 0.06 US\$/kW.h

Costo de energía eléctrica = 375 KW\*24 h\*0.06 US\$/KW.h

**Costo de energía eléctrica = 540 US\$**

**Costo de Mano de Obra**

Operadores = 2

Honorarios/operador = 2000 soles/mes

Costo de mano de obra =  $\frac{2 \text{ operadores} * 2000 \text{ soles/operador} * \text{mes}}{30 \text{ días/mes} * 3.56 \text{ soles/US\$}}$

**Costo de mano de obra = 37.45 US\$**

### **CALCULO DEL COSTO OPERATIVO TOTAL**

Costo total = costo de materia prima + costo de energía + costo de mano de obra

**Costo total = 33077.47 US\$**

### **CALCULO DEL COSTO UNITARIO DEL ASFALTO MODIFICADO**

Costo unitario = Costo total/Volumen de producción

**Costo unitario = 33.08 US\$/barril**

#### **4.3.3. PRECIO DE VENTA DEL ASFALTO MODIFICADO**

Para determinar el Precio de Venta del Asfalto Modificado se tendrá en cuenta:

1. El costo unitario de asfalto modificado calculado anteriormente, será equivalente al precio mínimo de venta del asfalto modificado.
2. El precio de asfalto modificado que genere para el cliente el mismo costo por pavimentación al año que un asfalto sin modificar, será equivalente al precio máximo de venta del asfalto modificado.

De lo anterior se plantea la siguiente ecuación:

$$\text{ec.(1). Costo unitario de asfalto modificado} \leq \text{Precio de venta de asfalto modificado} \leq \text{Precio máximo de asfalto modificado}$$

A pesar de que los asfaltos modificados son más caros que los asfaltos convencionales, los beneficios económicos obtenidos en mantenimiento, son la clave en la producción de dichos productos; pistas con mayor tiempo de vida demuestran la calidad superior de los asfaltos modificados respecto a los asfaltos convencionales, lo cual fue demostrado por el Departamento Técnico de Ultrapave<sup>(49)</sup> mediante un estudio hecho en TEXAS luego de evaluar de manera comparativa los pavimentos construídos utilizando asfalto no

modificado con pavimentos construídos utilizando asfalto modificado con copolímero elastómero SBR.

Con la finalidad de determinar el **precio de venta máximo** del asfalto modificado con SBS, para fines de esta tesis, se asumirá al igual que en el estudio de TEXAS, que:

1. El **volumen de mezcla asfáltica** en caliente requerida para la pavimentación de 20 millas-carril es de **10,560 ton** utilizando tanto asfalto sin modificar como asfalto modificado con SBS.
2. El **tiempo de servicio del asfalto sin modificar** es igual a **5.10 años**.
3. El **tiempo de servicio del asfalto modificado con SBS** es igual a **8.05 años**, dado que el copolímero SBS pertenece a la misma familia de elastómeros que el copolímero SBR utilizado en el caso TEXAS.

### Cálculo del Precio de Venta Máximo del Asfalto Modificado

$$\begin{array}{ccc} \text{Costo por pavimentación} & = & \text{Costo por pavimentación} \\ \text{anual utilizando asfalto modificado} & & \text{anual utilizando asfalto sin modificar} \\ \text{(CT1)} & & \text{(CT2)} \end{array}$$

Donde:

$$\text{(CT1)} = \frac{\text{(PV1)} * 10560 \text{ ton}}{8.05 \text{ años}} \quad (\text{PV1} = \text{Precio de venta del asfalto modificado, US\$/ton})$$

$$\text{(CT2)} = \frac{\text{(PV2)} * 10560 \text{ ton}}{5.10 \text{ años}} \quad (\text{PV2} = \text{Precio de venta del asfalto sin modificar, US\$/ton})$$

Dato:

$$\text{PV2} = 175.14 \text{ US\$/ton} \leftrightarrow 28.12 \text{ US\$/barril} \text{ (referencia: Bibliografía \#50)}$$

Entonces:

$$(CT2) = \frac{175.14 * 10560}{5.10 \text{ años}} = 362652 \text{ US\$/año}$$

Igualando (CT1) y (CT2):

$$\frac{(PV1) * 10560 \text{ ton}}{5.10 \text{ años}} = 362652 \text{ US\$/año}$$

Luego: PV1 = 276.45 US\$/ton <> 46.14 US\$/barril (**PRECIO DE VENTA MAXIMO**)

Reemplazando en la ec.(1), el costo unitario del asfalto modificado y el precio de venta máximo, expresados en US\$/barril:

$$33.08 \text{ € Precio de venta € } 46.14 \\ \text{de asfalto modificado}$$

Finalmente el Precio de Venta del Asfalto Modificado elegido, será aquel máximo valor que dentro del rango anteriormente establecido, siga generando ganancia para el cliente, es decir, si el **AHORRO 1** (obtenido de comparar el costo de pavimentación anual utilizando asfalto sin modificar con el costo de pavimentación anual utilizando asfalto modificado), es mayor que el **AHORRO 2** (obtenido considerando la posibilidad de que el cliente decida comprar asfalto sin modificar y que prefiera guardar el dinero que pudo invertir en asfalto modificado en el banco a fin de generar intereses, a una tasa de interés anual de 4.5%).

### Cálculo del Ahorro obtenido por utilizar asfalto modificado en lugar de usar asfalto sin modificar

$$\text{AHORRO 1} = (CT2) - (CT1)$$

Si: PV1 = 34 US\$/barril <> 203.69 US\$/ton

Entonces: (CT1) = 267204 US\$

Luego: AHORRO 1 = 362652 - 267204 = 95448 US\$

**Cálculo de la ganancia obtenida por generar intereses en el banco, al preferir comprar asfalto sin modificar en lugar de usar asfalto modificado**

$$\text{AHORRO 2} = (\text{PV2} - \text{PV1}) * 4.5\% * 10560 \text{ ton}$$

Reemplazando datos:

$$\text{AHORRO 2} = (203.69 - 175.14) * 0.045 * 10560 = 17399 \text{ US\$}$$

Siguiendo la secuencia anterior de cálculos, los resultados se muestran en el siguiente cuadro a modo de resumen:

Precio de asfalto modificado (US\$/barril)	Costo de pavimentación/año utilizando asfalto modificado (US\$/año)	Ahorro 1 (US\$/año)	Ahorro 2 (US\$/año)
34	267204	95448	17399
35	275063	87589	20359
36	282922	79730	23319
37	290781	71871	26278
38	298639	64012	29238
39	306498	56153	32198
40	314357	48295	35157
41	322216	40436	38117
42	330075	32577	41077
43	337934	24718	44036
44	345793	16859	46996
45	353652	9000	49956

Finalmente, el **precio de Venta del Asfalto Modificado elegido es 41 US\$/barril.**

#### 4.3.4. ANALISIS DE RENTABILIDAD DEL SISTEMA DE PRODUCCION DE ASFALTO MODIFICADO

El análisis de rentabilidad de la producción de asfalto modificado, tendrá en cuenta:

1. Que al ser el asfalto Modificado un producto nuevo para el mercado nacional de asfaltos, resulta razonable esperar una penetración en el mercado que sea progresiva, y no una penetración igual a la capacidad total de la producción desde el inicio de la operación de la planta. Es decir, se tratará de captar poco a poco el mercado de asfalto. Asimismo, se tendrá en cuenta que los problemas de mantenimiento usualmente se presentan cerca a los 4-5 años de vida útil, cuando se pavimentan carreteras con asfaltos convencionales, lo cual no ocurre con el asfalto modificado que contribuye a que el pavimento tenga un mayor tiempo de vida útil. Por lo tanto, se espera que el asfalto modificado obtenga una penetración mayor en el mercado luego del periodo mencionado y no antes, pues el desempeño es esencialmente el mismo para ambos.
2. El cálculo del Flujo Neto de Fondos para el sistema propuesto considera un período de vida útil del proyecto de 10 años.
3. El cálculo de los indicadores de rentabilidad se hace mediante el VAN, el TIR y el PAYOUT del sistema para justificar la rentabilidad o no del Sistema de Producción propuesto.

##### 4.3.4.1. FLUJO NETO DE FONDOS (FNF)

###### Datos

Inversión para el Sistema de Producción de Asfalto Modificado = 1100 MUS\$

Mantenimiento = 4% Inversión

Depreciación = 10% Inversión

Impuesto = 30% Utilidad Bruta

Días Operativos = 365 días

Penetración en el mercado asumida, teniendo en cuenta las etapas típicas del ciclo de vida en un producto<sup>(51)</sup>

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
barriles/día	250	275	350	450	700	900	1000	1000	1000	1000

**Ejemplo de Cálculo del Flujo Neto de Fondos para el año 1 (FNF<sub>1</sub>)****a. Ingresos**

$$\text{Ingresos} = \text{Precio de venta de} * \text{Volumen de} \\ \text{asfalto modificado} \quad \text{Producción}$$

Reemplazando datos:

$$\text{Ingresos} = 41 \text{ US\$/barril} * 250 \text{ barriles/día} * 365 \text{ días}$$

$$\text{Ingresos} = 3741.3 \text{ MUS\$}$$

**b. Egresos**

$$\text{Egresos} = \text{Costo unitario de} * \text{Volumen de} + \text{Mantenimiento} \\ \text{asfalto modificado} \quad \text{Producción}$$

Reemplazando datos:

$$\text{Egresos} = \frac{33.08 \text{ US\$/barril} * 250 \text{ barriles/día} * 365 \text{ días}}{1000 \text{ US\$/MUS\$}} + 0.04 * 1100 \text{ MUS\$}$$

$$\text{Egresos} = 3062.3 \text{ MUS\$}$$

**c. Utilidad Bruta**

$$\text{Utilidad Bruta} = \text{Ingresos} - \text{Egresos} - \text{Depreciación}$$

Reemplazando datos:

$$\text{Utilidad Bruta} = 3741.3 - 3062.3 - 0.10 * 1100$$

$$\text{Utilidad Bruta} = 568.9 \text{ MUS\$}$$



**d. Utilidad Neta**

$$\text{Utilidad Neta} = \text{Utilidad Bruta} - \text{Impuesto}$$

Reemplazando datos:

$$\text{Utilidad Neta} = 568.9 - 0.30*(568.9)$$

$$\text{Utilidad Neta} = 398.3 \text{ MUS\$}$$

**e. Flujo Neto de Fondos**

$$\text{Flujo neto de fondos} = \text{Utilidad Neta} + \text{Depreciación}$$

Reemplazando datos:

$$\text{Flujo neto de fondos} = 398.3 + 0.10*1100$$

$$\text{Flujo neto de fondos (FNF}_1) = 508.3 \text{ MUS\$}$$

De igual manera se hace para el cálculo del flujo de fondos de los años 2,3,..10, luego del cual se obtiene el siguiente cuadro:

Cuadro 39  
FLUJO DE FONDOS PARA EL SISTEMA DE  
PRODUCCION DE ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS

AÑO	INVERSION	INGRESOS	EGRESOS	DEPREC. LINEAL	UTILIDAD BRUTA	IMPUESTO	UTILIDAD NETA	FLUJO FONDOS
0	1,100.0							(1,100.0)
1		3,741.3	3,062.3	110.0	568.9	170.7	398.3	508.3
2		4,115.4	3,364.2	110.0	641.2	192.4	448.9	558.9
3		5,237.8	4,269.6	110.0	858.1	257.4	600.7	710.7
4		6,734.3	5,477.0	110.0	1,147.3	344.2	803.1	913.1
5		10,475.5	8,495.3	110.0	1,870.2	561.1	1,309.1	1,419.1
6		13,468.5	10,909.9	110.0	2,448.6	734.6	1,714.0	1,824.0
7		14,965.0	12,117.3	110.0	2,737.7	821.3	1,916.4	2,026.4
8		14,965.0	12,117.3	110.0	2,737.7	821.3	1,916.4	2,026.4
9		14,965.0	12,117.3	110.0	2,737.7	821.3	1,916.4	2,026.4
10		14,965.0	12,117.3	110.0	2,737.7	821.3	1,916.4	2,026.4

#### 4.3.4.2. INDICADORES DE RENTABILIDAD

##### A. VALOR ACTUAL NETO (VAN)

$$\text{ec.(2).} \quad \text{VAN} = \text{SUM FNF}_i / (1 + k)^i - \text{Inversión} \quad i = \langle 1, 10 \rangle$$

##### Datos

$k = \text{tasa de corte} = 0.15$

Inversión = 1100 MUS\$

##### Ejemplo de Cálculo del Valor Actual Neto para el año 1 (VAN<sub>1</sub>)

Del cuadro 39:  $\text{FNF}_1 = 508.3 \text{ MUS\$}$

$$\text{VAN}_1 = 508.3 / (1 + 0.15)^1 = 441.96 \text{ MUS\$}$$

De igual manera se hace para el cálculo del VAN de los años 2,3,..10, luego del cual se obtiene el siguiente cuadro:

**Cuadro 40**  
**VALOR ACTUAL NETO EN FUNCION DEL TIEMPO PARA EL SISTEMA DE PRODUCCION DE ASFALTO MODIFICADO**

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FNF	508.3	558.9	710.7	913.1	1,419.1	1,824.0	2,026.4	2,026.4	2,026.4	2,026.4
VAN	441.96	422.58	467.28	522.06	705.57	788.56	761.80	662.44	576.03	500.90

Del cuadro anterior:  $\text{SUM FNF}_i / (1 + k)^i = 5849.17$

Reemplazando en la ec.(2):

$$\text{VAN} = 5849.17 - 1100$$

$$\text{VAN} = 4749.17 \text{ MUS\$}$$

**B. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)**

$$\text{ec. (3)} \quad \text{VAN} = \text{SUM FNF}_i / (1 + \text{TIR})^i - \text{Inversión} = 0 \quad i = < 1, 10 >$$

Remplazando datos en la ec. anterior:

$$\text{VAN} = \frac{508.3}{(1+\text{TIR})^1} + \frac{558.9}{(1+\text{TIR})^2} + \frac{710.7}{(1+\text{TIR})^3} + \frac{913.1}{(1+\text{TIR})^4} + \frac{1419.1}{(1+\text{TIR})^5} + \frac{1824.0}{(1+\text{TIR})^6} +$$

$$\frac{2026.4}{(1+\text{TIR})^7} + \frac{2026.4}{(1+\text{TIR})^8} + \frac{2026.4}{(1+\text{TIR})^9} + \frac{2026.4}{(1+\text{TIR})^{10}} - 1100 = 0$$

Resolviendo la ecuación anterior:

$$\text{TIR} = 0.665$$

**C. TIEMPO DE RECUPERACION DE LA INVERSION (PAYOUT)**

A partir de los resultados mostrados en el **cuadro 39**, el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial de 1100 MUS\$ equivale aproximadamente a **2.1 años**, existiendo la posibilidad de ampliar la capacidad de planta.

**Capítulo 5**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

**5.1. CONCLUSIONES**

**5.1.1. Sobre la Compatibilidad con los Polímeros y la Estabilidad al Almacenamiento de las formulaciones modificadas:**

- Es de gran importancia que exista una buena compatibilidad entre el asfalto y el polímero para poder asegurar que cada una de las propiedades adquiridas por adicionar el polímero al asfalto se den en toda su extensión.
- Las formulaciones asfálticas modificadas con PE presentaron para ambos casos, al modificar el CAP 85/100 y el CAP 120/150, cuya procedencia es un crudo mezcla, LA MEJOR COMPATIBILIDAD DE LOS 4 POLIMEROS EVALUADOS EN ESTE ESTUDIO. Asimismo dichas formulaciones asfálticas modificadas presentaron la MEJOR ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO EN CALIENTE, lo cual también contribuye de manera positiva en la homogeneidad de la mezcla.
- Las formulaciones asfálticas modificadas con SBS presentaron mejor Compatibilidad en concentraciones de 4% y 5% (CAP 85/100). Por otro lado, pese a que los resultados de Compatibilidad luego de modificar el CAP 120/150 no fueron tan satisfactorios como en el caso anterior, se obtuvieron mejores resultados con una concentración de 5%. La Estabilidad al Almacenamiento también fue satisfactoria al modificar ambos asfaltos en las concentraciones mencionadas.
- Las formulaciones asfálticas modificadas con SB únicamente presentaron mejor Compatibilidad y Estabilidad al Almacenamiento en concentraciones de 5%.  
Las formulaciones asfálticas modificadas con EVA presentaron GRAN INCOMPATIBILIDAD con el CAP 85/100, dicha incompatibilidad se debe al alto contenido de asfaltenos de dicho asfalto, el cual para este caso no favoreció a la formación de una fase homogénea entre ambos productos. Sin embargo, los resultados de Compatibilidad fueron mejorados al modificar el CAP 120/150, con poca diferencia en el contenido de asfaltenos, pero la Estabilidad al Almacenamiento en ningún caso fue positiva.

Respecto a la Compatibilidad de las formulaciones asfálticas preparadas con SBS y el CAP 85/100, cuya procedencia es un crudo puro, de los resultados obtenidos se observó mejor afinidad entre ambos productos con concentraciones de polímero de 4% y 5%, asegurando con estos resultados la homogeneidad de la mezcla. Sin embargo, luego de someterse las muestras a la prueba de envejecimiento, TFOT, fue notoria la SEPARACION ENTRE AMBOS PRODUCTOS, con lo cual la Estabilidad al Almacenamiento en Caliente no es satisfactoria, es decir que este producto modificado en caliente se separa ya que la temperatura altera la uniformidad de la mezcla. Finalmente, que la mezcla entre un polímero y un asfalto sea compatible no necesariamente significa que sea Estable al Almacenamiento en Caliente.

#### 5.1.2. Sobre la preparación de mezclas asfálticas modificadas:

- La cantidad requerida de polímero para invertir la morfología de la mezcla de matriz asfáltica a matriz polimérica depende del asfalto, no obstante la composición química determinada por el método SARA o según la norma ASTM D 4124, empleada en este estudio, no permiten visualizar el valor para alcanzar esta inversión. La composición química no permite preveer en que extensión las propiedades tales como el Punto de Ablandamiento y el Intervalo de Plasticidad serán alterados en función del contenido de polímero.
- La obtención de mezclas homogéneas entre asfalto y polímero dependerá del grado de compatibilidad que exista entre ambos (la cual está en función de la naturaleza del asfalto y del tipo de polímero empleado) y de las condiciones de mezcla empleadas.
- Los polímeros SBS (polvo), PE (pellets) y SB (pellets) fueron los que presentaron mayor facilidad de dispersión en el asfalto y por consiguiente los que necesitaron menor tiempo para mezclarse de manera homogénea con los asfaltos.
- Las condiciones operacionales de preparación de asfalto modificado con PE, tales como temperatura, velocidad de agitación y tiempo fueron menos críticas que las requeridas para preparar formulaciones modificadas con los demás polímeros.

### 5.1.3. Sobre las propiedades de los Asfaltos Modificados:

- Punto de Ablandamiento

Los resultados obtenidos revelan el marcado incremento en la temperatura del Punto de Ablandamiento con concentraciones alrededor de 4 - 5% del polímero en la mezcla, este alto incremento es un indicador de la formación de una red continua de polímero a través del asfalto.

Por otro lado, de los 4 polímeros evaluados, el PE es el polímero que incrementa más el Punto de Ablandamiento del asfalto base, caso contrario ocurre con el EVA.

- Penetración

La penetración disminuye con el incremento de la concentración del polímero; este decrecimiento es bastante lineal cuando se grafica:  $\log(\text{pen})$  versus concentración; sin embargo, la formación de una red continua de polímero no se muestra en la medida de la penetración. Se considera que la explicación para esto es la relación no lineal stress/strain de los asfaltos modificados con polímeros: la red continua es efectiva en los bajos niveles de tensión medidos en el punto de ablandamiento y no en las condiciones de altos niveles de tensión de la prueba de penetración <sup>(43)</sup>.

De los 4 polímeros evaluados, el PE afecta poco la consistencia del asfalto base, disminuyendo el grado de penetración original para un grado inferior del asfalto, por ejemplo del grado PEN 120/150 al grado PEN 85/100 (para un rango de concentración de 3 - 5% de polímero), caso contrario ocurre con el SBS, quien altera más la consistencia del asfalto, disminuyendo el grado de penetración original hasta dos grados inferiores, es decir del grado PEN 120/150 al grado PEN 60/70.

- Viscosidad Cinemática

Los polímeros incrementan la viscosidad del asfalto por interacción, la cual está principalmente relacionada con el tamaño de las moléculas y sus detalles de estructura molecular.

De los 4 polímeros evaluados, el PE es el único polímero que afecta menos la consistencia del asfalto base, incrementando ligeramente la viscosidad, por lo cual requiere de menores temperaturas y velocidades de agitación en la preparación de sus formulaciones asfálticas modificadas; caso contrario ocurre con los demás polímeros.

- Punto de Ruptura FRAASS

El punto de Ruptura FRAASS es afectado favorablemente (disminución) únicamente por la adición de SBS. El SBS aumenta la fuerza cohesiva del asfalto lo cual contribuye a los resultados obtenidos del Punto de Ruptura FRAASS, teniéndose mejores resultados cuando el asfalto base es más blando (caso: CAP 120/150).

- Recuperación Elástica

La recuperación elástica de los asfaltos evaluados es ampliamente incrementada al añadir los polímeros SB y SBS, obteniéndose mejores resultados con el asfalto base PEN 120/150. Esta propiedad se mantiene incluso con altos valores después del envejecimiento artificial en la prueba de Película Fina, TFOT.

Específicamente, los altos valores de Recuperación Elástica obtenidos con polímeros elastómeros están relacionados a la naturaleza elástica de estos productos, entendiéndose como recuperación elástica no sólo la capacidad de elongación sino de recuperación a su estado original frente a un esfuerzo determinado.

Sin embargo, en el caso de los asfaltos modificados con polímeros plastómeros la mejora en la Recuperación Elástica es menor. Los valores obtenidos son menores a 50%, por lo cual este ensayo no es recomendable para caracterizar a los asfaltos modificados con este tipo de polímeros.

- Susceptibilidad Térmica

Si se compara el cambio en la consistencia del asfalto conforme varía la temperatura este cambio es mucho menor que en un asfalto puro, dando lugar a que los valores

del Índice de Penetración se incrementen conforme aumenta el porcentaje de polímero en la mezcla; esto quiere decir que el Asfalto Modificado con Polímero posee mejor Susceptibilidad Térmica que el Asfalto Convencional.

- Resistencia al Envejecimiento

Para evaluar la Resistencia al Envejecimiento fueron medidas propiedades como Viscosidad, Penetración y Punto de Ablandamiento. A partir de dichos datos fué calculada la variación en % de cada una de estas propiedades, luego que las distintas muestras fueran sometidas bajo las mismas condiciones de envejecimiento, TFOT, obteniéndose con los asfaltos modificados con SBS UNA MEJOR RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO que el Asfalto Convencional, aún incluso cuando el asfalto no es compatible.

- Clasificación según normas ASTM para Asfaltos Modificados con Polímeros

Para la clasificación de las formulaciones asfálticas modificadas con polímeros se tuvieron en cuenta las especificaciones según normas ASTM para los Asfaltos Modificados TIPO I, III y IV. A continuación un resumen de los resultados:

CLASIFICACIÓN SEGUN NORMAS ASTM PARA LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS	TIPO DE POLIMERO	ASFALTO BASE		
		PEN 85/100 FORMULACION CRUDO PURO	PEN 85/100 FORMULACION CRUDO MEZCLA TIPO A	PEN 120/150 FORMULACION CRUDO MEZCLA TIPO B
	PE	NO FUE MODIFICADO CON ESTE POLIMERO	III B, III C, III D, III E	—
	EVA	NO FUE MODIFICADO CON ESTE POLIMERO	III C, III D	III B, III C, III D
	SBS	I D, IV E	I C, I D, IV D, IV E, IV F	IV C, IV D, IV E, IV F
	SB	NO FUE MODIFICADO CON ESTE POLIMERO	I C, I D, IV E	I C, I D, IV C, IV D, IV E, IV F

5.1.4. En términos generales, las propiedades que los polímeros imparten a los asfaltos son las siguientes:

- Disminución de la Penetración
- Incremento de la Viscosidad



- Menor susceptibilidad a la temperatura, reflejado en altos valores de Índice de Penetración
- Incremento del Punto de Ablandamiento, por lo cual el asfalto se torna más resistente y mucho menos propenso a fluir a altas temperaturas.
- Buena Resistencia al Envejecimiento, ya que la consistencia del Asfalto Modificado luego de ser sometido al envejecimiento acelerado, varía menos que en el caso de un Asfalto Convencional.

5.1.5. El tipo de polímero adecuado y la cantidad a ser impregnada depende del desempeño en servicio que será exigido al ligante en la mezcla asfáltica.

5.1.6. Para que todas las propiedades que los polímeros imparten en los asfaltos se den en toda su extensión, es necesario que exista una compatibilidad entre el polímero y el asfalto. En caso contrario, podría llegarse a la paradoja que en vez de mejorar las propiedades de los asfaltos por adición del polímero, estas empeoren.

5.1.7. El Sistema de Producción de Asfalto Modificado a Nivel de Planta es sencillo al ser un proceso esencialmente de mezcla de dos componentes. Sin embargo, el éxito de la modificación dependerá de la existencia de una afinidad química comprobada (a nivel de Laboratorio) entre polímero y asfalto y de las condiciones operativas utilizadas en el proceso de modificación.

5.1.8. En el análisis de rentabilidad económica del Sistema de Producción de Asfalto Modificado a nivel industrial, propuesto en este estudio, se consideró (a) una producción de 1000 barriles/día, (b) el precio de venta del asfalto modificado, debía asegurar un costo anual de pavimentación menor al costo estimado cuando se utiliza asfalto convencional por lo cual garantizaría un ahorro en el mantenimiento del pavimento, y finalmente, (c) una penetración progresiva del producto modificado en el mercado, al ser un producto nuevo.

5.1.9. Los valores obtenidos para los Indicadores de Rentabilidad (VAN, PAYOUT y TIR) justificaron la producción de este nuevo producto a nivel industrial para el sistema propuesto.

- 5.1.10. Los asfaltos modificados suponen un avance notable en la tecnología de los ligantes asfálticos. Mediante su empleo se pueden abordar tratamientos que no se pueden realizar con los Asfaltos Convencionales. Asimismo con su uso se incrementa el rango de temperaturas de servicio.
- 5.1.11. El asfalto modificado con polímero es un buen material para ser utilizado en pavimentación, más es sólo un material y no puede ser el único responsable de la performance del pavimento, ya que este último es una estructura compleja. Por consiguiente, el dimensionamiento adecuado de la carpeta asfáltica, el tipo de ligante asfáltico utilizado, los tipos de agregados y el modo de compactación empleado entre otros, en su conjunto, son los responsables del performance del pavimento y garantizaran la vida útil del mismo.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- 5.2.1. El uso de asfaltos modificados con polímeros se viene incrementando en el mundo, por lo que el usuario y los proyectistas precisan conocer las alternativas existentes con sus ventajas y limitaciones, de modo que puedan hacer una mejor elección en cada caso.
- 5.2.2. Con el objetivo de predecir con mayor exactitud el comportamiento del ligante asfáltico en la vida útil del pavimento, la caracterización de aquel debe culminar en la determinación del Grado PG, según lo establecen las especificaciones SUPERPAVE; estas previamente deben ser adaptadas a las condiciones climáticas peruanas.
- 5.2.3. En lugares donde existen grandes fluctuaciones de temperatura y donde el transporte es de alto tráfico los pavimentos se deterioran considerablemente, y el uso de asfaltos modificados con polímeros resulta ser una solución viable.
- 5.2.4. De los resultados obtenidos, las FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON SBS POSEEN GRAN FLEXIBILIDAD A BAJAS TEMPERATURAS, esto se vió reflejado en los altos valores de Recuperación Elástica a 5°C y bajos valores del Punto de Ruptura FRAASS. Por consiguiente, SON IDEALES PARA ZONAS

DE CLIMA FRIO, ya que con dicho polímero el asfalto no se fractura tan fácilmente debido a que a bajas temperaturas predominan las propiedades elásticas del SBS. Sin embargo, cabe resaltar que es muy importante la naturaleza del asfalto para lograr buenos resultados con este polímero, un bajo contenido de asfaltenos balanceado con un contenido de aromáticos es ideal para la producción de asfaltos modificados con SBS, pues contribuirá a la formación de una fase homogénea. Los porcentajes óptimos dependerán del asfalto base, para los casos evaluados, el CAP 85/100 y el CAP 120/150 (procedencia: crudo mezcla), porcentajes de 5% dieron resultados satisfactorios en Compatibilidad, Estabilidad al Almacenamiento y Resistencia al Envejecimiento.

- 5.2.5. Las FORMULACIONES ASFALTICAS MODIFICADAS CON PE presentaron los valores más altos de Punto de Ablandamiento, lo cual es un indicador de la gran resistencia a la formación de ahuellamientos. Por esto SON IDEALES PARA ZONAS DE CLIMA CALIDO Y DE TRANSITO PESADO. El PE es un polímero que fácilmente se dispersa en el asfalto y no pone limitaciones en la composición química del mismo para poder modificarlo satisfactoriamente, sin embargo una alta pérdida de masa del asfalto original no es mejorada con adición de este polímero, como es el caso del CAP 120/150. Porcentajes de 5% en masa de este polímero en la mezcla dieron resultados muy óptimos de compatibilidad y propiedades físicas.
- 5.2.6. Finalmente con el objetivo de comprobar los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, se sugiere como segunda etapa de este estudio, un programa de aplicaciones, mediante la ejecución de trechos experimentales con asfaltos modificados, a modo de evaluar su comportamiento frente a la acción real del tráfico y de los agentes del intemperismo.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Ricardo E. Bisso Fernández  
LOS ASFALTOS Y SUS APLICACIONES  
INFORMACION TECNICA Y USOS TIPICOS  
PETROPERU S.A. 1998
  
2. Yolanda Herrera Ch.  
ASFALTOS EN OBRAS VIALES  
Paper presentado en el PRIMER CONGRESO NACIONAL DEL ASFALTO  
Lima - PERU 1997  
Págs: 67 - 80
  
3. Max Sommerfeld  
GENERALIDADES SOBRE POLIMEROS SBR PARA LA MODIFICACION DE  
ASFALTOS  
Paper presentado en el PRIMER CONGRESO NACIONAL DEL ASFALTO  
Lima - PERU 1997  
Págs: 148 - 152
  
4. Pablo del Aguila Rodriguez  
CRITERIOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION EN PAVIMENTOS EN  
ZONAS DE ALTURA  
Paper presentado en el PRIMER CONGRESO NACIONAL DEL ASFALTO  
Lima - PERU 1997  
Págs: 346 - 354
  
5. Pablo del Aguila Rodriguez  
APORTES PARA LA ELABORACION DE ESPECIFICACIONES TECNICAS  
DE MEZCLAS ASFALTICAS PARA PAVIMENTOS EN ZONAS DE ALTURA  
Paper presentado en el TERCER CONGRESO NACIONAL DEL ASFALTO  
Lima - PERU 1999  
Págs: 147 - 158

6. Ricardo E. Bisso F.  
LOS ASFALTOS, SUS CARACTERISTICAS Y SUS APLICACIONES TIPICAS  
Paper presentado en el SEGUNDO CONGRESO NACIONAL DEL ASFALTO  
Lima - PERU 1998  
Págs: 33 - 46
  
7. G. van Gooswilligen and W.C. Vonk  
THE ROLE OF BITUMEN IN BLENDS WITH THERMOPLASTICS ELASTOMERS FOR  
ROOFING APPLICATIONS  
Shell Chemicals  
TPE 6.3.2 - PAPER THERMOPLASTICS ELASTOMERS - DECEMBER 1994
  
8. José Estrada Valverde  
Raymundo Ramirez Roca  
CARACTERIZACION DE ASFALTOS  
Refinería Conchán - PETROPERU  
Setiembre, 1999
  
9. Whiteoak, D. SHELL BITUMEN HANDBOOK  
Inglaterra, SHELL, 1990
  
10. MASTERPAVE TECHNOLOGIES INTERNATIONAL  
POLIMEROS ESTIRENO-BUTADIENO EN EMULSIONES ASFALTICAS Y CEMENTOS  
ASFALTICOS  
Paper presentado en el SEGUNDO CONGRESO NACIONAL DEL ASFALTO  
Lima - PERU 1998  
Págs: 269 - 278
  
11. Jones D.R.  
UNDERSTANDING HOW THE ORIGIN AND COMPOSITION OF PAVING GRADE  
ASPHALT CEMENTS AFFECT PERFORMACE  
SRHP Asphalt Research Program Technical Memorandum #4 -1992

12. Leni F.M. Leite  
ESTUDOS DE PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DE ASFALTOS MODIFICADOS POR POLIMEROS  
Tesis de Doctorado aprobada en IMA/UFRJ - 1999
  
13. Leite L.F.M., Constantino R.S., Gonçalves M.L., Augusto Jr. F., Santos A.R.,  
Tonial I.A.  
UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE TÉRMICA NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE LIGANTES ASFÁLTICOS QUANTO A SUSCEPTIBILIDADE TÉRMICA E AO ENDURECIMENTO A BAIXAS TEMPERATURAS  
13º ENCONTRO DE ASFALTO DO INSTITUTO BRASILEIRO DE PETROLEO  
11-13 Dezembro de 1996  
Págs: 208 - 218
  
14. Claudy P., Letoffe J.M., Germanaud L., King G.N., Planche J.P.  
USING THERMOANALYTICAL METHODS TO CHARACTERIZE BITUMEN STRUCTURE  
Eurobitumen 1993  
Stockholm, Sweden
  
15. Leite L.F.M., Constantino R.S., Gonçalves M.L.  
AVALIAÇÃO DA FAIXA DE PLASTICIDADE E VISCOELASTICIDADE DE ASFALTOS MODIFICADOS POR POLIMEROS  
14º ENCONTRO DE ASFALTO DO INSTITUTO BRASILEIRO DE PETROLEO  
9 - 11 Dezembro de 1998  
Págs: 60 - 71
  
16. Mcgennis R.B., Anderson T.M., Kennedy T.W., Solaimanian M.  
BACKGROUND OF SUPERPAVE ASPHALT MIXTURE DESIGN AND ANALYSIS  
Report FHWA - SA - 95 - 003  
November 1994

17. 1999 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS  
Section 4. Construction  
Volume 04.03. Road and Paving Materials; Vehicle - Pavement Systems
- ASTM D 5 - 97, Págs: 1 - 6
  - ASTM D 113 - 86, Págs: 22 - 24
  - ASTM D 2042 - 97, Págs: 183 - 185
  - ASTM D 2170 - 95, Págs: 186 - 195
  - ASTM D 2171 - 94, Págs: 196 - 202
  - ASTM D 1754 - 97, Págs: 156 - 160
  - ASTM D 3625 - 96, Págs: 350 - 351
  - ASTM D 4124 - 97, Págs: 412 - 417
  - ASTM D 5976 - 96, Págs: 643 - 645
  - ASTM D 5840 - 95, Págs: 628 - 629
  - ASTM D 5841 - 95, Págs: 630 - 631
  - ASTM D 5892 - 96, Págs: 632 - 634
  - ASTM D 6114 - 97, Págs: 658 - 661
18. ASFALTOS  
AREA COMERCIAL - PETROPERU S.A.  
Pág.: 25
19. 1999 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS  
Section 5. Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels  
Volume 05.01. Petroleum Products and Lubricants (I): D 56 - D 2596
- ASTM D 92 - 97, Págs: 44 - 51
20. 1999 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS  
Section 4. Construction  
Volume 04.04. Roofing, Waterproofing, and Bituminous Materials
- ASTM D 36 - 95, Págs: 7 - 10
21. Institute of Petroleum  
STANDARD METHODS FOR ANALYSIS AND TESTING OF PETROLEUM AND  
RELATED PRODUCTS

London 1989

Págs.: 80.1 - 80.5

22. Asphalt Institute  
DESIGN TECHNIQUES TO MINIMIZE LOW - TEMPERATURE ASPHALT PAVEMENT  
TRANSVERSE CRACKING  
Research Report No. 81 - 1/ RR - 81 - 1  
USA, December 1981  
Págs: 34 - 37
  
23. Van Krevelen D.W.  
PROPERTIES OF POLYMERS - THEIR CORRELATION WITH CHEMICAL  
STRUCTURE THEIR NUMERICAL ESTIMATION AND PREDICTION FROM ADDITIVE  
GROUP CONTRIBUTION  
3<sup>th</sup> Edition Elsevier, 1990  
Capítulos: 2, 6, 13
  
24. Ferdinand Rodríguez  
PRINCIPIOS DE SISTEMAS DE POLIMEROS  
Editorial El Manual Moderno S.A. de C.V.  
México D.F.  
Segunda Edición 1984  
Capítulos: 1, 2, 3, 6
  
25. World Road Association - Technical Committee Flexible Roads  
USE OF MODIFIED BITUMINOUS BINDERS, SPECIAL BITUMENS WITH ADDITIVES  
IN PAVEMENT APPLICATIONS  
International Workshop Modified Bitumen. Roma 1998  
Págs: 17 - 19
  
26. Bellio E.  
RECYCLING OF POST-CONSUMER POLYMER AS BITUMEN MODIFIERS AND  
APPLICATIONS  
Davos Recycle' 92 - International Forum and Exposition



Switzerland, April 7-10, 1992

27. Constantinides, G; Schromek N; Lomi C  
MESCOLE DI BITUME CON POLIMERI SBS  
La Revista dei Combustibili  
VOL. XLI, Jun 1987  
Universidade de Trieste/Total ITALIA, 1987
28. Lewandoswsky L.H.  
POLYMER MODIFICATION OF PAVING ASPHALT BINDERS  
Rubber Chemistry and Technology, 1994  
Vol.67, págs: 447 - 480
29. Zenke G.  
ZUR THEORIE DER POLYMERMODIFIZIERTEN BITUMEN  
Das Stationare Mischwerk, n°5  
May 1979, pág: 7 - 20
30. A.L. Bull and W.C. Vonk  
THERMOPLASTIC ELASTOMER AND BITUMEN BLENDS FOR ROOF AND ROAD  
Shell Chemicals  
TPE 6.3.1 - PAPER THERMOPLASTICS ELASTOMERS - DECEMBER 1994
31. Shell Chemicals  
THE PREPARATION DE BLENDS OF KRATON D AND BITUMEN  
TPE 6.2.3 - BULLETIN THERMOPLASTICS ELASTOMERS - DECEMBER 1994
32. Jim May & Tom Wilkey  
HEATING, MIXING AND STORING MODIFIED ASPHALT  
HEATEC  
Technical Paper T-133, 1996
33. Brown S. F. & Airey G. D.  
RHEOLOGICAL PERFORMANCE OF AGED POLYMER MODIFIED BITUMENS

Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, 1998  
VOL. 67, Págs: 66 - 100

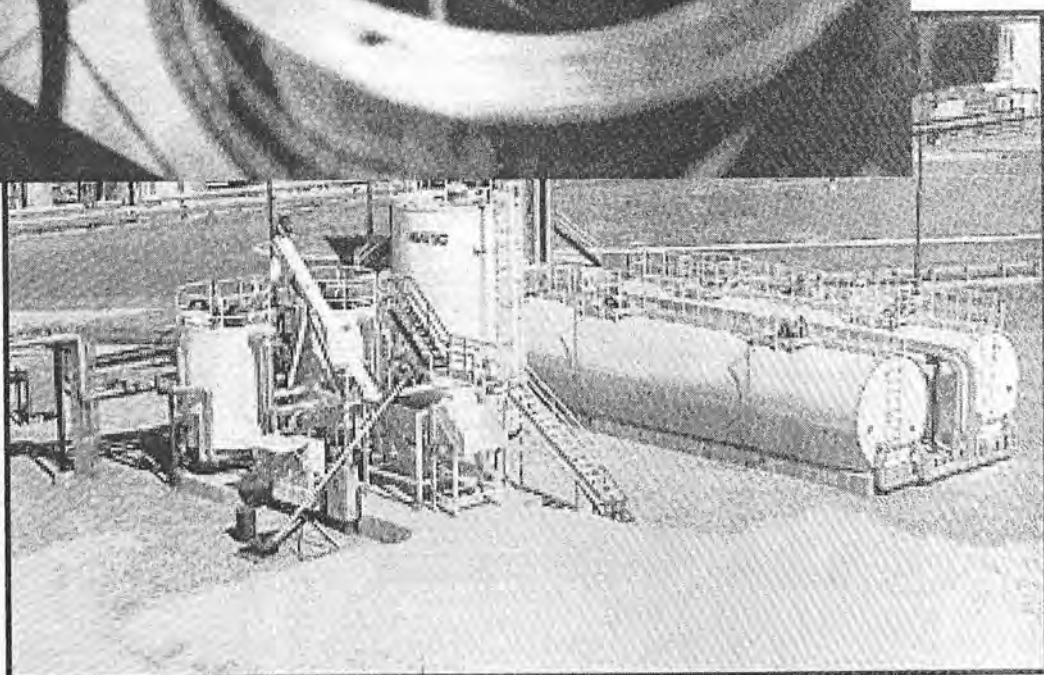
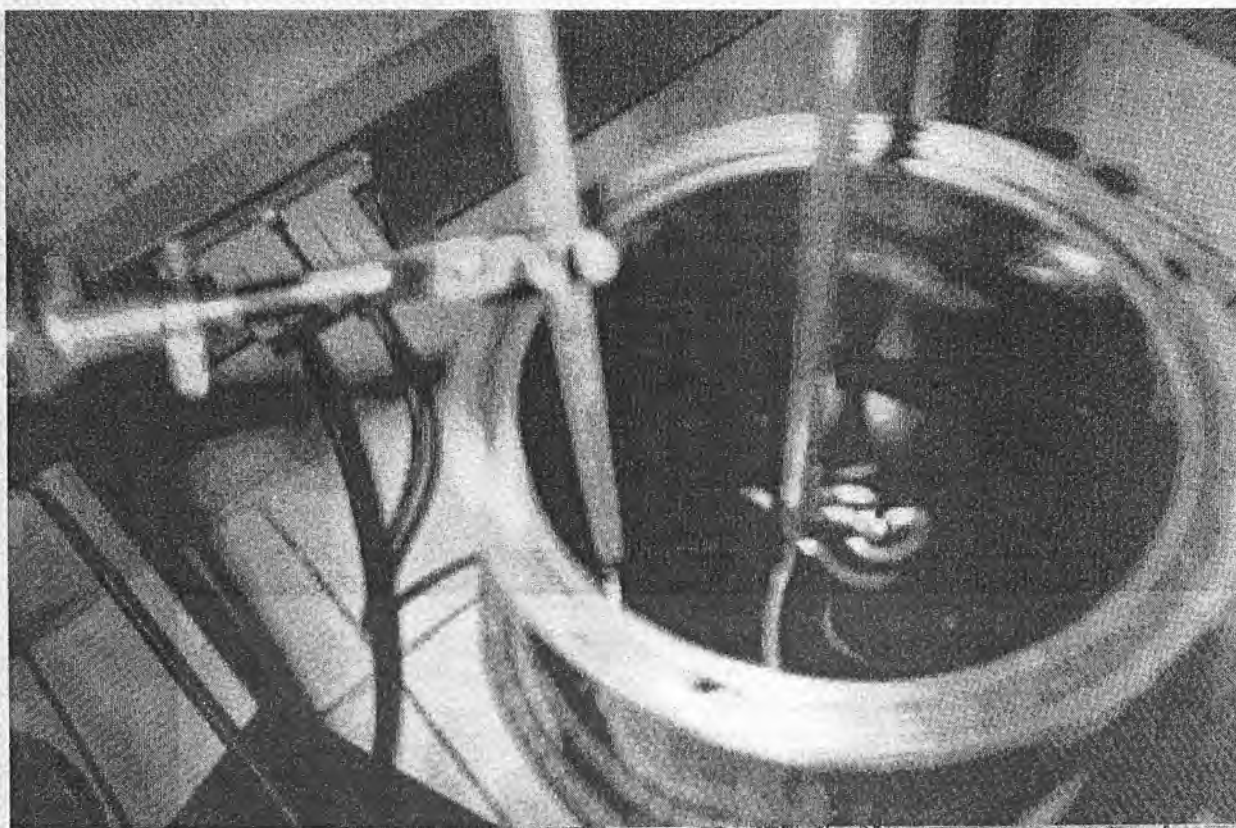
34. Zanzotto L; Foley D. P; Watson R. D; Juergens C.  
ON SOME PRACTICAL ASPECTS OF USING POLYMERS ASPHALTS IN HOT MIXES  
Proceedings of Canadian Technical Asphalt Association, 1989  
VOL. 34, Págs: 20 - 40
35. Ravaioli S.  
LAST DRAFT OF THE EUROPEAN SPECIFICATIONS, Abril, 1998
36. Ministerio de Transporte Público de Bélgica - Administración de Rutas  
SPÉCIFICATIO  
NS EM MATIÈRE DE LIANTS BITUMINEUX ROUTIERS-BITUMES DE PÉTROLE,  
BITUMES DE PÉTROLE ADDITIONNÉS, BITUMES FLUIDIFIÉS ET ÉMULSIONS DE  
BITUME  
Cirulaire n° 169-96/040001 du 25.04.86
37. ESPECIFICACIONES ALEMANAS DE ASFALTOS MODIFICADOS DIN, 1990
38. Sybilsky D.  
POLISH PROPOSAL OF ESTANDAR REQUIREMENTS FOR ROAD POLYMER  
BITUMENS  
Road Bridge Research Institute  
Warszawa, 1994
39. ELF ASPHALT  
POLYMER MODIFIED ASPHALT SPECIFICATIONS, 1992, USA
40. Dot Kentucky  
SPECIAL NOTE FOR POLYMER-MODIFIED ASPHALT CEMENT  
SHELL CHEMICAL, HOUSTON 1995

41. Jean Lefebvre  
MOBILPLAST BINDERS 1993
  
42. C.P. Valkering and W.C. Vonk  
KRATON D IN BITUMEN FOR ASPHALT MIXES: IMPROVED ELASTIC RECOVERY  
AND HIGHER PERFORMANCE  
Shell Chemicals  
TPE 6.3.6 - PAPER THERMOPLASTICS ELASTOMERS - DECEMBER 1994
  
43. Carlos Torrejón  
SISTEMA DE GESTION DE CARRETERAS - MTC  
Paper presentado en el CUARTO CONGRESO NACIONAL DEL ASFALTO  
Lima - PERU 2000  
Págs: 133 - 144
  
44. HEATEC, INC  
PROPOSAL FOR POLYMER MODIFIED ASPHALT BLENDING SYSTEM  
February 21, 2001
  
45. HEATEC, INC  
POLYMER PLANT  
Correo electrónico, 27 de Febrero del 2001
  
46. SHELL GLOBAL SOLUTIONS  
ASPHALT MODIFIED PLANT INFO.  
Correo electrónico, 16 de Febrero del 2001
  
47. KRATON POLYMERS DO BRASIL  
Precio del KRATON D 1151  
Correo electrónico, 13 de Febrero del 2001
  
48. Cía. LUZ DEL SUR  
Junio, 2001

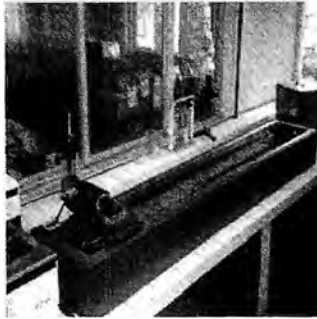
49. Néstor Huaman Guerrero  
POLIMEROS PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES, ¿PARA QUE Y CUANDO UTILIZARLOS?  
Paper presentado en el TERCER CONGRESO NACIONAL DEL ASFALTO  
Lima - PERU 1999  
Págs.: 1 - 8
  
50. PETROPERU S.A.  
DEPARTAMENTO COMERCIAL  
LISTA DE PRECIOS  
Mayo, 2001
  
51. Michael Porter  
ESTRATEGIA COMPETITIVA  
TECNICAS PARA EL ANALISIS DE LOS SECTORES INDUSTRIALES Y DE LA COMPETENCIA  
Compañía Editorial Continental, S.A. DE C.V.  
México - 1982  
Págs.: 174 - 179

## **ANEXO**

# PRINCIPALES ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACION DE ASFALTO MODIFICADO CON POLIMERO



# RECUPERACION ELASTICA ASTMD-6084



**Foto 1**  
Ductilómetro



**Foto 2**  
Moldes de bronce,  
ligeramente  
amalgamados



**Foto 3**  
Cargando muestra  
de asfalto en los  
moldes con un  
ligero exceso



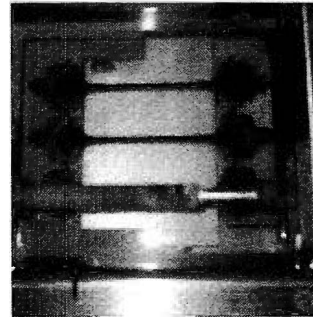
**Foto 4**  
Moldes de asfalto  
enfriando a  
temperatura  
ambiente



**Foto 5**  
Moldes de asfalto  
en el ductilómetro  
a la temperatura  
de prueba



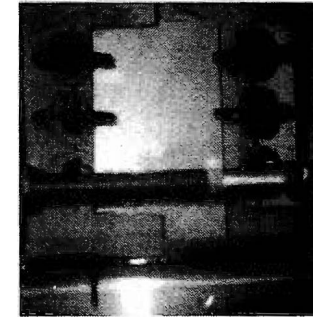
**Foto 6**  
Eliminando el  
exceso de asfalto  
con ayuda de una  
espátula caliente



**Foto 7**  
Moldes de asfalto  
elongados a 10 cm



**Foto 8**  
Cortando por la  
mitad a los moldes  
de asfaltos



**Foto 9**  
Después de 1 h. se  
observa la recupe-  
ración elástica de  
los moldes de asfalto

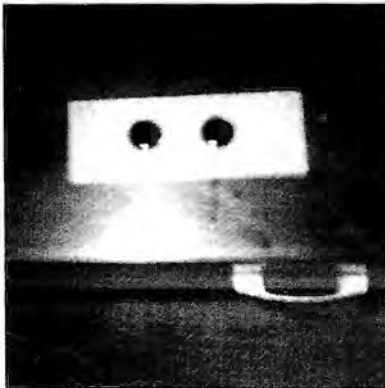
# PUNTO DE ABLANDAMIENTO ASTM D-36



**Foto 1**  
Anillos de bronce,  
ligeramente  
amalgamados



**Foto 2**  
Cargando muestra de  
asfalto en los anillos  
con un ligero exceso



**Foto 3**  
Muestra de asfalto  
enfriando a temperatura  
ambiente



**Foto 4**  
Calentamiento de la  
muestra



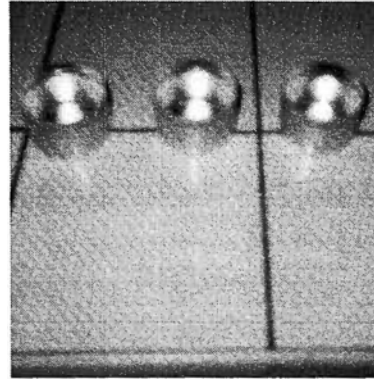
**Foto 5**  
Temperatura del  
Punto de Ablandamiento



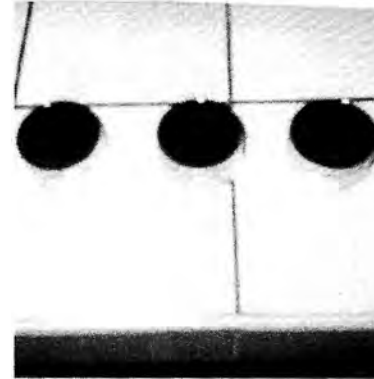
# PENETRACION ASTM D-5



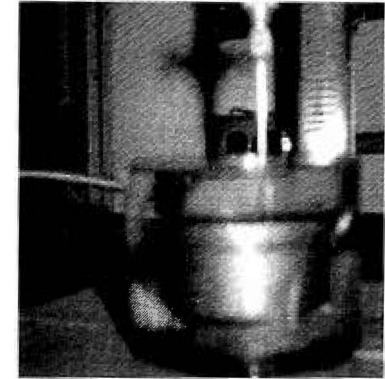
**Foto 1**  
Penetrómetro



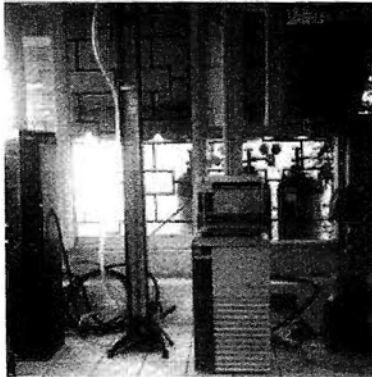
**Foto 3**  
Dish de acero



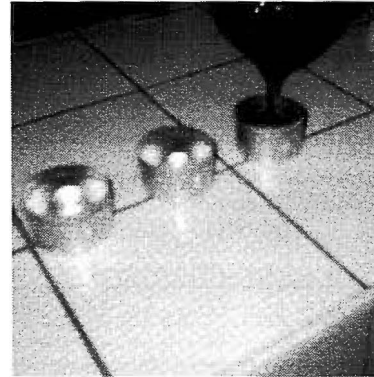
**Foto 5**  
Muestras de asfalto  
enfriando a  
temperatura ambiente



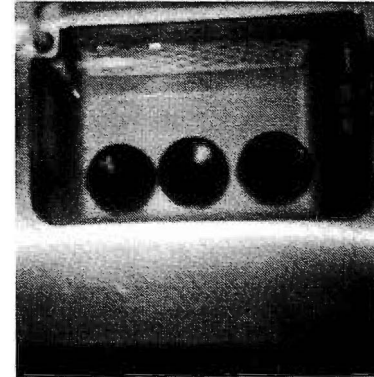
**Foto 7**  
Picando la muestra en  
el penetrómetro



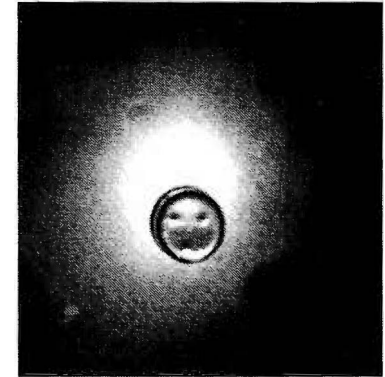
**Foto 2**  
Baño de  
agua



**Foto 4**  
Cargando muestra  
de asfalto en el dish



**Foto 6**  
Muestras de asfalto  
en el baño de agua a  
la temperatura de prueba



**Foto 8**  
3 Picadas, formando  
un triángulo de 1 cm  
de lado como mínimo

# SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO ASTM D-2042



**Foto 1**

Cargando muestra de asfalto en un erlenmeyer



**Foto 2**

Agitando erlenmeyer conteniendo la muestra de asfalto y tricloroetileno



**Foto 3**

Filtrando la muestra en un crisol Gooch, previamente tratado



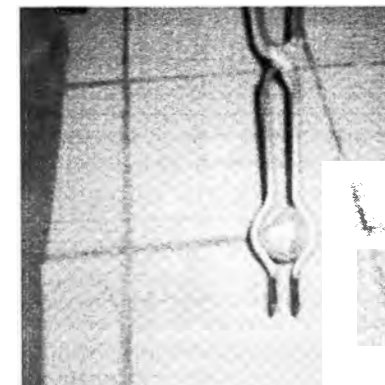
**Foto 4**

Colocando el crisol en una estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  por 15 minutos



**Foto 5**

Pesando el crisol luego de ser enfriado en un desecador



**Foto 6**

Crisol conteniendo material insoluble en tricloroetileno

# PUNTO DE RUPTURA FRAASS: IP 80/87

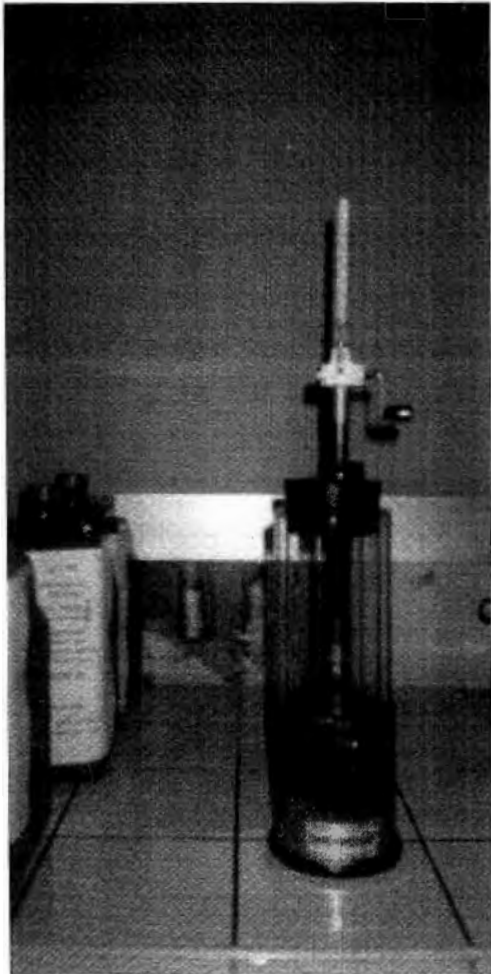


Foto 1  
Equipo para determinar el  
Punto de Ruptura FRAASS



Foto 2  
Equipo conteniendo acetona en  
el cilindro exterior y en el  
cilindro interior la placa de  
acero recubierta con asfalto

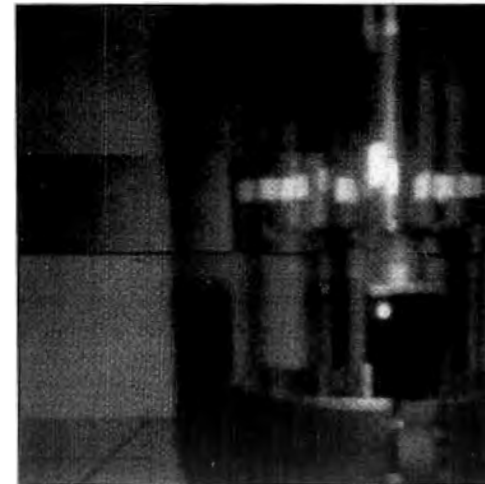
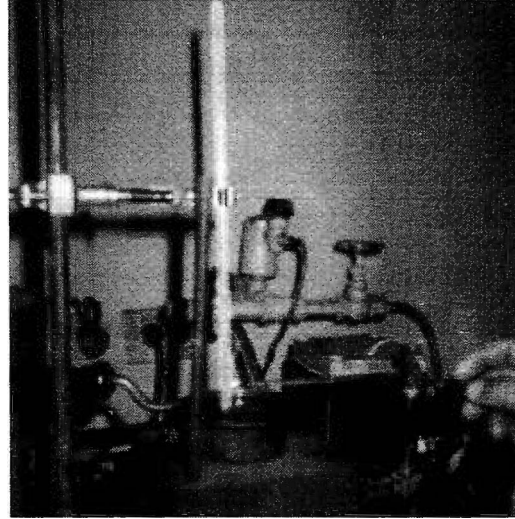


Foto 3  
Flexionando la placa hasta que  
aparezca una fisura en la  
muestra

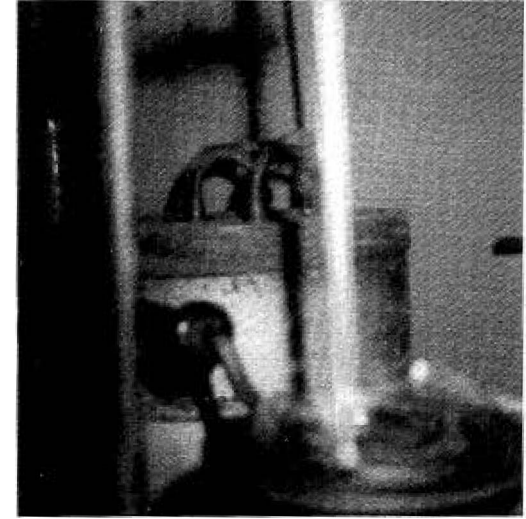
# PUNTO DE INFLAMACION:ASTM D-92



**Foto 1**  
Cargando muestra de asfalto  
en la copa de bronce

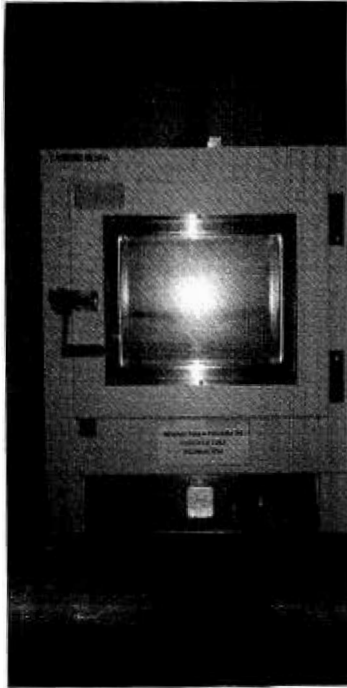


**Foto 2**  
Calentando la muestra



**Foto 3**  
Temperatura del Punto de  
Inflamación

# PELICULA FINA ASTM D-1754



**Foto 1**  
Horno para Prueba  
de Película Fina



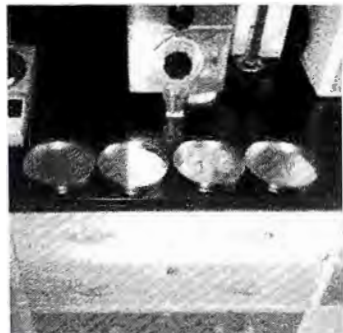
**Foto 3**  
Platos  
conteniendo  
50 gr de  
asfalto



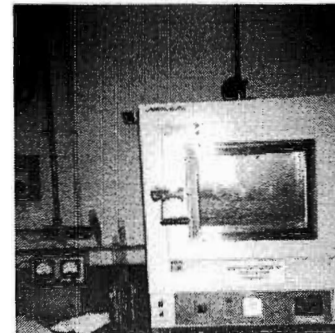
**Foto 4**  
Colocando  
muestras de  
asfalto en  
el Horno



**Foto 7**  
Muestra de asfalto  
envejecido



**Foto 2**  
Platos de acero  
inoxidable



**Foto 5**  
Muestras de  
asfalto en  
el Horno a  
163°C y 5 rpm



**Foto 6**  
Sacando  
muestras de  
asfalto luego  
de 5 horas