

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMERO SBS PARA
PAVIMENTOS DRENANTES**

Autor: Ronaldo Zamiro Machado

Orientador: Prof. Dr. Wagner dos Santos Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

**Campinas - São Paulo
Abril de 2007**

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
CÉSAR LATTES
DESENVOLVIMENTO DE COLEÇÃO

UNIVERSIDADE: BC
NOME: T/UNICAMP M18a
EX. 1
CÓDIGO DE CLASSIFICAÇÃO: 751.07
C 16.145.07
D 1
CÓDIGO DE COLEÇÃO: 00
A 27-11-07
ID 217715

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA /
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M18a

Machado, Ronaldo Zamiro

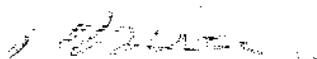
Asfalto modificado com polímero SBS para pavimentos drenantes / Ronaldo Zamiro Machado.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Wagner dos Santos Oliveira
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Asfalto. 2. Polímeros. 3. Pavimentos de asfalto. 4. Pavimentos de betume. 5. Drenagem de rodovias. 6. Materiais betuminosos. 7. Materiais compostos. I. Oliveira, Wagner dos Santos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Asphalt modified with polymer SBS for drain pavements
Palavras-chave em Inglês: Polymer SBS, Asphalt modified, Drain pavement
Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais
Titulação: Mestre em Engenharia Química
Banca examinadora: Hélio Wieberck, Antonio Celso Fonseca de Arruda
Data da defesa: 02/04/2007
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

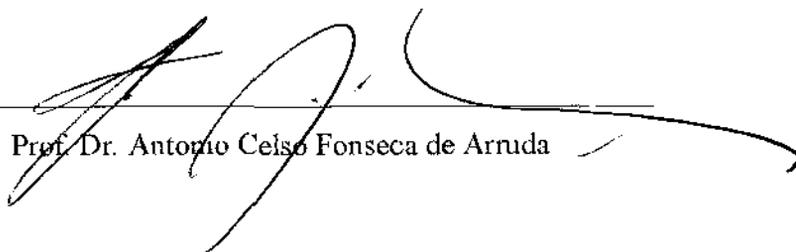
Dissertação de Mestrado defendida por Ronaldo Zamiro Machado e aprovada em 02 de /
Abril de 2007 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. – Orientador Wagner dos Santos Oliveira /



Prof. Dr. Hélio Wieberck /



Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda /

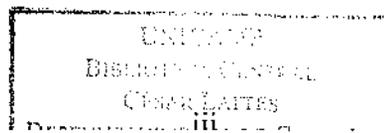
20753714

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.

• • •

Assinado

Orientador



AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar por nos dar tudo, a vida a sabedoria e a salvação por intermédio do seu Filho Jesus Cristo e também nos dá o Espírito Santo no momento do nosso batismo nas águas.

A minha querida esposa Vânia e meu querido filho Vitor e toda minha família por ter paciência nos momentos em que estive ausente para fazer esse trabalho e pelo incentivo.

Ao Professor Doutor Wagner dos Santos Oliveira, pela orientação, incentivo e apoio na realização desse trabalho.

A todos os amigos, companheiros e Professores da Faculdade de Engenharia Química da Unicamp que me apoiaram nos momentos difíceis e nas aulas.

Aos companheiros do meu antigo emprego na Kraton Polymers do Brasil S.A. e Shell Brasil S/A pelo apoio, na qual sem eles não seria possível a realização desse trabalho.

As pessoas que me deram apoio e material da Ipiranga Asfalto S.A. em Paulínia principalmente ao Emerson, Deborah, Anelise, Marcos e Humberto.



Epígrafe

“Foi-me dada toda autoridade nos céus e na terra.

Portanto, vão e façam discípulos de todas as nações, batizando-os em nome do Pai e do Filho e do Espírito Santo, ensinando-os a obedecer a tudo o que eu lhes ordenei.

E eu estarei sempre com vocês, até o fim dos tempos”.

Noosso Senhor Jesus Cristo

RESUMO

O polímero SBS – Estireno-Butadieno-Estireno tem sido muito empregado para modificar o asfalto, tanto para pavimentação como para aplicações industrial. Nessa pesquisa foi abordado o estudo do asfalto modificado com polímeros SBS, apresentando comportamento melhor que asfalto convencional, mostrando-se como o polímero se comporta ao ser misturado com o asfalto e quais características são melhoradas. O asfalto modificado com polímero SBS tem uma vida útil muito superior ao asfalto convencional, ressaltando os pavimentos drenantes, que pelos seus vazios por onde escoam a água oferece maior segurança, durabilidade, conforto, menos custos com manutenção, tempo ganho com viagens mais rápidas, menos estresse, vidas poupadas, e com tudo isso, alertar as autoridades governamentais e concessionárias de rodovias que é necessário investirem mais com esses materiais de melhor qualidade, visto que na Europa e Estados Unidos já se aplicam muito o asfalto modificado com SBS. Porém foi verificado também que nem todos os trechos das rodovias podem ser usados os pavimentos drenantes e quais os pavimentos então que devem ser usados nesses trechos. Foi feito também um comparativo entre custos e benefícios de asfaltos modificados com polímero e asfaltos convencionais.

ABSTRACT

The polymer SBS - Styrene-Butadiene-Styrene has been very employed to modify the asphalt, for paving and for industrial applications. In that research the study of the asphalt was approached modified with polymer SBS, presenting better behavior than I asphalt conventional, being shown as the polymeric behaves when being mixed with the asphalt and which characteristics are gotten better. The asphalt modified with polymeric SBS it has an useful life very superior to the conventional asphalt, pointing out the drain pavements, that for your emptiness through where it drains the water it offers larger safety, durability, comfort, less costs with maintenance, time branch with trips faster, less stress, saved lives, and with all this to alert the government authorities and concessionary of highways that it is necessary to invest more with those materials of better quality, because in Europe and United States it is already applied a lot the asphalt modified with SBS. However it was also verified that nor all spaces of the highways can be used the drain pavements and which the pavements then that should be used in those spaces. It was also made a comparative one between costs and benefits of asphalts modified with polymeric and conventional asphalts.

SUMÁRIO

	página
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
ABREVIações E NOMENCLATURA	ix
LISTA DE FIGURAS	x
1 – OBJETIVOS	01
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	02
2.1 – INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO ASFALTO	02
2.1.1 – Dados históricos sobre asfalto	02
2.1.2 – Obtenção e Tipos de Materiais Betuminosos	02
2.1.3 – Asfalto de Petróleo	03
2.1.4 – Química do Asfalto	07
2.1.5 – Reologia do Asfalto	12
2.1.5.1 – Visco-elasticidade Linear	13
2.1.5.2 – Modelos Básicos para Visco-Elasticidade	15
2.1.5.3 – Materiais Visco-elásticos simples	15
2.1.5.4 – Modelos Complexos	17
2.1.5.5 – Visco-elasticidade de asfaltos modificados por polímeros	21
2.2 – MODIFICADORES DE ASFALTO	21
2.2.1 – Introdução	21
2.2.2 – Principais Modificadores de Asfalto	22
2.2.2.1 – Borrachas	24
2.2.2.2 – S.B.S. - Estireno-Butadieno-Estireno	25
2.2.2.3 – E.V.A. - Etileno-acetato de vinila	28
3 – ASFALTO MODIFICADO	29
3.1 – Introdução	29
3.2 – Propriedades	31
3.3 – Experiências em Campo	34
4 – PESQUISA SOBRE PAVIMENTOS DRENANTES	37
4.1 – Introdução	37
4.2 – Custos com ligantes modificados com SBS	38

4.3 – Permeabilidade de Pavimentos Drenantes	39
4.4 – Durabilidade de Pavimentos Drenantes com SBS	39
4.5 – Discussão sobre Vantagens e Desvantagens de Pavimentos Drenantes	40
4.5.1 – Vantagens	40
4.5.2 – Desvantagens	41
5 – TESTES REALIZADO EM ASFALTO MODIFICADO	41
5.1 – Análises Químicas	42
5.2 – Testes Tradicionais	43
5.3 – Testes Específicos	45
5.4 – Testes Reológicos	46
6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
7 – CONCLUSÕES	48
8 – TRABALHOS FUTUROS	48
9 - REFERÊNCIAS	49
10 - ANEXOS	
10.1 - Especificação do Polímero Krston D1101 B Polymer	52
10.2 - Ficha Técnica do Betuflex da Ipiranga Asfalto	55
10.3 – Especificação de Asfalto Modificado por Polímero SBS – DNER – 396/99	57
10.4 – Adição de Polímero em Cimento Asfáltico de Petróleo	59

ABREVIACÕES E NOMENCLATURAS

AMP - Asfalto Modificado com Polímero

AP - Alcatrões para Pavimentação

CAP - Cimento Asfálticos de Petróleo

CB - Carbon Black ou Negro de Fumo

CCD - Cromatografia de Camada Delgada

CP - Corpo de Prova

DER - Departamento de Estradas e Rodagem

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DSC - Calorimetria Diferencial de Varredura

DSR - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico

EVA - Etileno-Acetato de Vinila

GPC - Cromatografia por Permeação em Gel

IBP - Instituto Brasileiro do Petróleo

IPR - Instituto de Pesquisa Rodoviária

IST - Índice de Suscetibilidade Térmica

LCPC - Laboratório Central de Ponta et Chaussies

PE - Polietileno

SBR - Copolímero de Estireno-Butadieno

SBS - Copolímero Estireno-Butadieno-Estireno

SHRP - Strategic Highway Research Program

T_g - Transição Vítrea

LISTA DE FIGURAS

	página
FIGURA 1 – Processamento de Petróleo Pesados – Asfálticos	4
FIGURA 2 – Processamento de Petróleo Médios	4
FIGURA 3 – Processamento de Petróleo Leves	5
FIGURA 4 – Estrutura coloidal tipo GEL e tipo SOL	9
FIGURA 5 – Cromatógrafo CCD/FID para separação química de asfalto – SARA	10
FIGURA 6 – Estrutura do Asfalteno, constituem de 5% a 25% no CAP	11
FIGURA 7 – Estrutura Aromática, constituem de 40% a 65% no CAP	11
FIGURA 8 – Estrutura dos Saturados, constituem de 5% a 20% no CAP	12
FIGURA 9 - Elemento de Hooke e Elemento de Newton	15
FIGURA 10 - Líquido de Maxwell e Sólido de Kelvin	16
FIGURA 11 - Curvas de fluência e de recuperação do Líquido de Maxwell e do Sólido de Kelvin	17
FIGURA 12 - Modelo Reológico de Burger	18
FIGURA 13 - Curva de fluência e de recuperação do modelo reológico de Burger	18
FIGURA 14 – Estrutura Química do SBS	25
FIGURA 15 – Domínios de poliestireno com seus ligamentos de polibutadieno	26
FIGURA 16 – Misturador de Laboratório de Asfalto com Polímero	30
FIGURA 17 – Variação do ponto de amolecimento com o teor de SBS	33
FIGURA 18 – Variação da penetração com teor de SBS	33
FIGURA 19 – Variação do retorno elástico com teor de SBS	34
FIGURA 20 – Mistura Drenante e Misturas Convencional Densa	37
FIGUARA 21 – Comparação de Pavimentos Drenantes e Normais	40
FIGURA 22 – Penetrômetro	42
FIGURA 23 – Aparelho Ring and Ball	43
FIGURA 24 – Ductilômetro	43
FIGURA 25 – Gráfico de Heulkelon, curva de asfalto modificado e o CAP	44
FIGURA 26 – Estufa de Efeito de calor e ar e parte interna	44
FIGURA 27 – Microscópio óptico de fluorescência	45
FIGURA 28 – Aparelho de recuperação elástica por torção	46
FIGURA 29 – Reômetro de cisalhamento dinâmico	47

1 – OBJETIVOS

Fazer um levantamento de como o asfalto modificado com polímero é mais duradouro que o asfalto convencional, dando uma atenção especial para os pavimentos drenantes, que em dias de chuva trazem uma segurança sem igual aos usuários das rodovias, e por causa dos vazios existentes em sua constituição, o tornam mais frágil, que asfaltos não drenantes. Por isso a necessidade de um tipo de asfalto de melhor qualidade como o asfalto modificado com polímero SBS (estireno-butadieno-estireno). Encontrar a mistura ideal entre asfalto e polímero que seja vantajoso tanto para a qualidade do produto final, quanto para o custo benefício. Ressaltando também que esses asfaltos drenantes modificados com polímero, além de vida útil maior, também causam mais conforto e segurança aos usuários, com isso teremos menos manutenções e as rodovias mais tempo com todas as faixas liberadas para os usuários, e menos custos com a saúde pública devido aos acidentes em dias de chuvas. Isso tudo leva a um alerta às autoridades e as concessionárias a investirem mais em rodovias com materiais de melhor qualidade, pois o custo benefício compensa, já que vidas humanas não tem preço.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO ASFALTO

2.1.1 – Dados históricos sobre asfalto

Dentre os materiais mais antigos utilizados pelo homem é, sem dúvida, o asfalto, segundo o Instituto Brasileiro do Petróleo - IBP (1999):

- Na Mesopotâmia, escavações arqueológicas revelaram o seu emprego em épocas anteriores à nossa era. O asfalto era usado como aglutinante em trabalhos de alvenaria e construção de estradas, e também como impermeabilizante de reservatórios de água e salas de banho;
- Citações bíblicas revelam que o asfalto foi empregado como impermeabilizante na Arca de Noé na pré-história bíblica, e outras citações nas quais o IBP não citou, mas consta também na própria Bíblia Sagrada em Gêneses (1993, p. 8-12) e utilização como argamassa na construção da Torre de Babel na pré-história bíblica, e na calafetagem do cesto em que Moisés foi colocado no rio Nilo, quando ainda neném conforme Êxodo (1993, p. 56), aproximadamente 1400 a.C;
- Também os egípcios utilizavam o asfalto em trabalhos de mumificação.
- Somente mais tarde na França em 1802, nos Estados Unidos (Filadélfia) em 1838 e na Inglaterra em 1869 e que foram executadas as primeiras pavimentações asfálticas com asfalto naturais provenientes de jazidas. Mas a partir de 1909 é que o primeiro asfalto derivado de petróleo foi utilizado e pela suas características de economia e pureza em relação aos asfaltos naturais, constituindo atualmente a principal fonte de suprimento para pavimentação;
- Segundo De Senço (1997) apud Amaral (2000, p. 8) disse que inicialmente no Brasil, o asfalto utilizado era importado de Trinidad, somente a partir de 1944 é que se começou a refinar petróleo pela Ipiranga Asfaltos S.A.

2.1.2 – Obtenção e Tipos de Materiais Betuminosos

Segundo o IBP (1999), são os derivados de carvão (alcatrão) e derivados de petróleo (asfalto) os dois tipos de materiais betuminosos que podem ser utilizados em pavimentação. Os alcatrões para pavimentação (AP) resultam de processos de refino de alcatrões brutos, os quais originam-se de destilação dos carvões durante a fabricação de gás e coque. Mas que na década de 60 parou de ser utilizado no Brasil.

Os asfaltos são materiais aglutinantes, de cor escura, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis, de elevada massa molecular e, se originam do petróleo de duas formas:

- Pela evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre (asfalto natural);
- E por destilação em unidades industrial especialmente projetadas.

O IBP (1999, p. 12) afirma que:

Os asfaltos naturais podem ocorrer em depressões da costa terrestre, constituindo os lagos de asfaltos (Trinidad, Bermudas), ou aparecerem impregnados os poros de algumas rochas, formando as denominadas rochas asfálticas (asfaltita e gilsonita). Encontram-se também misturados com impurezas minerais (areias e argilas), em quantidades variáveis, sendo geralmente submetidos a processos de purificação para serem aplicados em pavimentação.

Atualmente, a maior parte do asfalto produzido e empregado no mundo é proveniente do petróleo, do qual é obtido isento de impurezas, sendo solúvel em tricloroetileno.

2.1.3 – Asfalto de Petróleo

O IBP (1999, p. 12,17) informa que o petróleo consiste de 10 a 72,5% de asfalto dependendo de varias características do cru, principalmente da densidade. Os processos de refinação para obtenção de asfalto dependem do tipo de petróleo e do rendimento em asfalto que o mesmo apresenta. Se o rendimento em asfalto for alto, o cru apresenta características asfálticas, bastando apenas um estágio de destilação. Os petróleos que apresentam médio rendimento em asfalto são do tipo intermediário, o processo é o da destilação em dois estágios: um a pressão atmosférica seguido de outro a vácuo. Se o petróleo é do tipo leve, além do esquema anterior citado, inclui-se um processo de extração após o 2º estágio da destilação, denominado de desasfaltação. Esta extração é efetuada com mistura propano/butano a pressão e temperaturas controladas (desasfaltação). O resíduo da desasfaltação é um produto rico em asfaltenos e pobre em saturados. Para enquadramento nas especificações de CAP - Cimento Asfálticos de Petróleo, necessita de diluição. Desses processos o mais usado é o da destilação em duas etapas, que permite o uso de uma gama bem maior de tipos de petróleo, que consiste, basicamente, de uma separação física dos vários constituintes do petróleo, pela diferença entre pontos de ebulição e de condensação. O produto obtido no fundo da torre de vácuo, após a remoção dos demais destilados de

petróleo, quando enquadrado nas Especificações Brasileiras passa a ter o nome de Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP.

Em linhas gerais, apresenta-se na figura 1, figura 2 e figura 3 os esquemas de refino:

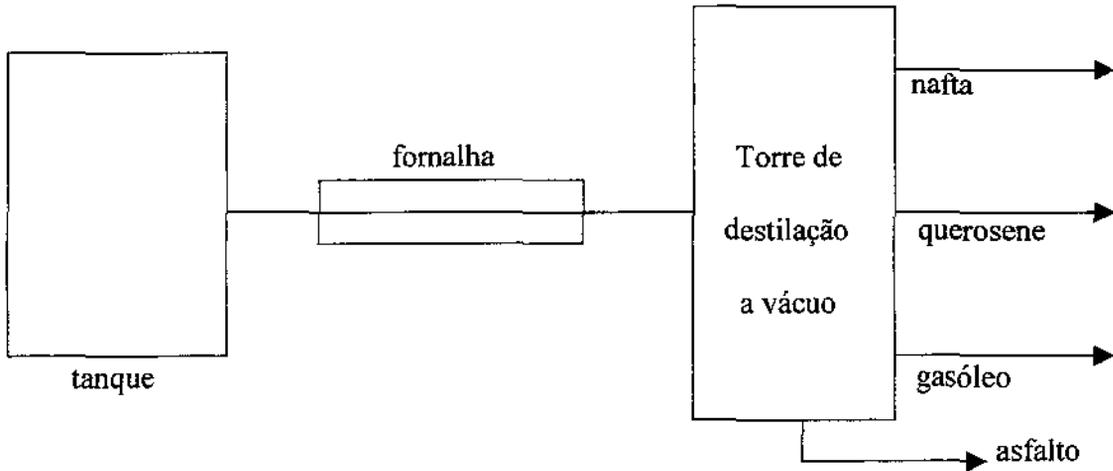


FIGURA 1 – Processamento de Petróleo Pesados – Asfálticos (IBP, 1999, p. 18)

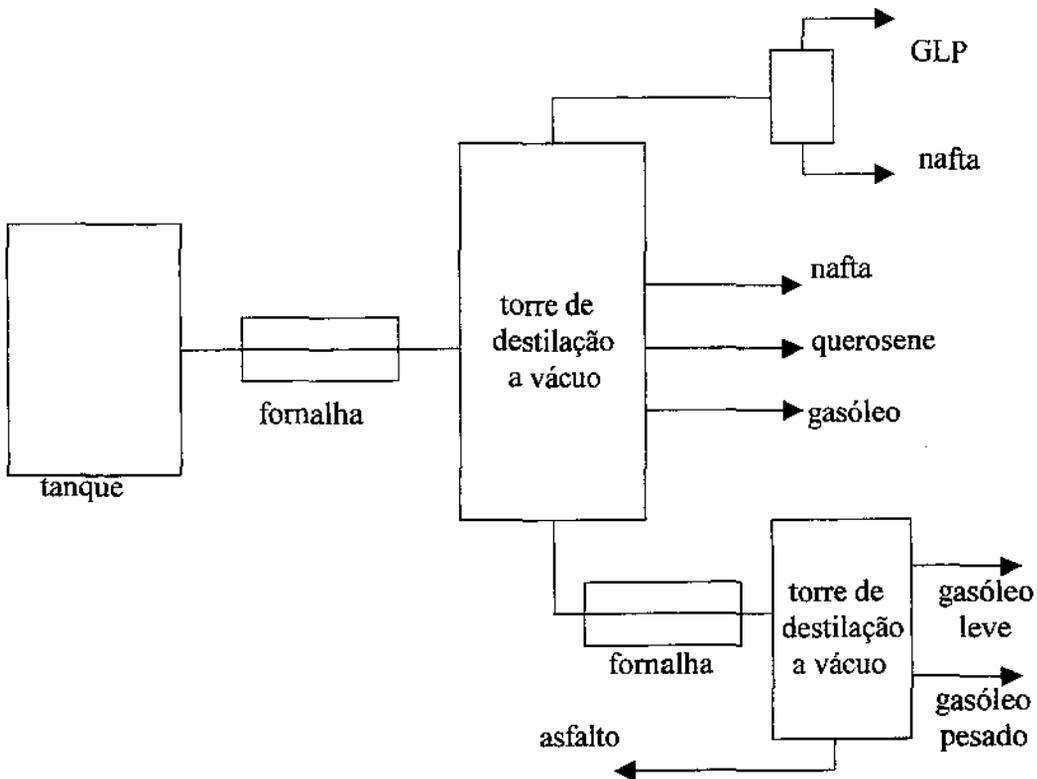


FIGURA 2 – Processamento de Petróleo Médios (IBP, 1999, p. 18)

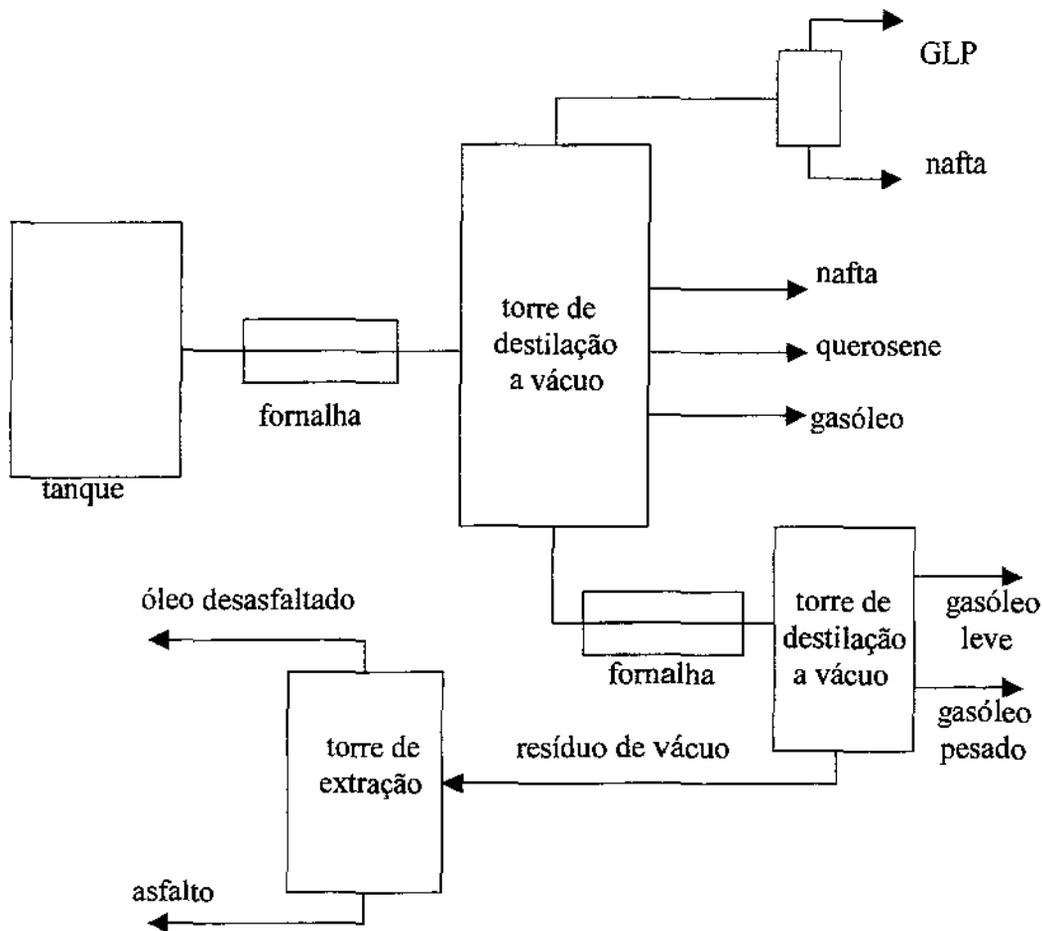


FIGURA 3 – Processamento de Petróleo Leves (IBP, 1999, p. 18)

O IBP (1999, p. 12) ressalta que para obtenção do asfalto, tipos específicos de petróleo são submetidos ao processo de destilação no qual as frações leves como gasolina, querosene, diesel, são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação. A operação se desenvolve em torres de fracionamento com arraste de vapor. A fim de permitir o processamento a temperaturas relativamente baixas, o estágio final é de destilação a vácuo evitando-se, assim, o craqueamento do asfalto com a conseqüente perda de algumas de suas propriedades. O cimento asfáltico de petróleo é obtido em diferentes consistências e medidas pelos ensaios de penetração. Antigamente era determinado também por viscosidade dinâmica e constitui o produto básico a partir do qual se preparam vários tipos de matérias para pavimentação. O elemento aglutinante ativo que constitui asfalto denomina-se betume. Com o objetivo de estabelecer distinção entre estes termos o IBP (1999, p. 12) define:

- **Asfalto** – Material aglutinante de consistência variável, cor pardo-escura ou negra e no

qual o constituinte predominante é o betume, podendo ocorrer na natureza em jazidas ou ser obtido pela refinação de petróleo.

- **Betume** – Mistura de hidrocarbonetos pesados, obtidos em estado natural ou por diferentes processos físicos ou químicos, com seus derivados de consistência variável e com poder aglutinante e impermeabilizante, sendo completamente solúvel no tricloroetileno.

Cerca de 95% dos asfaltos fabricados no Brasil são utilizados em trabalhos de pavimentação, e apenas uma pequena parte é para aplicações industriais, como impermeabilizante, como isolante e outros usos.

Segundo o IBP (1999, p. 13) os asfaltos, portanto, de acordo com a sua aplicação, classificam-se em dois grupos, como mostra a seguir:

- a) Asfaltos para pavimentação:
 - a.1) Cimentos asfálticos;
 - a.2) Asfalto Diluídos;
 - a.3) Emulsões Asfálticas;
 - a.4) Asfaltos Modificados.
- b) Asfaltos Industriais (para outras finalidades):
 - b.1) Asfaltos Oxidados;
 - b.2) Asfaltos Modificados para Impermeabilização.

Segundo Amaral (2000), os cimentos asfálticos são preparados especialmente para apresentar qualidades e consistências próprias para o uso direto na construção de revestimentos asfálticos. Os asfaltos diluídos resultam da diluição de cimento asfáltico por destilados de petróleo. As emulsões asfálticas são dispersões de cimento asfáltico em fase aquosa, com tempo de ruptura variável. Os asfaltos modificados com polímeros são obtidos a partir da dispersão do Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP com o polímero, em planta apropriada, podendo ou não envolver reação química para sua estabilização. Os asfaltos oxidados ou soprados são asfaltos aquecidos e submetidos à ação de uma corrente de ar com o objetivo de modificar suas características normais, a fim de adaptá-los para aplicações especiais.

2.1.4 – Química do Asfalto

Segundo o DNER (1998) apud Amaral (2000, p. 11-14), quimicamente o asfalto é definido como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos dispersadas em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de óleos aromáticos e saturados, chamados maltenos. Os métodos de separação de asfalto em frações têm um ponto comum que é a separação da parte sólida do asfalto (os asfaltenos) pela adição de um solvente que dissolva os maltenos e não dissolva os asfaltenos. Utiliza-se de uma propriedade fundamental dos sistemas coloidais, que é a destruição de sua estabilidade pela eliminação de camadas de proteção das micelas, que faz com que elas se associem e precipitem pela ação da gravidade. A estabilidade de uma micela é dada por uma camada de agente peptizante ou por camadas de solvatação, bastando eliminar a proteção, que a micela sedimenta. Tal procedimento é feito através da adição de um solvente que seja afim ao meio de dispersão e à camada de proteção, e que não tenha nenhuma afinidade pela micela. As micelas são constituídas fundamentalmente por aromáticos, devido a sua alta relação C/H, sua separação se dá pela adição de um alcano leve. Uma vez separada a fase micelar (asfaltenos), a fase intermicelar (maltenos) fica solúvel no solvente usado, e pode então ser dividida em sub-grupos. Os sub-grupos são então separados por diferentes métodos, como são mostrados a seguir:

a) Método de Schweyer e Traxler:

Baseia-se no fracionamento por solvente, em duas etapas: na primeira, o malteno é separado do asfalto por solubilização em n-butanol, enquanto na segunda, após a eliminação do butanol, o malteno é fracionado por acetona que após dissolver todo o óleo maltênico é resfriada, forçando a precipitação dos saturados, separando-os da fração solúvel, constituído pelos cíclicos (aromáticos e resinas). Este método separa o asfalto em três frações: asfaltenos, compostos cíclicos (resinas e aromáticos) e compostos saturados.

b) Método de Rostler e Sternberg:

Baseia-se na separação dos asfaltenos a partir da sua insolubilização em n-pentano e posterior separação das frações maltênicas por precipitação química, usando ácido sulfúrico

de densidade crescentes. Este método separa o asfalto em cinco frações: asfaltenos, base nitrogenadas, acidafinas I, acidafinas II e saturados.

c) Técnica da Cromatografia:

Definida como o procedimento físico-químico que permite separar os componentes de uma mistura através de suas interações com duas fases distintas, sendo uma a fase estacionária ou adsorvente, e a outra a fase móvel ou solvente. Esta técnica levou ao surgimento do método da sílica-gel, também conhecido como método Rostler modificado, que baseia-se na separação dos asfaltenos pela solubilização dos maltenos em n-pentano, seguido da separação das frações maltênicas através de coluna cromatográfica, usando sílica-gel e argila Attapulgius como fase estacionária adsorvente, e como fase móvel, solventes de polaridade crescente. Este método separa o asfalto em quatro frações: asfaltenos, resinas ou compostos polares, compostos aromáticos e saturados.

d) Método de Colbert:

Baseia-se na separação dos asfaltenos pela solubilização dos maltenos em n-heptano, seguido pela separação dos maltenos em frações de polaridades crescentes, usando como adsorvente sólido a alumina finamente dividida. Este método separa o asfalto em quatro frações: asfaltenos, aromáticos polares, aromáticos naftênicos e saturados. Este método é o mais usado atualmente, entretanto existem outros métodos que utilizam equipamentos e tecnologias muito especializadas, como o SARA e a Ionização de Chama.

Ainda segundo o DNER (1998) apud Amaral (2000, p. 11-14), a natureza, a forma e a quantidade das micelas, juntamente com a proporção, relativa dos óleos aromático e saturado, determinam as propriedades coloidais e reológicas do asfalto. Quando as micelas e o óleo intermicelar têm grande afinidade, a solvatação das micelas é muito grande e o sistema apresenta tendência a formação de micelas livres, soltas, com espessa película entre elas. Nesse caso, o asfalto é bastante suscetível à ação da temperatura e é chamado de CAP do tipo SOL. Em oposição, quando a afinidade miscela-meio não é tão grande, a solvatação é deficiente, fazendo com que as micelas, poucas solvatadas, salientem sua assimetria, favorecendo a interligação entre elas, formando esqueletos que ocluem mecanicamente o óleo intermicelar restante; esses sistemas são muito menos sensíveis à ação da temperatura

e são chamados de CAP do tipo GEL.

Na figura 4 vê-se a passagem do estado sólido ao líquido do CAP, indo do comportamento GEL ao SOL, (WHITEOK, 1990, apud MACIEL, 2003).

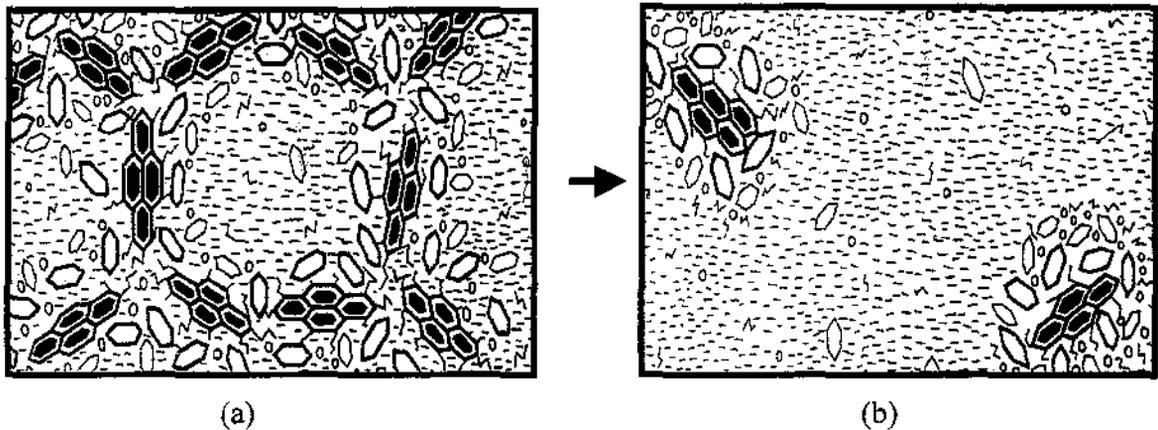


FIGURA 4 – Estrutura coloidal tipo GEL (a) e tipo SOL (b)

Segundo DNER (1998) apud Maciel (2003), a análise elementar de cimento asfáltico de petróleo de diferentes petróleos mostra a seguinte constituição, aproximadamente: Carbono (82 – 88%), Hidrogênio (8 – 11%), Enxofre (0 – 6%), Oxigênio (0 – 1,5%), Nitrogênio (0 – 1%), cuja composição química dos CAPs é extremamente complexa. Na Europa, o fracionamento químico utilizado é semelhante ao da ASTM D4124, sendo a separação dos asfaltenos e maltenos realizada por cromatografia de camada fina e a detecção dos teores dos componentes por ionização de chama figura 5. O método é conhecido como SARA para separação de saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos.

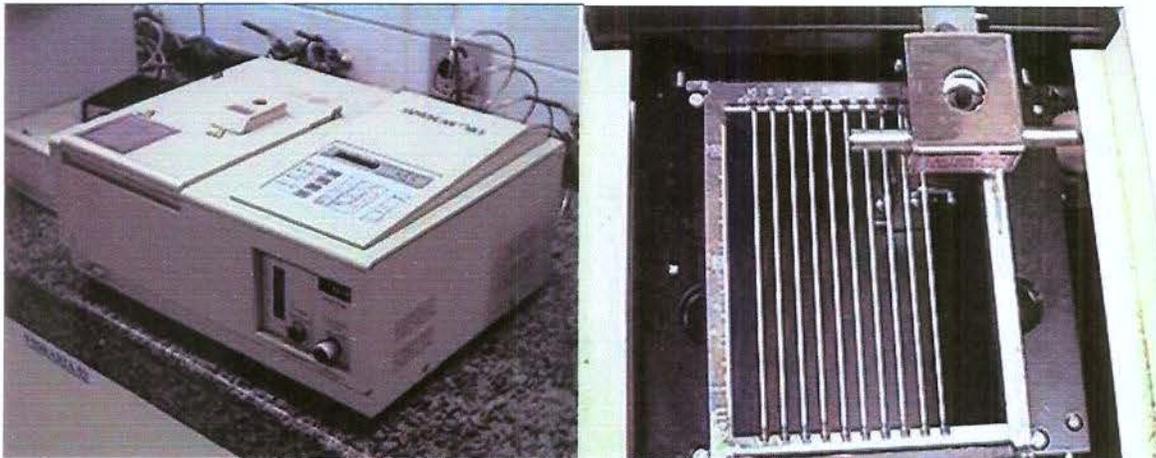


FIGURA 5 – Cromatógrafo CCD/FID para separação química de asfalto – SARA

Pela tabela 1 pode-se ver a análise elementar dos quatro grupos detalhadamente e as figuras com a estrutura do asfalteno, aromáticos e saturados, onde os **R** correspondem às cadeias de carbonos alifáticos, naftênicos e aromáticos na figura 6 e naftênicos e aromáticos na figura 7 (WHITEOK, 1990, apud MACIEL, 2003).

TABELA 1 – Análise elementar dos quatro grupos em um asfalto.

Coluna A	Qtde da coluna A no asfalto, % peso	Carbono, % peso	Hidrogênio, % peso	Nitrogênio, % peso	Enxofre, % peso	Oxigênio, % peso	Fração Aromática, % peso	Massa Molar, g/mol
Asfaltenos	5,7	82,0	7,3	1,0	7,8	0,8	1,1	11300
Resinas	19,8	81,6	9,1	1,0	5,2	-	1,4	1270
Aromáticos	62,4	83,3	10,4	0,1	5,6	-	1,5	870
Saturados	9,6	85,6	13,2	0,05	0,3	-	1,8	835

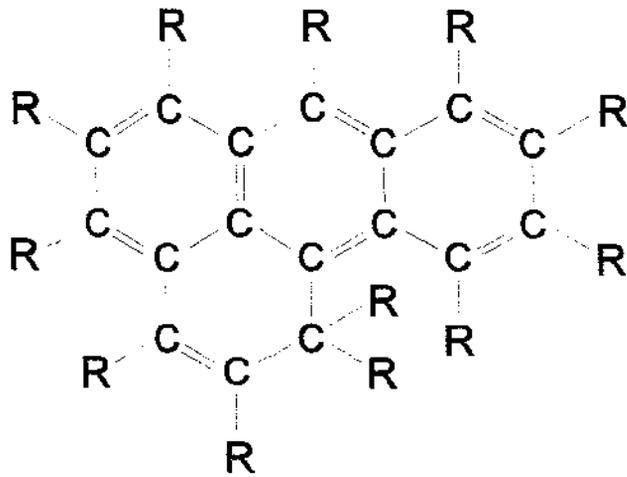


FIGURA 6 – Estrutura do Asfalteno, constituem de 5% a 25% no CAP.

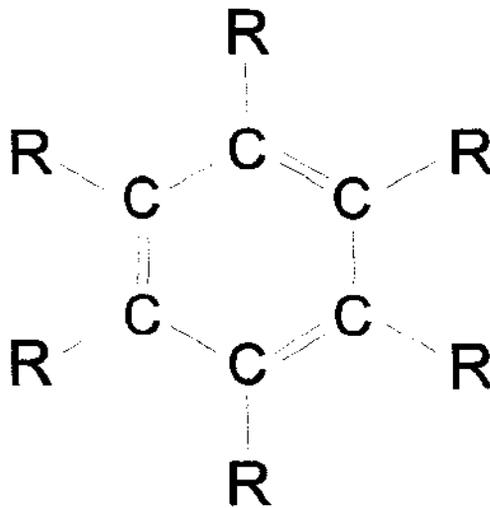


FIGURA 7 – Estrutura Aromática, constituem de 40% a 65% no CAP.

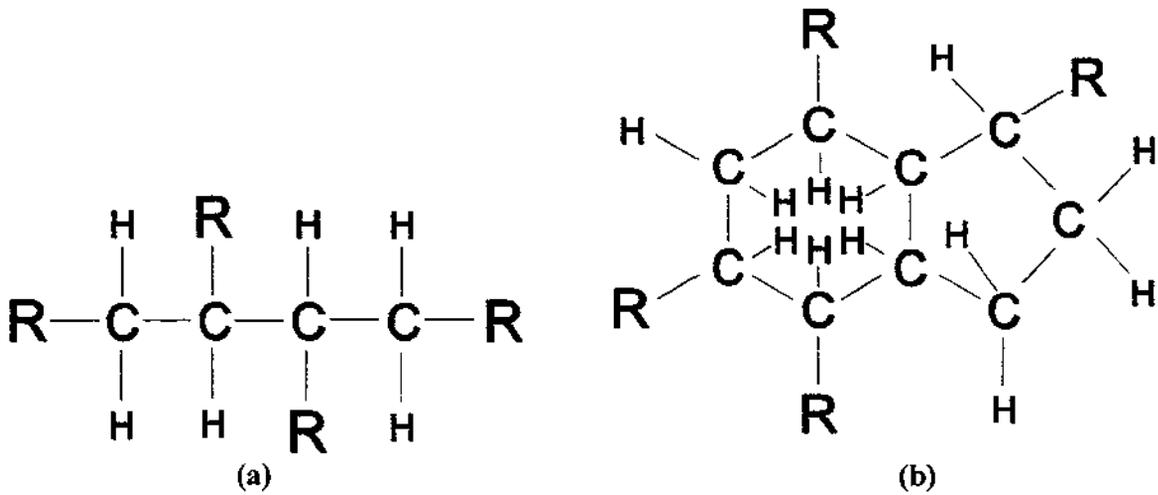


FIGURA 8 – Estrutura dos Saturados, constituem de 5% a 20% no CAP, (a) ramificada e (b) cíclica.

2.1.5 – Reologia do Asfalto

Reologia é a Ciência que estuda a deformação e fluxo dos materiais, seja nas formas líquido, liquefeito ou sólido em termos da elasticidade e da viscosidade do material. O asfalto é um material visco-elástico e pode exibir tanto um comportamento elástico como viscoso, ou uma combinação destes dois comportamentos, dependendo da temperatura e do tempo no qual o asfalto é observado. Em temperaturas suficientemente baixas e/ou em altas taxas de carregamento (frequência), o asfalto reage essencialmente como um sólido elástico. Quando a temperatura aumenta e quando a taxa de carregamento se reduz, a propriedade viscosidade do asfalto se torna mais evidente. Em temperaturas suficientemente altas e/ou em longo tempo de aplicação de cargas, o asfalto é essencialmente um líquido Newtoniano e pode ser descrito por um valor de viscosidade independente da taxa de aplicação de carga. As propriedades reológicas dos asfaltos podem influenciar significativamente na eficiência das misturas asfálticas durante a mistura, a compactação e em serviço. Por estas razões, vários tipos de testes reológicos são incluídos nas especificações dos asfaltos. As propriedades reológicas dos asfaltos são determinadas pelas interações moleculares (forças inter-moleculares), que por sua vez dependem da composição química. Em princípio, as propriedades reológicas desejadas para o asfalto podem ser conseguidas mudando a composição química do asfalto usando um aditivo ou uma modificação através de reação química. A adição de polímeros é um jeito versátil de modificar a reologia dos asfaltos. Muitos tipos de polímeros são aproveitáveis, entretanto, não há um polímero universal e uma seleção deveria ser feita de acordo com as necessidades. (LU; ISACSSON; EKBLAD, 1999) apud Amaral (2000, p. 14-15).

Ainda segundo o DNER (1998) apud Amaral (2000, p. 15), as propriedades reológicas de um CAP variam enormemente com a variação da temperatura, mas a forma dessa variação não é a mesma, já que ela varia de “forma personalizada” em cada CAP, por ser função de dependência direta da sua susceptibilidade térmica, que por sua vez, depende diretamente da constituição química e da forma como as micelas e o meio intermicelar se arrumam para atingir o equilíbrio coloidal estável. Como fator altamente complicador, aparece ainda o envelhecimento do CAP ao longo de sua vida útil. É sabido que o envelhecimento se dá pela oxidação de moléculas polarizáveis dos maltenos, que se tornam polares, e passam a fazer parte da fração asfáltica. Com isso, ao longo da vida do CAP no pavimento, ele vai gradativamente aumentando a quantidade de asfaltenos e na mesma proporção, diminuindo a quantidade de maltenos. Isto leva o CAP a um endurecimento gradativo, já que o equilíbrio coloidal está permanentemente se deslocando no sentido do aumento das propriedades GEL o inverso do que se mostra na figura 4, e como consequência, o CAP vai ficando com a susceptibilidade térmica cada vez menor. Isto significa que um CAP pode apresentar uma susceptibilidade térmica dentro da faixa desejada, e logo após a usinagem (quando ocorre o maior grau de envelhecimento do CAP), ir para a pista com esta susceptibilidade completamente fora da faixa desejada e/ou especificada. Por essa razão, torna-se necessário adquirir um profundo conhecimento da susceptibilidade térmica do CAP, principalmente, da forma como ela se altera durante o processo de usinagem assim como ao longo da sua vida útil.

2.1.5.1 - Visco-elasticidade Linear

A análise da ação do tráfego de veículos sobre os pavimentos asfálticos é complexa, porque tem que levar em conta dois aspectos de fundamental importância:

- a) O carregamento devido ao tráfego pode ser de natureza dinâmica (ou de curta duração) e estática (ou de longa duração).
- b) Devido à presença de material asfáltico, na composição do concreto asfáltico, este apresenta características termoplásticas, de modo que, a temperatura de serviço intervém diretamente na resposta mecânica desse material, diante da ação de cargas.

Assim, o tempo de duração de carga e a temperatura em que o pavimento se encontra são fatores que influem diretamente nas relações constitutivas das camadas asfálticas dos pavimentos (COELHO; SÓRIA 1995).

Por essa razão, segundo Chamecki (1961) apud (COELHO; SÓRIA 1995), os pavimentos asfálticos têm sido considerados como materiais de comportamento elasto-viscoplástico, sendo aceitável a aplicação da hipótese elástico-linear, quando o tempo de duração do carregamento for relativamente baixo e a temperatura de serviço do pavimento for relativamente baixa (inferior a 25°C), pois quando a temperatura de serviço do pavimento for relativamente alta, a parcela elástica das deformações torna-se desprezível, principalmente sob a ação de cargas estáticas ou de longa duração.

Segundo Lu e Isacsson (1997), o conceito de viscosidade foi usado primeiramente por Isaac Newton em "PRINCIPIA", publicada em 1687, e é sinônimo de atrito interno como medida da resistência ao fluxo. A força por unidade de área (τ) requerida para produzir movimento é proporcional ao gradiente de velocidade (dy/dt). A constante de proporcionalidade η é chamada de coeficiente de viscosidade:

$$\tau = \eta \rho (dy/dt) \quad (1)$$

Um fluido é dito Newtoniano se a viscosidade não depende do gradiente de velocidade.

2.1.5.2 – Modelos Básicos para Visco-Elasticidade

“Os modelos básicos usados na visco-elasticidade são a mola ou elemento de Hooke e o amortecedor ou elemento de Newton, que representam respectivamente as propriedades fundamentais da elasticidade e da viscosidade” (MONTEIRO, 1984). Na figura 9 mostra-se o elemento de Hooke e o elemento de Newton, onde uma tensão normal aplicada.

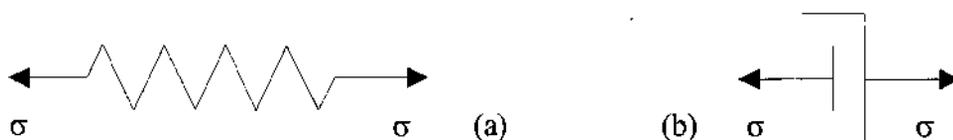


FIGURA 9 - Elemento de Hooke (a) e Elemento de Newton (b)

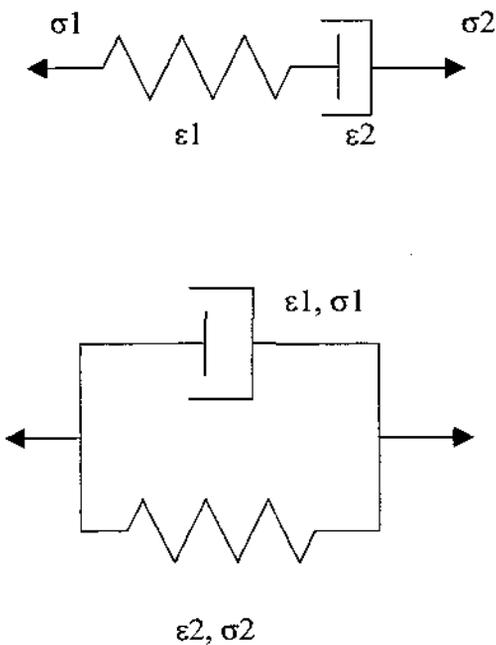
Segundo Monteiro (1984), mediante a associação destes elementos simples, em série ou em paralelo, são criados modelos mais complexos que procuram reproduzir a dependência da deformação em relação ao tempo, que caracteriza o comportamento visco-elástico. Ainda segundo o mesmo autor, a rigor, os modelos mecânicos representam os modelos matemáticos em que são enquadradas as idealizações de comportamento, fornecendo apenas uma descrição do comportamento fenomenológico, nada dizendo a respeito do mecanismo molecular ou estrutural da resposta visco-elástica, e como as leis da elasticidade e da viscosidade por simplicidade são lineares, os materiais resultantes de sua associação se encontram enquadrados na visco-elasticidade linear.

2.1.5.3 - Materiais Visco-elásticos simples

Segundo Monteiro (1984), um elemento de Hooke e um elemento de Newton, associados em série, constituem o líquido de Maxwell, criado para explicar a elasticidade dos líquidos. A associação em paralelo produz o sólido de Kelvin, criado para explicar o fenômeno do

amortecimento das oscilações devido ao chamado atrito interno nos sólidos. Usados em novas associações para composição de modelos mais complexos são chamados de elemento de Maxwell e elemento de Kelvin. Cada um deles possui características que estarão presentes nos modelos mais complexos, tais como, fluência, relaxação, elasticidade imediata, elasticidade retardada, escoamento viscoso ilimitado, e outros.

Na figura 10 estão representados o líquido de Maxwell e o sólido de Kelvin. Em série implica admitir-se que a deformação do material (ϵ) é, a cada instante, a soma da deformação de duas parcelas, uma de natureza elástica e a outra viscosa. A associação em paralelo pressupõe que as deformações dos dois elementos sejam idênticas sendo a tensão (σ) definida em duas partes, uma das quais é suportada pelo elemento elástico e a outra pelo elemento viscoso.



Líquido de Maxwell

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (2.2)$$

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (2.3)$$

Sólido de Kelvin

$$\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2 \quad (2.4)$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.5)$$

FIGURA 10 - Líquido de Maxwell e Sólido de Kelvin

O ensaio padrão para os dois modelos, consiste basicamente de duas etapas, uma chamada de fluência onde aplica-se instantaneamente uma carga constante e observa-se como ocorreu a deformação ($t_1 \geq \text{tempo} > 0$) e uma outra etapa chamada de recuperação onde é retirada a carga ($\text{tempo} > t_1$) observando-se também o que acontece com a deformação.

Na figura 11 estão representadas as curvas de fluência e de recuperação do líquido de Maxwell e do sólido de Kelvin, onde σ é a tensão, ϵ a deformação, E o módulo de elasticidade e F o coeficiente de viscosidade.

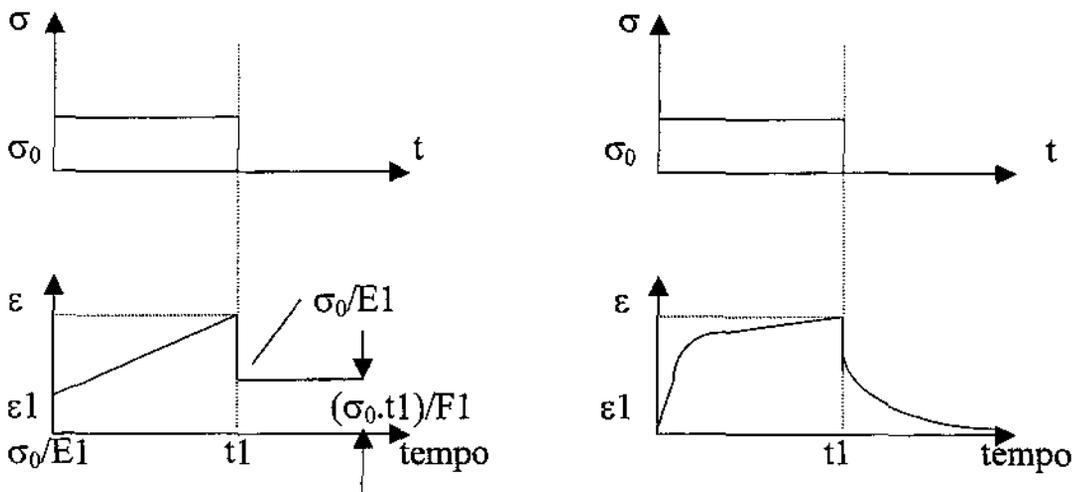


FIGURA 11 - Curvas de fluência e de recuperação do Líquido de Maxwell e do Sólido de Kelvin

2.1.5.4 - Modelos Complexos

Segundo Gontijo (1980), as propriedades elásticas e viscosas de uma mistura betuminosa dependem da velocidade de aplicação da carga e da temperatura, e portanto, as variações de seu estado físico representam um fenômeno complexo que não pode ser expresso por uma função simples.

O asfalto é considerado, muitas vezes, como sólido elástico, mas a longo prazo, seu comportamento é típico dos líquidos, como possui elasticidade dos dois tipos, a imediata e a retardada, torna-se necessário refinar o modelo que o represente melhor, introduzindo sucessivamente elementos que expliquem as diversas características: resposta elástica; fluência; relaxação ou recuperação da fluência e elasticidade retardada.

O modelo reológico de Burger é aceito como um modelo que caracteriza satisfatoriamente os asfaltos, pois, contém os elementos elástico, viscoso e visco-elástico, como é mostrado na figura 12.

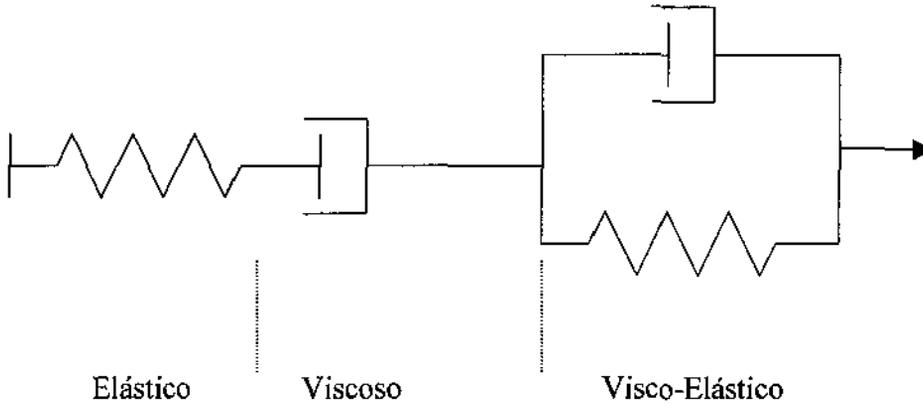


FIGURA 12 - Modelo Reológico de Burger.

Na figura 13 é mostrado a curva de fluência e de recuperação do modelo reológico de Burger, onde σ é a tensão, ϵ a deformação, E o módulo de elasticidade e F o coeficiente de viscosidade.

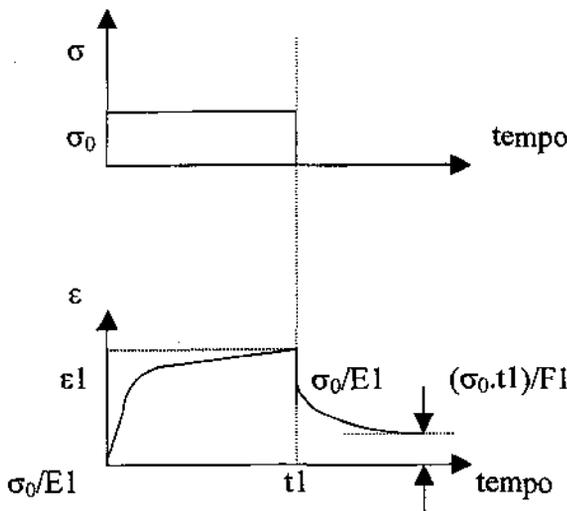


FIGURA 13 - Curva de fluência e de recuperação do modelo reológico de Burger.

Gontijo (1980) afirma, que, mesmo que os modelos analógicos sejam bastante úteis para uma melhor compreensão do comportamento do material, sobretudo por separar claramente

à parte da deformação devida à elasticidade instantânea, à elasticidade retardada e ao escoamento viscoso, pode-se dizer que eles não fornecem idéias sobre o comportamento macroscópico do material, não dando um esclarecimento sobre o espectro molecular do fenômeno visco-elástico, ou seja, do mecanismo interno das deformações do corpo real. Segundo PERL et al (1993) apud Amaral (2000, p. 21), em uma série repetida de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática seguido de ensaios de recuperação, ambos os testes com tempo de duração igual e temperatura constante em $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$, em misturas betuminosas do tipo areia asfáltica, chegou à conclusão que a deformação total sofrida pelo corpo-de-prova pode ser separada em quatro componentes: deformação elástica, plástica, visco-elástica e visco-plástica. Em seus ensaios, esses quatro componentes foram analisados em relação ao nível de tensão, ao tempo e ao número de ensaios, obtendo as seguintes conclusões:

- 1) A deformação elástica depende unicamente e de forma linear da tensão, independente do número de ensaios realizados repetidamente, sendo recuperável e independente do tempo;
- 2) A deformação plástica é linearmente proporcional à tensão e possui uma grande dependência com o número de ensaios realizados repetidamente, sendo não-recuperável e independente do tempo;
- 3) A deformação visco-elástica não é linearmente proporcional à tensão, dependendo fortemente do tempo, sendo recuperável;
- 4) A deformação visco-plástica não é linearmente proporcional à tensão, mas é fortemente ligada ao tempo e ao número de ensaios realizados repetidamente, sendo não-recuperável e dependente do tempo.

Sendo assim, segundo Coelho (1995), devido à separação em quatro componentes, dependendo das circunstâncias de solicitação, o modelo mais adequado para interpretar o comportamento mecânico dos concretos asfálticos, quando sujeitos à ação de cargas externas é o modelo viscoelástico ou então o modelo viscoplástico. Vale ressaltar a relação entre composição química e propriedades físicas feita por Maciel (2003), cujos Saturados tem influência rejeitiva na suscetibilidade térmica. Em alta concentração, amolecem o produto; os Aromáticos agem como plastificantes, contribuindo para a melhoria de suas propriedades físicas; as Resinas têm influência negativa na suscetibilidade térmica, mas contribuem na melhora da ductibilidade e dispersão dos asfaltenos; os Asfaltenos contribuem para a melhoria de suscetibilidade térmica e o aumento da viscosidade. A destilação do CAP, concentra os asfaltenos e removem os saturados (componentes leves). A soproagem aumenta os asfaltenos e diminui os aromáticos. O aumento de temperatura quebra as duplas ligações interatômicas que mantém associados os asfaltenos, modificando-lhes tamanho e forma, e reduzindo a viscosidade do CAP. O comportamento não-newtoniano do CAP no resfriar-se é consequência das atrações inter e intra-moleculares entre asfaltenos e outros compostos.

Ainda segundo o mesmo autor, as transições de fase do CAP se dão devido os cimentos asfálticos serem constituídos por macromoléculas e em analogia aos polímeros sintéticos, também apresentam transições de fase, que se correlacionam ao seu desempenho como ligante rodoviário. Ensaio em calorimetria diferencial de varredura – DSC em cimento asfálticos de petróleo, permitem a visualização de temperatura de transição vítrea e teor de frações cristalizáveis. Temperatura de transição vítrea – T_g é a temperatura na qual o espaço entre as moléculas para movimento browniano está tão reduzido que apenas segmento de cadeias se movimentem. O termo volume livre é utilizado para descrever o espaço ocupado pelo vazio, e é pequena em T_g , mas cresce abruptamente após a T_g . Esta temperatura tem correlação com ponto de ruptura Fraas de especificação alemã de cimentos asfálticos e com o módulo de rigidez determinado no reômetro de fluência. E frações cristalizáveis representam parte dos compostos saturados que cristalizam durante o resfriamento.

2.1.5.5 - Visco-elasticidade de asfaltos modificados por polímeros

Segundo ROWE et al (1995), um asfalto modificado por polímero apresenta características diferentes em relação ao asfalto convencional, particularmente com relação à sua recuperação elástica a elevadas temperaturas, podendo este comportamento ser reproduzido usando-se um modelo reológico, como o de Burger, o qual contém elementos elástico, viscoso e visco-elástico. A deformação associada com o elemento visco-elástico, o elemento de Kelvin, é completamente recuperado em um tempo infinito, sendo que a introdução de polímeros nos materiais asfálticos, aumenta a proporção de deformação que é recuperável depois do carregamento (deformação elástica) e reduz a associada com o elemento viscoso (deformação plástica).

2.2 - MODIFICADORES DE ASFALTO

2.2.1 - Introdução

O asfalto tem sido usado na construção de pavimentos flexíveis há mais de um século. As diversas origens do petróleo cru e os diversos tipos de processos de refinamento do petróleo levam a uma extrema complexidade na composição química e na reologia do asfalto. Devido ao grande número de asfaltos variando amplamente em polaridade e peso molecular nenhuma especificação da composição e da estrutura do asfalto é usada hoje. Além disso, o seu comportamento reológico é também muito complexo, variando de puramente viscoso até elástico, dependendo do tempo de carregamento e da temperatura. Como material viscoelástico, o asfalto tem uma grande importância na determinação de muitos aspectos na *performance* de uma rodovia. Por exemplo, uma mistura betuminosa necessita ser flexível o suficiente em temperaturas de serviço baixas para prevenir as trincas térmicas no pavimento e ser também rígida o bastante em temperaturas de serviço altas para resistir à deformação permanente. Essas propriedades funcionais são necessárias para que o pavimento seja capaz de agüentar o crescimento dos carregamentos devido ao tráfego nas diversas variações climáticas. Infelizmente, as misturas betuminosas com asfalto convencional nem sempre tem tido uma *performance* desejável. Na tentativa de aperfeiçoar as propriedades dos asfaltos, alguns tipos de modificadores têm sido investigados. Dentre eles estão incluídos os aditivos, os polímeros e os reagentes químicos. A utilização de asfaltos modificados por polímeros não é recente, mas o interesse por esta técnica cresceu consideravelmente durante a última década devido

ao aumento na exigência de uma *boa performance dos* pavimentos asfálticos. Apesar do grande número de produtos modificadores, existem apenas alguns tipos que são adequados como modificadores de asfalto. Os polímeros, quando usados como modificadores, são compatíveis com o asfalto, resistem à degradação em temperaturas comumente usadas nas misturas asfálticas e possuem preços acessíveis. O sucesso da modificação depende das características do asfalto usado, do tipo e quantidade de polímero, bem como do processo usado na preparação desses asfaltos modificados. (ISACSSON; LU, 1999) apud Amaral (2000, p. 22-23).

2.2.2 - Principais Modificadores de Asfalto

As experiências misturando materiais betuminosos com polímeros com o objetivo de melhorar a *eficiência* e desses asfaltos não é recente. Em 1823, T. Hancock, foi quem primeiro combinou asfalto de alcatrão com borracha natural, na fabricação de material impermeável para embarcações de madeira. Em 1844, E.E. Cassell misturou pela primeira vez, material betuminoso com borracha natural em construções rodoviárias. Em 1901, começaram as aplicações práticas dos asfaltos modificados quando a *Société du Pavage en Asphait Caoutchoute* foi criada na França. Em 1902, em Cannes, foi construída a primeira rodovia usando asfalto modificado. Todas as modificações nos asfaltos, antes da Segunda Guerra Mundial, foram feitas com borracha natural, devido ser o único material adequadamente avaliado até então. Os relatos quanto à *eficiência* da rodovia foram positivos e, com o desenvolvimento dos materiais sintéticos macromoleculares depois da Segunda Guerra Mundial, uma linha inteira de novos materiais com o potencial de serem usados como modificadores de asfalto foi avaliada. A razão para combinar o asfalto com determinados polímeros é prevenir avarias prematuras no pavimento e desse modo aumentar a vida em serviço do pavimento. A função básica dos polímeros é reduzir a consistência e a susceptibilidade térmica do asfalto e por esse motivo aumentar sua resistência a deformação permanente em temperaturas altas de serviço enquanto impede fissuras em baixas temperaturas de serviço. O polímero também melhora o comportamento elástico do asfalto e assim ainda contribui para a sua resistência a deformação permanente e às trincas por fadiga. O polímero pode contribuir também para uma melhor adesão entre agregados e asfalto, diminuir a abrasão e melhora a resistência à oxidação (ZANZOTTO; KENNEPOHL, 1996) apud Amaral (2000, p. 23-24).

Segundo o DNER (1998) apud Amaral (2000, p. 24), os polímeros pertencem a uma importante categoria de materiais de construção, usados desde tempos imemoriais: os materiais orgânicos. Os conceitos de macromoléculas e de polímeros são bastantes semelhantes. O termo polímero foi criado por Berzelius, em 1832, para designar compostos de pesos moleculares múltiplos, pois o termo isômero já era utilizado para designar compostos de mesmo peso molecular. Atualmente são considerados polímeros as moléculas relativamente grandes, em cuja estrutura se encontram repetidas unidades químicas simples. O termo macromoléculas engloba os compostos de elevado peso molecular, considerando tanto os compostos que apresentam unidades químicas repetidas (polímeros), quanto os compostos de estruturas moleculares mais complexas. Os polímeros são substâncias macromoleculares, que podem ser produzidas pela natureza (madeira, óleo lubrificante, cortiça, etc) ou podem ser obtidos artificialmente pela união seqüenciada de moléculas pequenas, chamadas monômeros. A variedade de polímeros produzidos pelo homem é muito grande, podendo-se inclusive, produzir diferentes produtos a partir do mesmo monômero, bastando para isso conduzir a reação em diferentes graus de polimerização. Os polímeros são classificados de inúmeras maneiras, de acordo com a finalidade classificatória; as principais são:

- a) Quanto à ocorrência: naturais e sintéticos;
- b) Quanto à preparação: adição e condensação;
- c) Quanto à cadeia: homogêneos e heterogêneos;
- d) Quanto à estrutura: lineares e tridimensionais;
- e) Industrial: elastômeros, plásticos e fibras.

A classificação mais citada e mais utilizada no meio rodoviário é a de Dismen, que classifica os polímeros em quatro grupos distintos:

- a) Termorrígidos: são aqueles que por ação do calor endurecem de forma irreversível. Voltando-se a aquecê-los, não amolecem mais; como exemplos: resina epóxi, poliuretano;

- b) Termoplásticos: são aqueles que por ação do calor amolecem de forma reversível, ou seja, amolecem quando aquecidos e endurecem quando resfriados. Como exemplos: EVA., polietileno, polipropileno atático, policloreto de vinila;
- c) Elastômeros: são aqueles que quando aquecidos se decompõem antes de amolecer, e apresentam propriedades elásticas que lembram a borracha natural. Como exemplos: SBR;
- d) Elastômero-termoplástico: são aqueles que ao serem aquecidos se comportam como termoplásticos, mas em temperaturas mais baixas apresentam propriedades elásticas. Como exemplo: o SBS;

Dentre todos os produtos já avaliados como modificadores de asfaltos, optou-se nessa pesquisa enfatizar o estudo do estireno-butadieno-estireno, conhecido pela sigla SBS., devido a este produto ser mais usado nas pesquisas Brasileiras.

2.2.2.1 – Borrachas

Segundo Zanzotto (1996), as experiências utilizando pedaços de borracha como modificadores de asfalto começaram em 1920, mas foi somente em 1960 que a mais recente e moderna tecnologia introduziu o processo de Charles McDonald. Desde então, foram desenvolvidos dois tipos de procedimentos, um processo seco e um processo úmido. A diferença entre eles é que no processo úmido a borracha é esfarelada e as partículas bem finas são adicionadas e misturadas ao asfalto, reagindo com ele. No processo seco são adicionados, grãos maiores de borracha diretamente à mistura betuminosa durante sua confecção, sendo que as partículas de borracha substituem parte dos agregados. Na França, em 1963, segundo Brûlé (1996), foram feitos trechos experimentais para a avaliação de asfaltos modificados, utilizando-se diferentes tipos de borrachas, tanto naturais como sintéticas. Entretanto, os resultados não foram considerados satisfatórios.

Segundo o IBP (1996), a utilização de elastômeros vulcanizados, inclusive o pó de borracha proveniente da reciclagem de pneumáticos como modificadores, apesar de mudarem significativamente as propriedades dos ligantes, gera misturas heterogêneas e a borracha

age mais como um filler flexível, além de ser de difícil dispersão requerendo altas temperaturas e grande tempo de digestão.

Constantino (1998), entretanto, afirmam que o látex de estireno-butadieno, o SBR na forma de borracha moída de pneu, pode ser uma opção interessante na melhoria das propriedades reológicas do asfalto, com uma marcante redução no impacto ambiental como solução para o descarte de pneumáticos.

2.2.2.2 - SBS - Estireno-butadieno-estireno

Segundo um dos maiores líderes de SBS (borracha sintética de estireno-butadieno-estireno) do mundo a empresa Shell depois vendida para Kraton Polymers (2006) informa que, esse polímero industrial SBS é um elastômero termoplástico que tem propriedades superiores às das borrachas convencionais e comportamento termoplástico, daí também o termo de borracha termoplástica. Os SBS são copolímeros tribloco, o usado nessa pesquisa é KRATON D1101 BT (Anexo I), constituídos de um bloco intermediário elastomérico (Butadieno) e um bloco termoplástico (Estireno) em cada extremidade figura 14, que são mutuamente incompatíveis, com tendência, portanto, a se separarem, isso se não fossem ligados quimicamente. Deste modo, apresentam forte interação com a base betuminosa por ser compatível tanto com os componentes aromáticos e quanto com os não aromáticos.

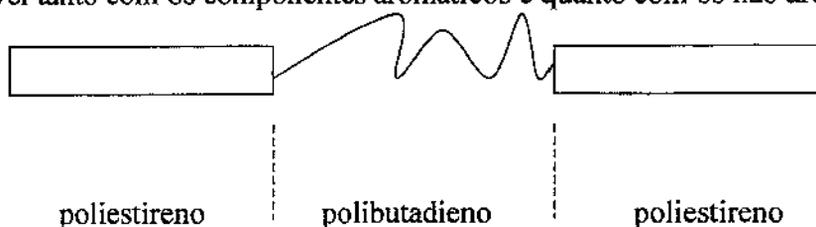


FIGURA 14 – Estrutura Química do SBS

Os blocos terminais de poliestireno se unem com outros blocos terminais de poliestireno formando os domínios. Os domínios formam os pontos de entrecruzamento físico de uma rede tridimensional de polibutadieno. Nessa rede figura 15, os blocos terminais – poliestireno – fornecem a resistência ao polímero e os blocos intermediários – polibutadieno – asseguram-lhe a sua excepcional elasticidade.

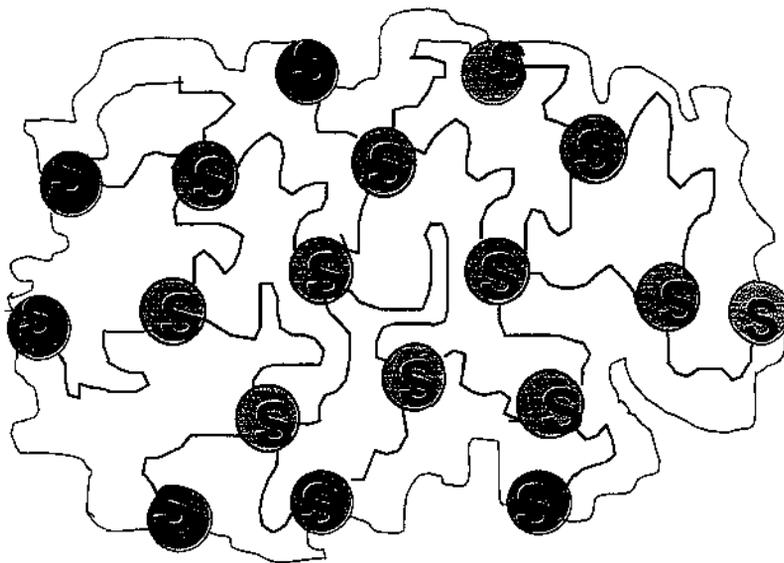


FIGURA 15 – Domínios de poliestireno (S) com seus ligamentos de polibutadieno.

Esses domínios de poliestireno quando aquecidos em torno de 100°C se fundem perdendo portando a resistência dada ao polímero, dando a possibilidade de misturar-se com o asfalto, enquanto os blocos de polibutadieno só se tornam rígido (vítreo) próximo a -90°C . Por isso o SBS é usado como modificador de asfalto tanto em locais onde as temperaturas são muito altas como em locais onde as temperaturas são muito baixas. Em locais onde as temperaturas são muito altas, que ultrapassam em muito o ponto de amolecimento do CAP puro, situação na qual ele se apresenta com fluxo quase que viscoso, o SBS forma uma malha que envolve o ligante fluido, mantendo alta consistência no sistema devido ao estado ainda sólido dos domínios estirênicos. Só a partir da fusão completa dos domínios estirênicos, é que a mistura CAP-SBS passa a ter fluxo viscoso. Nos locais onde as temperaturas são muito baixas, o CAP teria comportamento vítreo com trincamento correspondente. O SBS diminui bastante o ponto de ruptura Fraass da mistura, conferindo elasticidade até a temperaturas bem abaixo daquela correspondente à ruptura vítrea do CAP puro. Com a elevação do ponto de amolecimento e, ao mesmo tempo, com a diminuição do ponto de ruptura Fraass do CAP, a presença do elastômero termoplástico SBS no CAP aumenta bastante o seu intervalo de plasticidade, o que significa uma considerável diminuição da sua susceptibilidade térmica, que é a qualidade mais procurada em aditivos para o CAP. Quando o polímero é disperso no asfalto a quente, os domínios de poliestireno dissolvem-se, assumindo características termoplásticas, que facilitam as operações de

mistura e compactação. Ao resfriar, os blocos de poliestireno associam-se novamente, formando uma rede tridimensional dispersa numa matriz de polibutadieno conferindo propriedades de resistência e elasticidade à mistura.

Em pavimentos flexíveis, o ligante ideal deveria possuir propriedades constantes, ou seja, susceptibilidade térmica pequena em todas as variações climáticas a que estaria sujeito. Quando em temperaturas elevadas deveria tornar-se um fluido viscoso para que fossem possíveis a usinagem e a compactação das misturas betuminosas. Na realidade, entretanto, os asfaltos não reagem de uma maneira ideal, mas exibem uma contínua mudança de suas propriedades (viscosidade) em todas as temperaturas a que ficam sujeitos. Com a adição do polímero SBS, o ligante modificado pode apresentar-se, para certos intervalos de temperaturas, com as características de um ligante ideal. (LU, X.; ISACSSON, U. 1997).

Os copolímeros em bloco de estireno-butadieno-estireno - SBS são macromoléculas que combinam as propriedades termoplásticas e elastoméricas, sem necessidade de vulcanização e sua utilização, em larga escala nas últimas duas décadas, tem sido norteadas de excelentes resultados pois este sistema polimérico apresenta recuperação elástica e resistência mecânica à tração, propriedades essenciais para que o revestimento asfáltico permaneça resistente e flexível em toda a gama de tensões e temperaturas a que está sujeito. (IBP, 1996).

Segundo Pereira et al (1998) apud Amaral (2000):

...em estudos na Universidade do Minho, em Portugal, foram testados dois tipos de misturas betuminosas densas, uma com asfalto convencional e outra com asfalto modificado por polímero SBS visando aumentar a rigidez e a resistência a deformação permanente dos pavimentos flexíveis quando sujeitos a temperaturas elevadas no verão e bem como com o intuito de melhorar a resistência às trincas térmicas, desses pavimentos no inverno. Concluiu-se que o uso de asfalto modificado pelo polímero SBS foi mais expressivo em termos de melhora em relação a fadiga e que o tempo de serviço desses materiais pode chegar a 2,6 vezes em comparação com o asfalto convencional.

Conforme observou Khosla (1991), em estudos com o polímero “*carbon black*” e o estireno-butadieno-estireno - SBS, os efeitos dos modificadores nas propriedades das misturas asfálticas não foram significantes a baixas temperaturas, mas relevantes para temperaturas altas. A *eficiência* desses polímeros indica que o “*carbon black*” é mais apropriado em reduzir deformações permanentes, e que o SBS é melhor na redução de trincas por fadiga. O módulo de resiliência das misturas com os polímeros foi maior em temperaturas altas sem afetar os valores de módulo em temperaturas baixas.

Em nosso país, o uso de polímeros elastômeros termoplásticos tem como marco a pesquisa feita em 1988 pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem IPR/DNER, em escala de laboratório, ficando claro naquela ocasião a ótima *performance* de certos tipos de polímeros quando misturados com asfalto. (MARTINHO, 1994).

2.2.2.3 - E.V.A. - Etileno-acetato de vinila

Segundo Constantino (1998), o etileno-acetato de vinila - EVA é conhecido como um termoplástico ou plastômero, pois escoia irreversivelmente quando se aplicada uma tensão cisalhante; solubiliza-se nas frações saturadas do asfalto devido a sua natureza alifática e melhora as propriedades mecânicas do ligante, devido à existência de seqüências etilênicas de elevado peso molecular, modificando a reologia do material.

Segundo Freitas (1996), trata-se de uma resina termoplástica produzida pela copolimerização do etileno (eteno) com acetato de vinila em elevada pressão de reação. As características finais da mistura asfalto/EVA dependem do teor e tipo de EVA empregado. Os copolímeros de Etileno-Acetato de Vinila EVA como modificadores de ligantes, são muito utilizados em alguns países, destacando-se, por exemplo, a França e Espanha.

Segundo o IBP (1996), tem sido utilizado com sucesso sistema de asfalto/polímero com 5% de EVA na pavimentação rodoviária.

3 - ASFALTO MODIFICADO

3.1 - Introdução

O mecanismo de trabalho do sistema coloidal CAP na camada de revestimento de um pavimento flexível, dá-se da seguinte maneira:

O CAP liquefeito envolve as partículas dos agregados, formando uma película, que ao se resfriar, após a compactação, volta a ter comportamento plástico. Quando o revestimento é solicitado, e sofre deflexão, há uma compressão do esqueleto mineral que aumenta o atrito interno da camada, que reage à aplicação da carga. Na formação da bacia de deflexão, aparecem zonas onde o ligante asfáltico fica altamente tracionado, especialmente nas fibras inferiores, e zonas onde o ligante é comprimido. Entretanto, o ligante é um sistema coloidal constituído de micelas sólidas dispersas num meio intermicelar líquido, que apesar da aparência de sistema sólido à baixas temperaturas, o CAP é um sistema solidificado com meio de dispersão no estado líquido. A forma de estruturação é que gera o aspecto sólido, mas o CAP só é um sistema sólido abaixo do ponto de ruptura Fraass, quando o meio intermicelar também solidifica. Dessa forma, tanto nas zonas de tração quanto nas zonas de compressão, o CAP sofre um fluxo plástico, havendo um escorregamento de micelas, umas em relação às outras. Após a retirada da carga, ou a passagem da aplicação dela para o ponto seguinte, ocorre a distensão do esqueleto mineral comprimido, o que obriga a que o CAP sofra um fluxo plástico em sentido oposto ao sofrido no ato da aplicação da carga. É claro que nesse fluxo plástico em sentido oposto, ocorre um escorregamento das micelas no sentido de sua posição original. Nesse fluxo plástico oposto, as micelas não retornam à sua posição original, havendo sempre uma deformação residual permanente, embora muito pequena, da ordem de 10^{-8} m. Na sucessão de aplicações dessas cargas, há um sucessivo deslocamento residual das micelas, enfraquecendo cada vez mais o ligante naquele ponto. Esse efeito é acumulativo e leva a que, após determinado número de aplicações de carga e seu correspondente deslocamento micelar residual, as fibras inferiores se tornem tão fracas que na próxima aplicação da carga elas se rompem. Com isso, há uma diminuição da resistência da camada à próxima aplicação da carga, o que gera uma deflexão maior que a anterior, causando o rompimento de novas fibras, já enfraquecidas, refletindo gradativamente essas trincas até a superfície. O trincamento na face inferior da camada se dá exclusivamente no ligante asfáltico, assim como a reflexão dessas trincas até a superfície da camada. À medida que as trincas aumentam, diminui a resistência da camada e aumenta bastante a deflexão, gerando novas trincas com maior rapidez até sua interligação, no

chamado couro de crocodilo, que indica o término da vida do pavimento. A deformabilidade do pavimento e seu correspondente deslocamento residual não são sempre o mesmo; ele é função do tipo da CAP, de sua susceptibilidade térmica, e da temperatura em que está ocorrendo. (DNER, 1998 apud Amaral, 2000).

Segundo Martinho (1994), o sistema modificado aumenta a probabilidade de retorno dessas micelas a sua posição original, acarretando uma maior vida útil do pavimento, devido ao fato de que o polímero envolve o CAP num sistema de molas e estas ao se esticarem oferecem maior resistência à deformação e quando cessado a ação das cargas o retorno das micelas à sua posição original é favorecido.

O polímero mais utilizado no Brasil é o SBS, produzido no Brasil e usado no Betuflex B 65/60 ficha técnica Anexo II, da Ipiranga Asfaltos S.A, conforme especificação da DNER Anexo III.

Na figura 16 vemos o misturador de laboratório de asfalto com polímero.

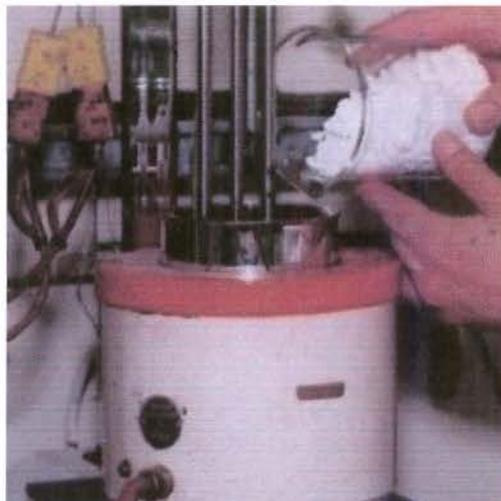


FIGURA 16 – Misturador de Laboratório de Asfalto com Polímero.

Segundo Martinho (1994), os asfaltos modificados, em especial com o polímero SBS, quando em temperaturas altas, superiores ao seu ponto de fusão, comportam-se como plásticos podendo ser moldados e após sua fusão, quando de seu resfriamento são devolvidas suas propriedades elásticas.

Lu e Isacson (1997), em estudos com asfaltos modificados por polímero SBS, observaram que o polímero SBS fez aumentar a elasticidade dos asfaltos em altas temperaturas e

aprimorou a flexibilidade dos mesmos a baixas temperaturas. Concluíram deste modo, que essas melhorias nas propriedades do asfalto alertam para um aumento na resistência às deformações permanentes nas trilhas de roda nas altas temperaturas e às trincas nas baixas temperaturas.

Segundo Freitas (1996), os desempenhos dos produtos tradicionais e seus processos de aplicação em técnicas rodoviárias acham-se às vezes limitados. Para melhorá-los, um dos caminhos que estão sendo desenvolvidos é o de incorporar polímeros, modificando assim, segundo a aplicação, uma ou mais das suas propriedades.

3.2 – Propriedades

Segundo Freitas (1996), os polímeros modificam uma ou mais das seguintes propriedades:

- a) Susceptibilidade térmica, que caracteriza a variação da consistência, em função da temperatura. A incorporação de polímero tem geralmente por finalidade a redução dessa susceptibilidade, ampliando a faixa que separa a fragilidade a frio do amolecimento a quente.
- b) Coesão, que é definida como a energia necessária para romper uma película de ligante. Varia em função da temperatura, passando por um máximo. A finalidade da modificação com polímero é o aumento da coesão e/ou "faixa de coesão" conseguindo assim, uma consistência satisfatória em toda a faixa de temperatura de serviços.
- c) Elasticidade, que é caracterizada como a deformação causada sob efeito do tráfego e das variações de temperatura. A elasticidade é a aptidão para suportar essa deformação de modo reversível sem rompimento. A finalidade da incorporação de polímero é de acentuar a elasticidade e mantê-la na faixa mais ampla das temperaturas de utilização.
- d) Resistência à fadiga, que é a propriedade que os materiais têm de resistir quando solicitados de forma repetida, entretanto tendem a consumir progressivamente essa resistência. A incorporação de polímero visa aumentar essa resistência, sobretudo à baixas temperaturas.

Segundo o mesmo autor, o SBS por ser termoplástico, permite que o ligante CAP-SBS

possa fluir a altas temperaturas, em virtude da fusão dos domínios estirênicos, e a temperaturas muito baixas, impede que o ligante se torne quebradiço em virtude da presença das molas butadiênicas. Na realidade, o que ocorre é que o polímero faz com que o CAP-SBS tenha uma susceptibilidade térmica mais baixa que a do ligante convencional. A presença do SBS na estrutura do CAP diminui as contrações nos efeitos negativos causados pela oxidação do CAP ou seja pela diminuição dos maltenos ao longo do tempo que produzem o processo de envelhecimento do CAP, levando o pavimento a perder a capacidade de deflectir, levando-o ao trincamento.

Segundo Motta et al (1993), o endurecimento do ligante asfáltico está associado a dois tipos de fenômenos:

- perda de componentes voláteis durante o aquecimento na fase de construção, que seria um envelhecimento de curto tempo;
- e à oxidação progressiva no campo principalmente na superfície exposta às intempéries e ao longo das trincas, que ocorre a longo tempo.

Segundo Pradhan (1993) apud Amaral (2000), o Departamento de Transportes de Montana, nos Estados Unidos, juntamente com a Universidade Estadual de Montana, pesquisaram quatro amostras de asfalto de mesma penetração, de diferentes origens e processos de refinamento. Cada amostra foi modificada com seis diferentes tipos de modificadores, um polietileno - PE, dois tipos de estireno-butadieno-estireno - SBS, um *carbon black* - CB, um tipo de etileno-acetato de vinila - EVA e um látex de estireno-butadieno - SBR. Os agregados usados nas misturas foram o seixo britado (graúdo e miúdo) e areia fina natural. Os resultados mostraram que os modificadores reduziram a susceptibilidade térmica de todas as amostras de asfalto, entretanto não de forma igual, verificando-se na ocasião que o efeito dos modificadores nos asfaltos depende da origem desses asfaltos. Os modificadores SBS, CB, EVA e PE tiveram bons resultados com as diferentes amostras de asfalto no sistema subjetivo de peso adotado na pesquisa, indicando que houve mudança nas propriedades físicas relacionadas a deformação permanente. Os polímeros SBS e EVA foram selecionados para uma pista experimental numa rodovia interestadual de Montana.

A adição de teores crescentes de SBS no CAP proporciona alterações nas propriedades fundamentais dos ligantes rodoviários:

- a) Aumento do ponto de amolecimento com aumento do teor de SBS, conforme figura 17.

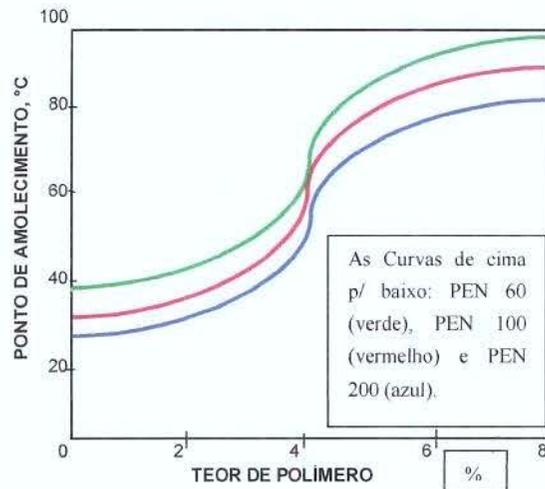


FIGURA 17 – Variação do ponto de amolecimento com o teor de SBS (%).

- b) Redução de penetração, conforme figura 18.

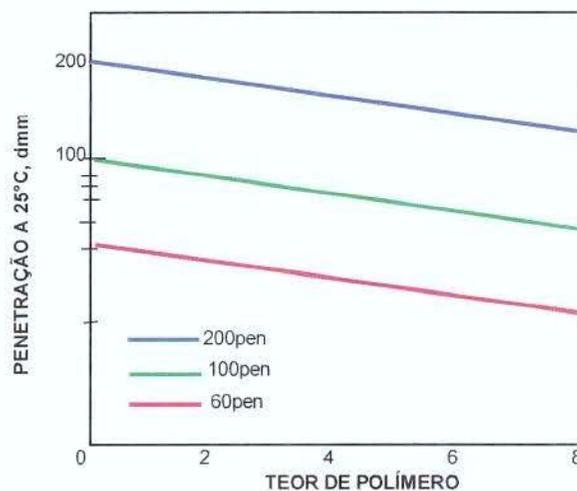


FIGURA 18 – Variação da penetração com teor de SBS (%).

c) Aumento da ductibilidade a temperaturas inferiores a 15°C.

d) Aumento da recuperação elástica (retorno elástico), conforme figura 19.

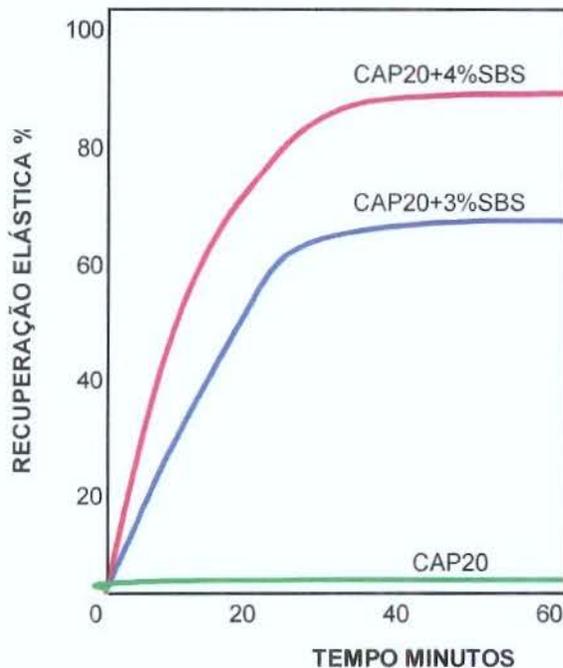


FIGURA 19 – Variação do retorno elástico com teor de SBS.

3.3 - Experiências em Campo

a) No Brasil os estudos citados pelo DNER(1998) apud Amaral (2000), referentes ao asfalto-polímero foram iniciados em 1968 com a utilização de látex SBR. Posteriormente foram executados estudos e trechos experimentais utilizando vários materiais, contudo, sem o monitoramento adequado, e mencionados a seguir:

- 1969 - trechos com látex, nas ruas internas da Petroflex;
- 1976 - trechos com látex, em Belford Roxo;
- Década de 70 - Ponte Rio-Niterói, com asfalto-epoxi;

- Via Dutra, com asfalto epoxi;

- 1982 - Ponte Rio-Niterói, lama asfáltica com SBR;
- 1983 - trecho na Rio-Petrópolis, com Petrolatex S-62; trecho na RJ-104, com látex; pista externa da Praia de Copacabana;
- 1984 - Aeroporto Santos Dumont, com SBR, nas juntas de dilatação; Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, com SBR, nas pistas auxiliares;
- 1988/1990 - estudo de asfalto modificado por polímero realizado pelo IPR;
- 1990 - trecho experimental com mistura densa e drenante na Rua Leopoldo Bulhões, com SBS e EVA, construído no estudo realizado pelo IPR;
- 1992 - trecho na Rodovia dos Bandeirantes, com SBS (Betuflex);
- 1993 - trecho na PE-75 (Pernambuco) com SBS; trecho no Estado do Paraná, em corredores de ônibus;
- 1994 - trecho na PE-74 (Pernambuco) com SBS;
- 1995 - Autódromo de Interlagos, nas curvas de Fórmula I; Autódromo de Jacarepaguá, com SBS, Fórmula I;
- 1996 - Autódromo de Jacarepaguá, com SBS, Fórmula Indy.

Além desses exemplos acima a Ipiranga Asfalto também destaca outras obras que utilizaram asfaltos modificados com polímeros, para pavimentos drenantes, Ipiranga (2006): Rodovia dos Imigrantes, Anchieta, Bandeirantes, Dutra, Cataratas/PR, Aeroporto Santos Dumont, e entre os asfaltos modificados com polímeros, mas não drenantes pode

citar-se: Ananguera, Castelo Branco, BR-116 (Rio - Teresópolis), BR-290 RS (Rod. Do Mercosul), Rod. Santos Dumont, Cabo Branco/PB, Iguatu/CE, Pitimbu/PB, Serra Talhada/PE, entre outros.

Segundo Ramos (1996) apud Amaral (2000), em 1990, o IPR-DNER juntamente com o DEPARTAMENTO GERAL DE VIAS URBANAS da SECRETARIA DE OBRAS do município do Rio de Janeiro construíram pistas experimentais, em trechos selecionados na Rua Leopoldo Bulhões, com massas asfálticas densas e drenantes empregando ligantes convencionais e polimerizados (EVA e SBS). Ao longo de seis anos foram retirados, anualmente, corpos-de-prova e determinados os módulos de resiliência, sendo executados também análises deflectométricas e levantamentos visuais dos trechos. Verificou-se que o trecho construído com o polímero SBS permanecia com a superfície de rolamento em estado perfeito, sem trincas ou fissuras e a deflexão característica manteve seu valor. Já os trechos construídos com asfalto convencional e modificado com EVA apresentavam trincas do tipo couro de crocodilo, buracos e deformações.

Segundo o mesmo autor, em 1996, quando da reforma do autódromo Nelson Piquet, na cidade do Rio de Janeiro, o revestimento asfáltico da pista, teve sua camada de rolamento feita com asfalto modificado por polímero SBS e a pintura de ligação entre a camada de regularização e a de rolamento foi executada com emulsão modificada com látex de SBS. Foram utilizados setenta e quatro toneladas de ligante modificado com polímero SBS e a pista em 1996, apresentava apenas alguns problemas de ondulações e ligeiros desníveis das juntas, devido a problemas de execução e não ao emprego do ligante modificado, não se verificando nenhum deslocamento de agregado.

b) No Exterior:

Segundo Brûlé (1996), na França, em 1972, as autoridades notificaram as companhias de petróleo e as construtoras de seu interesse em asfaltos modificados e também a execução de pistas experimentais, para teste dos ligantes a serem desenvolvidos. Essa iniciativa governamental resultou numa larga pesquisa com vários tipos de asfaltos modificados. O que podemos dizer foi o incentivo que fez com que vários países da Europa comesçassem a

pesquisar e aplicar essa tecnologia. Depois estes desenvolvimentos vieram a interessar também na América e outros continentes.

4 – PESQUISA SOBRE PAVIMENTOS DRENANTES

4.1 – Introdução

Esta parte do trabalho trata apenas de pavimentos drenantes com asfalto modificado com polímero SBS, pois já se viu anteriormente que outros tipos de pavimentos, ou seja, sem polímero, não tem a mesma vida útil dos pavimentos modificados com polímeros. Quanto mais se pensa em pavimentos drenantes, que tem sua parte de vazios muito superiores aos pavimentos convencionais, originando assim no pavimento uma fragilidade muito maior, se não for feito com um material de boa qualidade. Por isso ao se estudar um asfalto modificado com polímero SBS, implicitamente nesse tipo de asfalto tem que trazer um poder muito maior de adesão do agregado, fator importante para esse tipo de pavimento.

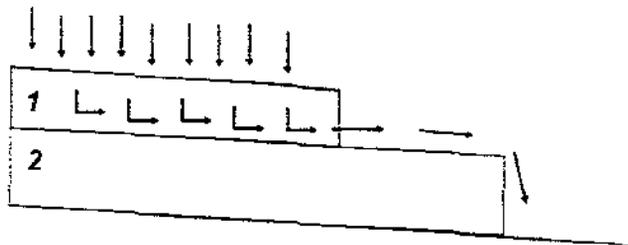


FIGURA 20 – Mistura Drenante (1) e Misturas Convencional Densa (2).

A camada de rolamento dos pavimentos asfálticos tem como uma de suas funções a impermeabilização do corpo da estrada figura 20. Mas a preocupação com a segurança do rolamento sobre pavimentos molhados e especialmente com o fenômeno de aquaplanagem, provocou, nos Estados Unidos da América na década de 30, o início de experiências com misturas betuminosas de graduação aberta. Mas só nos anos 50 começaram a aparecer alguns resultados, mas com espessuras pequenas (2 cm) de camadas asfálticas com graduação aberta e com 6 a 7% de betume, cuja função era de constituir verdadeiros tratamentos superficiais antiderrapantes. Nos anos 70, países da Europa e África do Sul, além do Japão, começaram a experimentar camadas de revestimento com capacidade de drenar a água superficial e retirá-la do pavimento com espessuras maiores (4 cm) e com 4 a

5% de betume, destacando-se, então, os estudos ingleses, holandeses e belgas.

Com o tráfego rodoviário mais intenso, pesado e veloz, a segurança desses veículos aparece com maior destaque, tanto sob o aspecto social, como o econômico. Pois o número de acidentes aumenta, principalmente à intensidade da chuva, quando ocorre um acúmulo de água, e a eficácia na eliminação dessa água superficial em pavimentos torna-se cada vez mais importante. A visualização de sinalização horizontal, a aderência dos pneus ao pavimento, e a eliminação do “spray” causado pelos próprios veículos, têm sido visto como parâmetros de serventia de via e qualidade do serviço oferecido ao usuário.

Para um projetista de pavimentos ele tem que considerar em seus estudos, a eliminação de água superficial e profundas que possam prejudicar a durabilidade da estrutura, a segurança do tráfego e o comportamento drenante do revestimento. Se a infiltração de água no pavimento é inconveniente, são desejáveis revestimentos impermeáveis. Contudo, é sabido que esses revestimentos apresentam certa permeabilidade, e são necessárias alternativas de drenagem para as águas que se infiltram, além da película superficial que impede o contato entre pneu e pavimento, é por isso que temos então que impermeabilizar com pavimentos com revestimentos asfálticos densos nas camadas inferiores e na camada de rolamento temos que ter pavimentos drenantes para que a água não fique retida na superfície. Usando então pavimentos drenantes que contenham ligantes modificados com polímero SBS, busca-se a melhoria da resistência à fadiga, maior adesividade ao agregado, maior resistência a ação da água e maior resistência á desagregação superficial.

4.2 – Custos com ligantes modificados com SBS.

Podemos dizer que qualquer tipo de projeto que se faça com asfalto modificado com polímero SBS pelos preços fornecidos pela DER – Departamento de Estradas de Rodagem da Secretaria de Transportes do Estado de São Paulo sempre custará mais caro. Segundo Maciel (2003), sabe-se que esses pavimentos ficam cerca de 1,79 vez mais caros que os convencionais, porém quanto que o governo não gasta com a saúde, devido os acidentes que aumenta muito em dias de chuva, com reparos das rodovias, pois com asfaltos modificados os reparos e gastos posteriores são muito menores. Portanto mesmo que fique mais caro nada paga as vidas humanas perdidas. Além disso, se adotarmos a postura dos ingleses, que diz, se os asfaltos modificados com SBS, duram duas vezes mais que o asfalto

convencional, podemos suportar um gasto inicial maior, mas que compensa em manutenção, acidentes por manutenção, combustível, perda de tempo.

4.3 – Permeabilidade de Pavimentos Drenantes

Segundo Porto (1999), tendo em vista que o comportamento drenante de um revestimento, sua capacidade de escoar água, avalia-se a permeabilidade da camada a fim de quantificar essa qualidade. A permeabilidade, por sua vez, depende dos caminhos disponíveis para a passagem da água constituídos pelos vazios comunicantes da mistura, ou seja, pelos espaços que se intercomunicam e permitem a saída da água. Esses vazios são decorrentes das características granulométricas da mistura e dos cuidados tomados durante a construção. Por outro lado, a vazão que a camada é capaz de escoar depende da espessura da própria camada, que é definida em projeto e depende apenas do bom controle na execução. O fluxo de água migra através dos vazios da mistura asfáltica, presumivelmente a uma velocidade em regime laminar.

4.4 - Durabilidade de Pavimentos Drenantes com SBS

A durabilidade de pavimentos drenantes só é possível se levarmos em conta alguns itens: uso de matérias primas de qualidade, como asfalto modificado com SBS, em trechos da rodovia que o esforço da superfície não é muito exigido, não pode ser usado em serras e curvas, segundo Porto (1999). Em sua experiência na Rodovia dos Bandeirantes (SP 348) foi construído um trecho tangente, em ligeira elevação, no que favoreceu a estabilidade da superfície. Devido o pavimento drenante ter mais de 25% de vazios, é extremamente importante que seu material seja muito bom, como asfalto modificado com polímero SBS, pois esse polímero forma uma malha tridimensional que ajuda a manter o asfalto unido e com elasticidade, além de ficar mais adesivo, o que é fundamental para que o agregado não se solte devido os vazios. Nesse trecho da Rodovia dos Bandeirantes esses mais de 25% de vazios foram diminuindo principalmente nos dois primeiros anos, com uma queda na permeabilidade da ordem de 15% a 50%, o ganho inicial de vazios se atenua, mas resulta um teor de vazios maior que o das composições clássicas, por isso os mais de 25% de vazios iniciais são extremamente importantes para que após alguns anos não venha a perder a finalidade de drenagem que gostaríamos.

4.5 – Discussão sobre Vantagens e Desvantagens de Pavimentos Drenantes

4.5.1 - Vantagens

Segundo Porto (1999) as vantagens desses revestimentos estão ligadas, principalmente, à melhoria nas condições de segurança e conforto na circulação de veículos.

A seguir são mencionadas algumas das características dos revestimentos drenantes que trazem incremento na segurança do tráfego:

1. Minimização da aquaplanagem;
2. Distâncias de frenagem reduzidas sobre pavimentos molhados;
3. Aumento da visibilidade, inclusive da sinalização, pela redução do “spray” de água formado pelos pneus figura 21;
4. Menor reflexão luminosa, tanto de dia como de noite, eliminando o efeito “espelho”, visualizando-se melhor os dispositivos de sinalização horizontal;
5. Rápida evacuação da água existente sobre a superfície de rolamento, diminuindo o tempo em que o pavimento fica molhado e as condições de desestruturação acelerada com a presença de água;
6. Redução do nível de ruído tanto para os usuários (ruído interno) quanto para vizinhos (ruído externos) originando pavimentos “silencioso”. Quando executado em duas camadas, há alguma vantagem acústicas oferecida pela camada delgada, promovida pela superfície porosidade de fina textura.



FIGUARA 21 – Comparação de Pavimentos Drenantes e Normais, cortesia de Colas France S.A., Kraton (2006).

4.5.2 - Desvantagens

Verifica-se que algumas das características dessas camadas drenantes podem ser consideradas inoportunas:

1. Aumento de acidentes devido ao conforto e segurança que esses pavimentos proporcionam, por motoristas imprudentes que ultrapassa o limite máximo de velocidade da rodovia;
2. Os custos dessas misturas drenantes são mais elevados que misturas convencionais, considerados o emprego de materiais de qualidade superior e de ligantes modificados com polímeros;
3. A permeabilidade dessa camada é reduzida através de um processo de colmatagem inevitável ao longo de sua vida, o que reduz as vantagens de emprego de revestimentos drenantes, e deve ser considerada quando estes sofrem restauração;
4. Não devem ser empregados em locais de frenagem e mudança brusca de velocidade devido a desagregação que ocorre pelo cisalhamento sofrido. Portanto, desaconselhável em ruas de serras;
5. Aumento da distancia de frenagem a seco;
6. Maior cuidado necessário na construção, se usado ligante modificado;
7. Maior desagregação superficial de misturas com alto teor de vazios (maior de 25%);
8. Onde há invernos rigorosos, há maior formação de gelo nos vazios do pavimento, dificultando a manutenção dessas pistas.

5 – TESTES REALIZADO EM ASFALTO MODIFICADO

A maior parte dos ensaios empregados para avaliar cimentos asfálticos são também usados para asfaltos modificados. Em alguns casos o procedimento requer modificação. Pode se dividir os testes na seguinte ordem:

- Análises Químicas;
- Testes Tradicionais;
- Testes Específicos;
- Testes Reológicos

5.1 – Análises Químicas

- Espectrofotometria de infravermelho é utilizada para quantificar o teor de polímero no asfalto modificado.
- Cromatografia por Permeação em Gel (GPC), permite separação de compostos de diferentes pesos moleculares como o polímero do asfalto.
- Calorimetria diferencial de varredura (DSC) determina a temperatura de transição vítrea e entalpia de dissolução das frações cristalizáveis, oriundas do CAP e/ou do Polímero. A temperatura de transição vítrea do SBS é aproximadamente $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ao adicionar polímero ocorre um abaixamento substancial de T_g .

5.2 – Testes Tradicionais

- Penetração, ensaio realizado geralmente a 25°C , na qual utiliza-se um banho termostático para climatização da amostra.

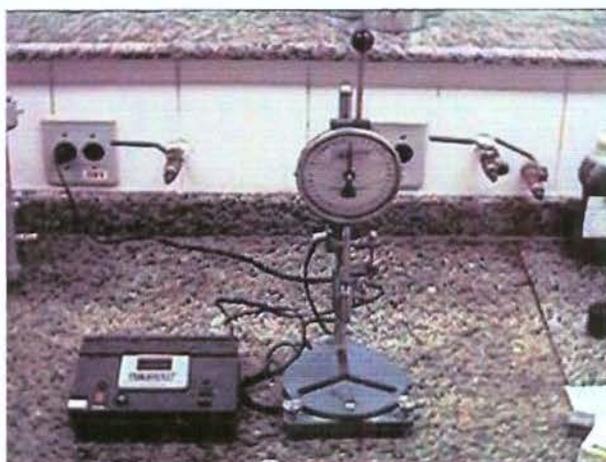


FIGURA 22 – Penetrômetro.

- Ponto de amolecimento, feito manualmente ou através do aparelho Ring and Ball.

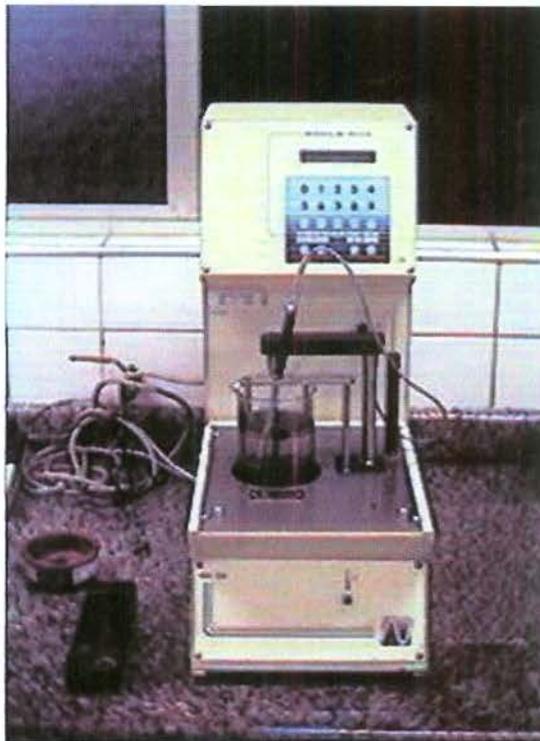


FIGURA 23 – Aparelho Ring and Ball.

- Índice de penetração, calculado através de cinco determinações de penetração a cinco diferentes temperaturas.
- Ductibilidade a 25°C feito no ductilômetro.



FIGURA 24 – Ductilômetro.

- Ponto de ruptura Fraass através de gráfico de Heulkelon.

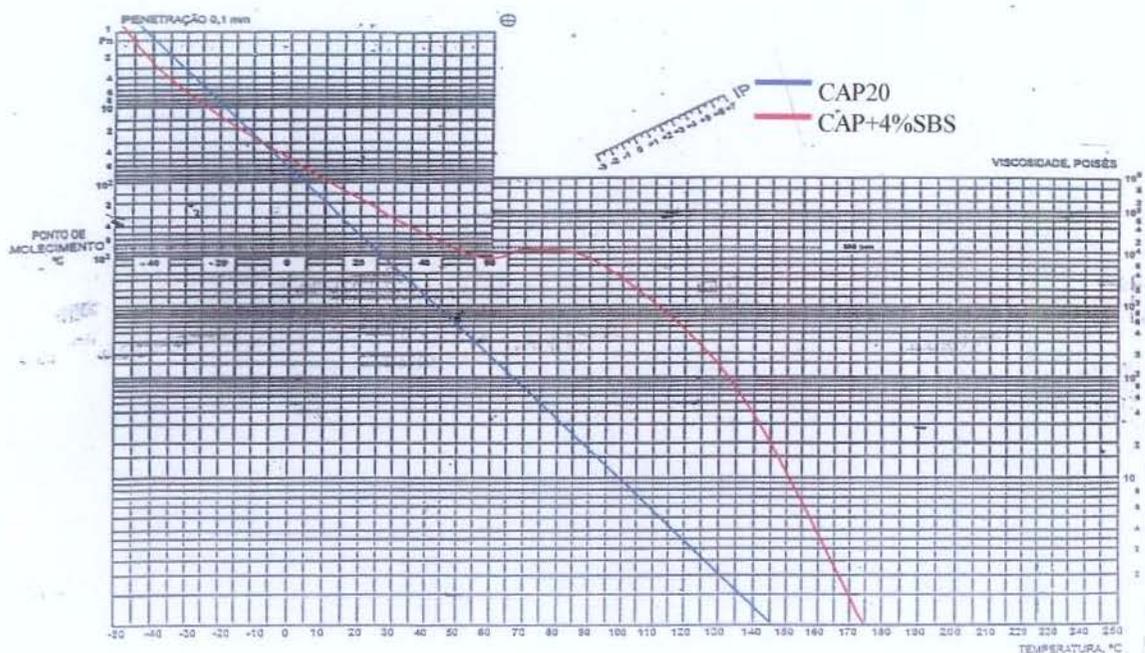


FIGURA 25 – Gráfico de Heulkelon, curva de asfalto modificado e o CAP.

- Envelhecimento através da estufa de efeito do calor e ar.



FIGURA 26 – Estufa de Efeito de calor e ar e parte interna.

5.3 – Testes Específicos

- Microscopia óptica por fluorescência: a fluorescência é a propriedade que possuem certos corpos, de transformar uma radiação recebida em radiação de maior comprimento de onda. Uma mistura asfalto/polímero excitada por uma luz azul intensa faz com que o polímero emita uma fluorescência de cor amarela, enquanto a fase rica em asfalto aparece de coloração escura.

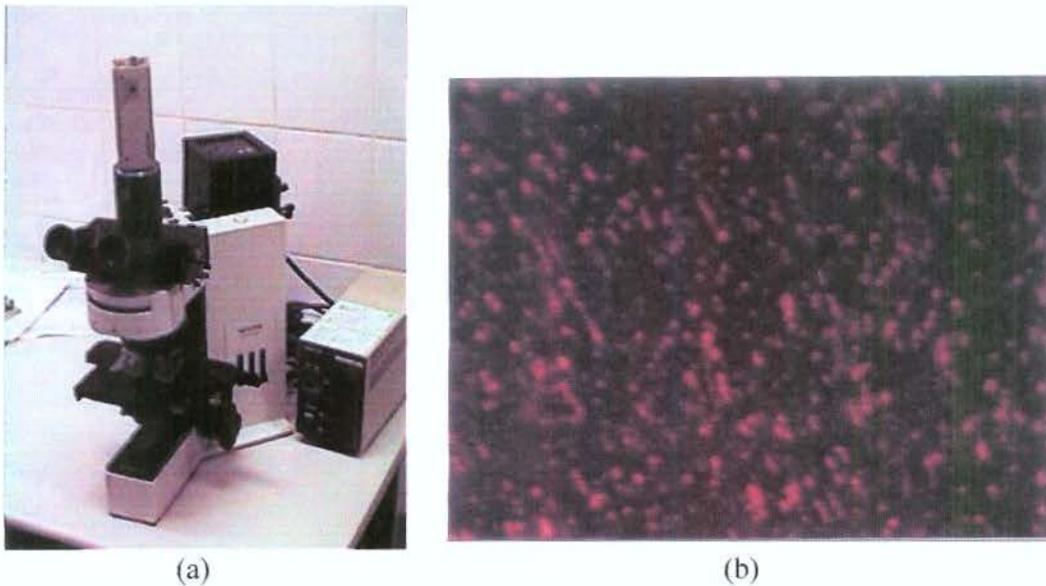


FIGURA 27 – (a) Microscópio óptico de fluorescência e (b) Micromorfologia de polímero disperso no CAP.

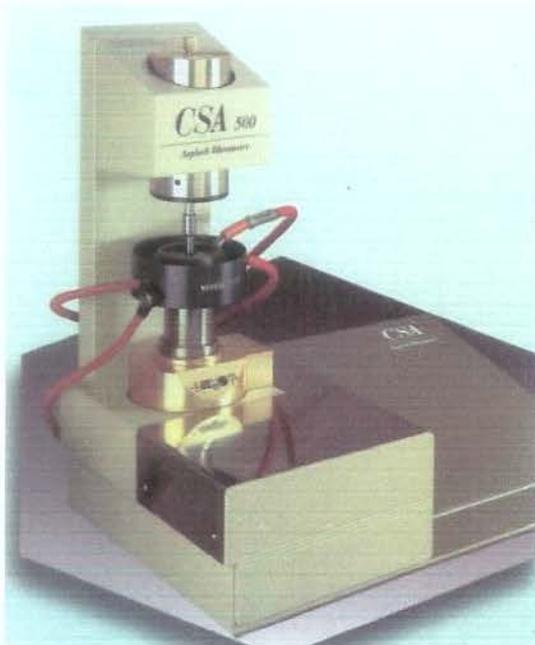
- Recuperação ou retorno elástico, feito em tração (ductilômetro) ou torção (torcímeter) a temperatura 10° C, 15° C, 25° C, com alongamento inicial de 20 ou 50 cm. Este ensaio mostra claramente o efeito do aumento do teor de SBS no asfalto, ou seja, quanto maior o teor de polímero, maior é a recuperação elástica.



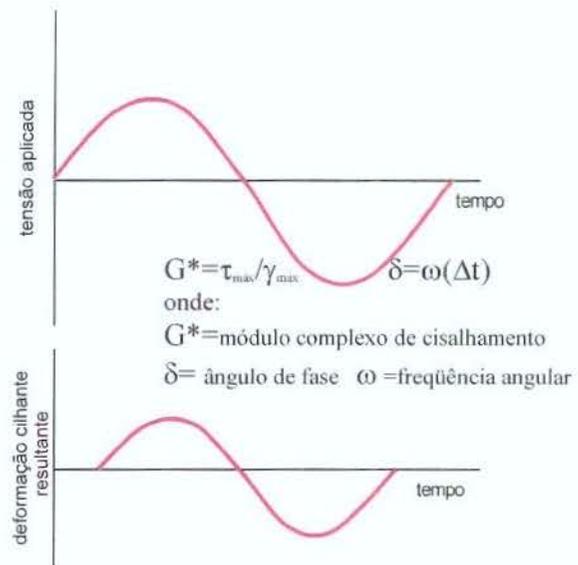
FIGURA 28 – Aparelho de recuperação elástica por torção.

5.4 – Testes Reológicos

O estudo de Whiteok (1990) mostrou que dentro do programa estratégico de Pesquisa Rodoviários (SHRP – Strategic Highway Research Program), desenvolvido nos Estados Unidos, no período de outubro de 1987 a março de 1993, foram realizados estudos de forma a especificar, testar e selecionar os materiais asfálticos. O cimento asfáltico é um material termosensível, pois apresenta ao mesmo tempo características elásticas, em temperaturas muito baixas, e viscosas, em temperaturas altas. Os ligantes asfálticos modificados por polímeros objetivam alterar as propriedades do asfalto. O produto final do programa de pesquisa SHRP resultou no novo sistema denominado Superpave (Superior Performance Asphalt Pavaments), que é um programa capaz de especificar materiais e projetar misturas asfálticas. As propriedades físicas do ligante são medidas através do REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO, SHRP – (DSR). Este equipamento mede o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o Ângulo de fase (δ), submetendo uma pequena quantidade do ligante a tensões de cisalhamento oscilatório, entre duas placas paralelas. Este ensaio foi estipulado de maneira assegurar resistência a deformação permanente. Adotou-se o módulo a 0,1 segundo de tempo de carregamento senoidal a 10 rad/s. Valores mínimos de 1 kPa, foram específicos para antes e após o ensaio de RTFOT.



(a)



(b)

FIGURA 29 – (a) Reômetro de cisalhamento dinâmico e (b) Cálculo de G^* e δ .

Na figura 29 (b) vê-se o reômetro de cisalhamento dinâmico enquanto na figura 29 (b) mostra que a respeito à deformação de cisalhamento, em torque constante de uma amostra, está defasada em relação à tensão aplicada por um certo intervalo de tempo Δt , que representa o atraso na deformação obtida. A fase em atraso é expressa em medida angular (ω) para atingir o ângulo de fase (δ). Para materiais totalmente viscosos – deformação totalmente defasada, $\delta = 90^\circ$.

MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

{Alta temperatura - δ tende 90°C

($- 0^\circ < \delta < 90^\circ\text{C}$)

{Baixa temperatura - δ tende 0°C

No Anexo IV temos uma parte (capítulo 7 e 8) da pesquisa do Maciel (2003) que mostra os métodos e equipamentos para caracterização do asfalto convencional e do asfalto modificado com polímero e os resultados.

6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi verificado que a mistura ótima do polímero no asfalto para que suas propriedades melhorem para serem aplicadas em asfaltos drenantes e densos ficaram entre 3% e 5% de polímero no asfalto. Valores que ficaram abaixo dessa faixa não tiveram os resultados esperados e o asfalto modificado ficou praticamente igual ao convencional. Valores acima dessa faixa também não são viáveis, pois o custo aumenta e a qualidade não altera tanto em relação aos 3% a 5% de polímero no asfalto.

7 - CONCLUSÕES

Como resultado dessa pesquisa podemos concluir que, os pavimentos drenantes devem ser feitos com materiais de melhor qualidade, devido sua maior fragilidade resultante de seus vazios por onde a água vai escoar trazendo mais segurança e conforto para os usuários de rodovias. Porém vimos também que, não é em qualquer trecho da rodovia que se podem aplicar os pavimentos drenantes, por exemplo, em locais de grandes esforços de frenagem, aceleração brusca, curvas acentuadas, em serras, e outros, mas é aconselhável o uso nesses casos de pavimentos densos com asfaltos modificados com polímeros, ou seja, que não tenha tantos vazios como nos pavimentos drenantes, mas que vai ter sua vida útil muito maior que pavimentos sem polímeros. Com esse trabalho queremos também mostrar as autoridades governamentais e concessionárias de rodovias que os usuários podem ter a sua disposição melhores vias por onde transitam e que aqueles devem investir mais em rodovias para trazer segurança e conforto. Apesar desses pavimentos drenantes com asfalto modificado com polímero SBS serem um pouco mais caros que os pavimentos convencionais, sua durabilidade, segurança, conforto e apresentaram menores custos com manutenção, tempo ganhos com viagens mais rápidas, menos estresse, menor número de ocorrência de acidentes, não tem preço que pague, quando se levam em conta esses fatores.

8 – TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante pesquisar um material que possa ser usado como asfalto drenante em serras, curvas, aeroportos e outros locais que exerça um esforço maior cujo asfalto modificado com polímero SBS não tem tanta resistência.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, Simone da Costa. **Estudos de misturas asfálticas densas com agregado do Estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60)**. 2000. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Área: transportes), Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

ASTM D4124-01 Standard Test Methods for Separation of Asphalt into Four Fractions," **ASTM International**. For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

BRÛLÉ, B. Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry: basic principles. **Transportation Research Record**, n. 1535, p. 48-53, 1996.

CHAMECKI, S. **Síntese da reologia e da sua aplicação ao dimensionamento de pavimentos**. Publicação B-10-59 do Curso de Especialização de Pavimentação Rodoviária. Rio de Janeiro-R.J., publicado pelo IPR-DNER, 1959. Reimpresso em 1961.

COELHO, V.; SÓRIA, M.H.A. Efeito da composição granulométrica e da temperatura na formação de trilhas-de-rodas em pavimentos flexíveis. **IXANPRT – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. v. 1 , p 93-100, 1995.

CONSTANTINO, R.S.; LEITE, C.F.M.; GONÇALVES, M.L.A. Avaliação da faixa de plasticidade e da viscoelasticidade de asfaltos modificados com polímero. **14º Encontro do Asfalto**. P. 60-70, 1998.

DE SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Editora PINI Ltda, 1997. 746 p. DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Pesquisas de asfaltos modificados por polímeros – Relatório Final. **Ministério dos Transportes**. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Tomo I e II, 1998.

ÊXODO. **A Bíblia Sagrada**. Traduzida em português por João Ferreira de Almeida. Revista e Atualizada no Brasil. São Paulo. Ed. 2. Sociedade Bíblica do Brasil, 1993. p. 57.

FREITAS, F.J.S. Asfalto modificado com EVA. **Anais da 30ª Reunião Anual de Pavimentação**, v.1, p. 61-74, 1996.

GÊNESES. *A Bíblia Sagrada*. Traduzida em português por João Ferreira de Almeida. Revista e Atualizada no Brasil. São Paulo. Ed. 2. Sociedade Bíblica do Brasil, 1993. p.8-12.

GONTIJO, P.R.A. Reologia, propriedades visco-elásticas lineares e conceito do módulo de rigidez de betumes puros e de misturas betuminosas-método de cálculo. IBP – Instituto Brasileiro do Asfalto, **5º Encontro de Asfalto**, p. 257-305. 1980.

IBP – Instituto Brasileiro do Petróleo, **Informações básicas sobre materiais asfálticos**. Rio de Janeiro, IBP/Comissão de Asfalto, 1999. 76 p.

IBP – Instituto Brasileiro do Petróleo, **Informativo O Asfalto**. Rio de Janeiro, 1996 p. 1-5.

IPIRANGA ASFALTO. Pesquisa no site da: Ipiranga Asfaltos. Disponível em: <<http://www.ipirangaasfaltos.com.br>> ou <<http://www.ipiranga.com.br>>. Acesso em mar. 2006.

ISACSSON, U.L.F.; LU, X. Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers. **Journal of Materials Science**. n. 34, p. 3737-3745, 1999.

KHOSLA, N.P. Effect of the use of modifiers on performance of asphaltic pavements. **Transportation Research Record**, n. 1317, p. 10-22, 1991.

KRATON POLYMERS. Pesquisa no site da: Kraton Polymers do Brasil SA. Disponível em: <<http://www.kraton.com.br>> ou <<http://www.kraton.com>>. Acesso em 19 abr. 2006.

LU, X.; ISACSSON, U.L.F. Influence of styrene-butadiene-styrene and polymer modification on bitumen viscosity. **Fuel**. v. 76, n. 14/15, p. 1353-1359, 1997.

LU, X.; ISACSSON, U.L.F.; EKBLAD, J. Rheological properties of SEBR, EVA and EBA polymer modified bitumens. **Materials and Structures**, v. 32, p. 131-139, 1999.

MACIEL, Emerson Rodrigues. **Adição de Polímero em Cimento Asfáltico de Petróleo**. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Graduação em Química. 2003.

MARTINHO, F.G.; MONTENEGRO, F.G.; TRAJANO, L. Coperflex Asphalt – uma combinação asfalto e elastômero. **Anais do 12º Encontro de Asfalto**, v. 2, p. 281-291, 1994

MONTEIRO, A.E.C. **Uma introdução à visco-elasticidade**. 1984. 87 p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

MOTTA, L.M.G.; MEDINA, J.; SCALCO, R. Oprojeto estrutural de pavimentos flexíveis e a dosagem de misturas asfálticas. **27º Reunião Anual de Pavimentação**, v.1, p. 524-545, 1993.

PEREIRA, P.A.; PAIS, J.C.; AZEVEDO, M.C. Improvement of permanent deformation and fatigue life of bituminous mixtures by using modified bitumens. **5th International**

Conference on the bearing Capacity of Roads and Airfields. Proceedings, v.II. p. 1117-1123, 1998.

PERL, M.; UZAN, J.; SIDES, A. Visco-elasto-plastic constitutive law for a bituminous mixture repeated loading. **Transportation Research Record**, n. 911, p. 20-27, 1993.

PORTO, Henriqueta Giolito. Pavimetos Drenantes. 1 ed. São Paulo. D&Z Computação Gráfica e Editora, 1999.

PRADHAN, M.M.; ARMIJP, J.D. Assessing effects of commercial modifiers on Montana asphalts by conventional testing method. **Transportation Research Record**, n. 1417, p. 84-92, 1993.

RAMOS, C.R.; LÁO V.L.DO E.S.T.; MARTINHO, F.G., MACEDO, M.M.D. Asfalto modificado com polímero uma opção para melhoria dos asfaltos nacionais. **Anais do 13º Encontro de Asfalto**, v.1, p. 60-82, 1996.

ROWE, G.M.; BROWN, S.F.; SHARROCK, M.J.; BROULDIN, M.G. Viscoelastic analysis of hot mix asphalt pavement structures. **Transportation Research Record**, n. 1482, p. 44-51, 1995.

WHITEOK, D. **The Shell Bitumen Handbook**. U.K. – England, 1990.

ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G.J. Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt. **Transportation Research Record**, n. 1530, p. 51-58, 1996.

10 - ANEXOS

10.1 - Especificação do Polímero KRATN D1101 B Polymer



K0430
South America
Mar 2006

KRATON® D1101B Polymer

Data Document

Description

KRATON® D1101B is a clear, linear triblock copolymer based on styrene and butadiene with a polystyrene content of 31%. It is supplied from South America in the physical form identified below.

- D1101BT supplied as a dusted pellet
- D1101BM supplied as a dusted powder
- D1101BU supplied as an undusted pellet

KRATON D1101B is used as a modifier of bitumen or thermoplastics and in compound formulations. It may also find use as an ingredient in formulating adhesives, sealants and coatings.

Sales Specifications

Property	Test Method	Units	Sales Specification Range
Ash (Product Form "U")	ISO 247-B	% mass	0.1 max.
Ash (Product Form "M")	ISO 247-B	% mass	5.0 max.
Ash (Product Form "S" or "T")	ISO 247-B	% mass	0.5 max.
Bound styrene	KM03	%mass	30-32
Volatile matter	KM04	%mass	0.5 max.
Total extractables	KM05	%mass	1.0 max.
Antioxidant content	KM08	%mass	0.10 min.

Typical Properties (These are typical values and may not routinely be measured on finished product)

Property	Test Method	Units	Typical Value
Bound styrene	KM03	%mass	31
Solution viscosity ^(A)	KM06	Pa.s	4.0
Melt flow rate 200°C/5kg	ISO 1133	g/10 min	<1
Specific gravity	ISO 2781	Mg/m ³	0.94
Hardness ^(B)	ISO 868	Shore A (15s)	70
Tensile strength ^(C)	ISO 37	MPa	33
Elongation at break ^(C)	ISO 37	%	880
Modulus 300% ^(C)	ISO 37	Mpa	2.9

^(A) Measured on 25% mass solution in toluene at 25°C using a Brookfield viscometer, LTF or LTV model

^(B) Measured on compression molded slabs

^(C) Measured on films cast from a solution in toluene

Packaging

KRATON Polymers are available in a number of different package types. For information specific to this grade, please contact your local KRATON Polymers representative.

End Use Requirements

If the finished article is intended for use in food contact and packaging applications, toys, or human contact areas, manufacturers of the final product should observe all relevant regulations. Some of these regulations require tests to be carried out on the final product, e.g. migration. These are the responsibility of the final product manufacturer. Information on the food packaging clearances of individual products is available from KRATON Polymers.

Medical, Healthcare and Cosmetic Applications and Trademark Usage

KRATON Polymers' products should not be used in any devices or materials intended for implantation in the human body as defined by the U.S. Food and Drug Administration under 21 CFR 812.3(d) and 21 CFR 860.3(d). KRATON Polymers' products may, in certain circumstances, be used in the following products or applications with prior written approval for each specific product or application:

- Cosmetics (exclusive of packaging or delivery applications).
- Drugs and other Pharmaceuticals (exclusive of packaging or delivery applications).

KRATON Polymers' trade names, trademarks, logos or other similar identifying characteristics should not be used in the manufacture, sale, or promotion of cosmetics, drugs, and pharmaceutical products or other medical/healthcare applications or materials. KRATON Polymers has no specific expertise in these markets and applications, and does not intend to perform testing, clinical studies or other investigations of the suitability of its products for specific applications. Each customer or user of KRATON Polymers' products is solely responsible for determining the suitability of the materials it selects for the intended purpose and acknowledges that it has not relied on any representations of KRATON Polymers regarding suitability for use in its intended cosmetics, drugs, pharmaceutical products or materials. Please contact your KRATON Polymers Sales Representative for more details before using our products in these specific applications.

Safety and Handling Precautions

Read the Material Safety Data Sheet for KRATON Polymers' products carefully and thoroughly before beginning any work with such products. Additional information relating to the health, safety, storage, handling and processing of KRATON Polymers' products can be found in the KRATON Polymer HSE Fact Sheet (K0155), available from your local KRATON Polymers Sales Representative. KRATON Polymers also recommends that customers or users consult other sources of safety information, for example, the current edition of the "Code of Practice on the Toxicity and Safe Handling of Rubber Chemicals," British Rubber Manufacturers Association Limited (www.brma.co.uk). KRATON Polymers products' and compounds can accumulate electrostatic charges when rubbed, chafed or abraded. Processing and storage equipment for use with KRATON Polymers' products should provide a means of dissipating any charges that may develop. When processing KRATON Polymers' products, maintain a fire watch if the material reaches 225°C (437°F) for KRATON IR and KRATON D (polymers and compounds), and 280°C (536°F) for KRATON G (polymers and compounds). The temperatures listed above are indicated only for safety reasons (risk of fire and product degradation) and are not necessarily recommended for processing. Degradation of the polymer (polymer breakdown) will start at lower temperatures depending on the specific processing conditions. Therefore, operating below these temperatures does not guarantee the absence of product degradation.

KRATON Polymers' products (the neat resin or the base product) are high molecular weight polymers which by all accounts are non-toxic and biologically inactive.

Warranty

The information contained in this publication is, to the best of KRATON Polymers' knowledge, true and accurate, but any recommendations or suggestions that may be made are without guarantee or warranty of any kind whatsoever, since the manufacturing conditions to which KRATON Polymers' products will be subject are beyond KRATON Polymers' control. Customers of KRATON Polymers must make their own assessment to determine the suitability of a KRATON Polymers product for a particular purpose. Further, nothing contained herein shall be construed as a recommendation to use any KRATON Polymers product in conflict with existing patents of KRATON Polymers or any third party. All products purchased from or supplied by KRATON Polymers are subject to the terms and conditions of sale set out in the applicable contract, order acknowledgement and/or bill of lading. KRATON Polymers warrants only that its products will meet the specifications designated in any such contract, order acknowledgement or bill of lading.

KRATON POLYMERS MAKES NO OTHER WARRANTIES REGARDING ITS PRODUCTS, WHETHER OF FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, MERCHANTABILITY, OR OTHERWISE, AND NONE SHALL BE IMPLIED. FURTHER, KRATON POLYMERS MAKES NO REPRESENTATIONS AND ASSUMES NO RESPONSIBILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO FREEDOM FROM INFRINGEMENT OF ANY PATENT AND/OR COPYRIGHT RESULTING FROM ITS CUSTOMERS' USE OF KRATON POLYMERS' PRODUCTS OR INFORMATION.

For further information:

USA Tel (toll free): +1-800-4-Kraton (+1 800-457-2866)
USA Tel: +1-281-504-4950
USA Fax: +1-281-504-4953

In Europe / Africa

Europe Fax: +44-(0)1829-773-130

In South America

Fax: +55-(0)19-3874-7275

In Asia Pacific

Tel Japan +81-3-3769-5990
Hong Kong +852-250-80-657
Taiwan +886-2-2545-1538
China +86-21-5109-5212
South East Asia / India +91-11-628-4324
Australia +61-41-937-5055

Or contact your local KRATON Polymers Representative

Visit us at www.kraton.com

Email info@kraton.com



K0430 D08-065
D1101B Polymer
03/25/2006

© KRATON and the KRATON logo are trademarks owned by the KRATON Polymers Group of Companies

**10.2 - Ficha Técnica do Betuflex (Asfalto Modificado com Polímero SBS) da Ipiranga
Asfalto.**

FICHA TÉCNICA DO BETUFLEX

Características	TIPO		
	B 60/60	B 65/60	B 80/60
Viscosidade a 135°C, cps, máx.	2500	2500	2500
Viscosidade a 145°C, cps, máx.	2000	2000	2000
Viscosidade a 175°C, cps, máx.	450	450	450
Penetração a 25°C (100g, 5s), dmm	50 - 70	50 - 70	50 - 70
Ponto de Amolecimento, °C	55 - 65	60 - 75	75 - 90
Ponto de ruptura Fraas, °C, mín.	-10	-15	-15
Intervalo de Plasticidade, °C, mín.	65	75	90
Índice de Suscetibilidade Térmica, mín.	zero	+ 1	+ 3
Densidade a 20/4 °C	1,00 - 1,04	1,00 - 1,04	1,00 - 1,04
Ponto de Fulgor, °C, mín.	240	240	240
Ductilidade a 25°C, cm, mín.	100	100	100
Ductilidade a 10°C, cm, mín.	90	90	90
Recuperação elástica a 25°C, %, mín.	60	85	85
Recuperação elástica a 10°C, %, mín.	50	70	70
Compatibilidade a 163°C, 2 dias, máx.	2	2	2
Micromorfologia da dispersão (microscópio de fluorescência)	OK	OK	OK

EFEITO DO CALOR E DO AR

Características	TIPO		
	B 60/60	B 65/60	B 80/60
% Variação em massa, %, máx.	1,0	1,0	1,0
% Penetração Original, mín.	50	50	50
% Ponto de amolecimento, mín.	90	90	90
Ductilidade a 25°C, cm, mín.	90	90	90
Ductilidade a 10°C, cm, mín.	80	80	80
Recuperação elástica a 25°C, %, mín.	50	80	80
Recuperação elástica a 10°C, %, mín.	40	60	60

10.3 - Especificação de Asfalto Modificado por Polímero SBS - DNER – 396/99

3.1. Asfalto modificado por polímero SBS

Suas características podem oscilar entre os valores máximos e mínimos com enumerado a seguir:

CARACTERÍSTICA	EXIGÊNCIA	
	Mínima	Máxima
Penetração, 100 g, 5 s, 25 °C, 0,1 mm	45	-
Ponto de Fulgor, °C	235	-
Ductilidade, 25 °C, 5 cm/min, cm	100	-
Densidade Relativa, 25 °C/25 °C	1,00	1,05
Ponto de Amolecimento, °C	60	85
Ponto de Ruptura Fraass, °C	-	-13
Recuperação Elástica, 20 cm, 25 °C, %	85	-
Viscosidade Cinemática, 135 °C, Cst	850	-
Viscosidade Cinemática, 155 °C, Cst	350	-
Estabilidade ao armazenamento:		
500ml em estufa a 163 °C, 5 dias:		
- diferença de ponto de amolecimento, °C	-	4
- diferença de recuperação elástica, 20 cm, 25 °C, %	-	3
Índice de Suscetibilidade Térmica (IST x 10 ²)	2	5
Efeito do Calor e do Ar:		
- variação de massa, %	-	1,0
- percentagem da penetração original	50	-
- variação do ponto de amolecimento, °C	-	4
- recuperação elástica, %	80	-

Nota 1 - O índice de suscetibilidade térmica (IST), deve ser determinado a partir da inclinação da reta penetração x temperatura, para temperaturas de 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C. A inclinação da reta é determinada pelo ajuste da equação $\log(\text{pen}) = C + AT$, aos pontos dos ensaios, onde:

$\log(\text{pen})$ - logaritmo da penetração.

A - inclinação da reta.

C - constante.

T - temperatura, °C.

Nota 2 - O produto não deve produzir espuma quando aquecido a 175 °C.

10.4 - MACIEL, Emerson Rodrigues. **Adição de Polímero em Cimento Asfáltico de Petróleo**. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Graduação em Química. 2003.
Capítulo 7 e 8.

7. MATERIAIS E MÉTODOS

7.1. Materiais Empregados

As matérias-primas utilizadas neste estudo foram cimento asfáltico de petróleo (CAP 20) da Refinaria Planalto (REPLAN), derivado de petróleo nacional. O polímero utilizado foi o SBS novo KRATON D 1101 BT, da KRATON Polymers (cerca de 30% de estireno) e borracha de pneu moído foram fornecidos pela RELASTOMEX, empresa brasileira, detentora da tecnologia de moagem, mas que não possui nenhuma instalação comercial no Brasil¹.



(27)



(28)



(29)

Figuras (27): Polímero SBS; (28) Borracha moída de pneu; (29) Cimento asfáltico de petróleo¹

Tabela 5: Análise físico química e química do CAP¹

AMOSTRA	ASFALTENO	RESINA	AROMÁTICO	SATURADO	VISCOSIDADE 60° C (Poise)	PENETRAÇÃO A 25° C 100g, 5 seg, dmm
CAP 20	17,0%	26,0%	47,0%	10,0%	1800	52

7.2. Equipamentos para Mistura

As amostras foram preparadas em uma unidade piloto e ainda em instalação industrial da Ipiranga Asfaltos S.A. (Unidade Betel), a fim de fornecer maior quantidade de asfalto para testes mecânicos em misturas asfálticas. A quantidade de amostra para testes é da ordem de 20 Kg. A unidade é composta por dois tanques aquecidos com resistência elétrica (máximo de 300° C) e linhas de circulação aquecida com óleo térmico, cada tanque com capacidade para 10 litros.

Além disso é composto por uma bomba de engrenagem de ½" cuja velocidade é controlada por um inversor de frequência, e um moinho tipo cônico a fim de promover melhor cisalhamento e homogeneização da mistura⁵.

7.3. Equipamentos para Caracterização

Abaixo estão listados os equipamentos que foram usados na avaliação das amostras aqui estudadas¹.

- Cromatógrafo de Camada Delgada com Detector de Ionização de Chama CCD / FID IATROSCAN MKS NEW
- Penetrômetro Petrodidática
- Viscosímetro BROOKFIELD
- Viscosímetro Capilar CANNON
- Estufa de Efeito de Calor e Ar de Filme Fino Rotativo
- Ductilometro de Fluorescência Micronal
- Coesímetro
- Prensa INSTRON
- Espectrofotômetro do Infravermelho por transformada de Fourier MAGMA 500 NICOLET
- Analisados Automático de Ponto de Amolecimento NORMALAB
- Balanças MARTE e METTLER
- Estufas
- Vibrador de Peneiras para Determinação da Granulometria
- Prensa Marshall
- Compactador LCPC
- Simulador de tráfego LCPC

7.4. Métodos de Caracterização

7.4.1. Caracterização Química de Ligantes Betuminosas

7.4.1.1. Cromatografia de Camada Delgada (CCD – FID IATROSCAN)

A precipitação dos asfaltenos com n-heptano é seguida por separação dos constituintes solúveis em capilares recheados com sílica ou alumina, como meio de adsorção. Após a adição com solventes de diferentes polaridades efetua-se por ionização de chama, a detecção de saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos¹.

7.4.1.2. Cromatografia por Permeação em Gel (GPC)

Separação dos constituintes do cimento asfáltico de petróleo diluídos em solvente, por tamanhos pequenos, moléculas movem-se lentamente, entrando no meio poroso da coluna ao passo que estruturas menores não conseguem penetrar, passando rapidamente pela coluna, O cromatograma resultante é o da distribuição do tamanho dos constituintes, carregado pelos maiores e finalizando pelos menores. Efetua-se a comparação dos CAPs pelos perfis cromatográfico, ou pela divisão da área dos cromatogramas em três partes, denominados altos, médio e baixo tamanhos moleculares¹.

7.4.1.3. Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

Quantificar frações cristalizáveis e determinação de temperatura de transição vítrea⁵.

7.4.1.4. Heterocompostos

As identificações de heterocompostos (nitrogenados, sulfurados e oxigenados) podem ser realizadas por espectrofometria ao infravermelho².

7.4.2. Caracterização Reológica de ligantes betuminosos

7.4.2.1. Penetração (MB 107 e ASTM D5)

O método empregado consiste em anotar a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha penetra na amostra, sob condições padronizadas. O conceito de consistência do asfalto sempre esfera associado a valores de penetração⁴.



Figura 30: Penetrômetro

7.4.2.2. Ponto de Amolecimento (MB 164 e ASTM D 36)

Este ensaio determina a temperatura em que uma esfera de aço empurra um corpo de prova, constituído de um disco de crosta contido num anel metálico. O ponto de amolecimento é a temperatura em que a amostra amolece, permitindo que a esfera empurra o disco até tocar uma referencia⁴.

7.4.2.3. Viscosidade Cinemática (MB 517)

Efetuada a temperaturas altas, onde o escoamento do cimento asfáltico é newtoniano. O teste consiste em verificar o tempo de escoamento, em segundos, de determinado volume de amostra a temperatura constante, em viscosímetros capilares (ASTM D 2170) ou em viscosímetros Saybolt (ASTM E 102)⁴.

7.4.2.4. Efeito de Calor e Ar (MB 425 e ASTM D 1754)

O ensaio consiste em deixar a amostra dividida em três cápsulas a 163° C durante 5 horas, em um prato giratório em uma estufa, a fim de simular as condições de usinagem do asfalto, avaliando também a presença de formações de óleos mais leves e / ou a oxidação¹.

7.4.2.5. Ductilidade (MB 167 e ASTM D 113)

Determina a capacidade de um corpo de prova, em forma de gravata, de alongar-se sem romper quando tracionado sob condições padronizadas¹.

7.4.2.6. Ponto de Fulgor (MB 50 e ASTM D92)

Temperatura limite que o asfalto pode ser aquecido sem correr o risco de inflamar-se em contato com uma chama⁴.

7.4.2.7. Solubilidade em Tricloroetileno (MB 166 e ASTM D 2042)

A porção de CAP solúvel em tricloroetileno representa o material que age como ligante, o restante representa contaminação de natureza mineral, em geral.

7.4.2.8. Índice de Penetração (IP) ou Índice de Susceptibilidade Térmica (IST)

Desenvolvido por Pfeiffer Van Doormaal, expressa a variação da consistência com a temperatura na faixa de serviço em pavimentos. O IST da ordem de -2 a +1 identifica o CAP de uso rodoviário tais que o valor zero significa susceptibilidade adequado a valores abaixo de -1,5 indicam CAP suscetíveis, que variam muito de consistência com a temperatura. Van der Poel (1954) observou que o ponto de amolecimento corresponde à temperatura em que qualquer CAP apresenta penetração 800. Também foi observado por Van der Poel que o ponto de ruptura Fraass corresponde à temperatura em que penetração é igual a 1,5. O índice de susceptibilidade térmica pode ser determinado pelo gráfico de Heukelon, a partir de uma paralela á reta de penetração versos temperatura, na região de serviço, por meio de um ponto marcado como ponto de origem de serviço no Heukelon. A expressão de Pfeiffer Van Doormaal, normalmente utilizada para obtenção deste índice é⁴:

$$IST = \frac{500 \log PEN + 20 PA - 1951}{120 - 50 \log PEN PA}$$

Onde: PEN: Penetração a 25° C, 100 g, 5 seg em dmm

PA: Ponto de Amolecimento , °C

7.4.2.9. Viscosidade (ASTM D 4402)

Assegura adequado bombeamento, transporte e usinagem. Utiliza o viscosímetro Brookfield.

7.4.2.10. Envelhecimento por Estufa RTFOT (ASTM D 2872)

Simula envelhecimento da usinagem, sendo estipulado um valor máximo de perda de voláteis. Utiliza a estufa de filme fixo rotativo (RTFOT).

7.4.3. Caracterização Reológica de Asfaltos Modificados por Polímeros⁵

7.4.3.1. Microscópio por Fluorescência

Técnica de microscopia com uma fonte luminosa de lâmpada de ultravioleta que permite distinguir as fases de polímero e asfalto em uma mistura de dois compostos, avaliando se o polímero está bem disperso ou ainda não. Na observação o material com uma coloração amarela é o polímero e a negra é a fase asfáltica.

7.4.3.2. Compatibilidade (ASTM D 5892)

O ensaio consiste em colocar a amostra em uma proveta de duas saídas (no fundo e no topo) a uma temperatura de 163 °C durante 5 dias, e após a retirada o valor da diferença do ponto de amolecimento (ΔPA) não pode ser menor que 5°C entre o Topo e o Fundo.

7.4.3.3. Retorno ou recuperação Elástica (ASTM D 6084)

Consiste em alongar a amostra a 20 cm de um corpo de prova num ductilômetro, após a amostra permanecer 1 hora no banho climático. A amostra esticada 20 cm é cortada ao meio e aguardam por 1 hora seu retorno elástico, retornando as duas partes cortadas no início e procedendo aos cálculos.

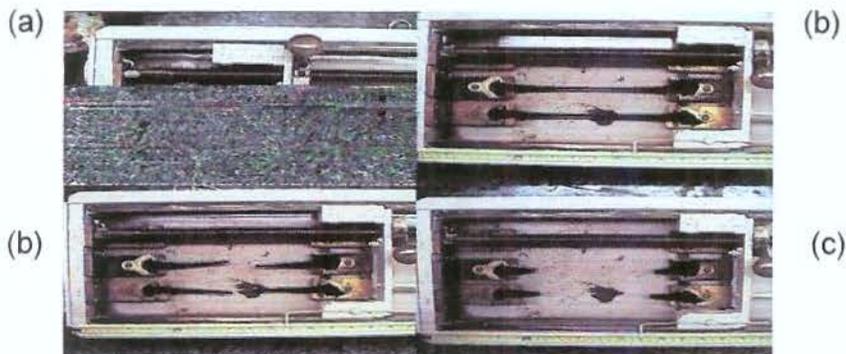


Figura 31: Ensaio de recuperação elástica (a) antes, (b) durante e (c) após a análise

7.4.3.4. Teor de SBS

Espectrofotometria ao Infravermelho e Transformada de Fourier.

7.4.3.5. Resiliência

Medida de elasticidade num penetrômetro, substituindo a agulha por uma esfera.

7.4.3.6. Viscosidade realizada no viscosímetro Brookfield (ASTM D 4402)

7.4.3.7. Ponto de Amolecimento (MB 164 e ASTM D 36)

7.4.3.8. Penetração (MB 107 e ASTM D 5)

7.4.3.9. Ductilidade (MB 167 e ASTM D 113)

7.4.3.10. Efeito Calor e Ar (MB 425 e ASTM D 1754)

7.4.3.11. Ponto de Fulgor (MB 50 e ASTM D 92)

7.4.4. Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas⁷

7.4.4.1 Densidade Aparente (DNER ME 117/94)

Após a densidade do corpo de prova cilíndrico, são efetuadas quatro medidas de altura e diâmetro para obter um valor médio das dimensões dos corpos de prova. A densidade aparente foi estimada, pesando se os corpos primeiramente secos e depois submersos e empregados o peso específico da água.

7.4.4.2. Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall (DNER ME 043/64 e ASTM D 1559)

Emprega –se o princípio da ruptura através da compressão diametral semi confirmada. Após a confecção e demoldagem, o corpo de prova (CP) é submetido a um banho de água à temperatura de 60 ° C por 30 minutos e a seguir colocado dentro dos dois segmentos do molde de compressão e então levado a prensa que se move a uma velocidade de 5 cm/min até o ponto de ruptura. A estabilidade é a carga requerida para romper o corpo de prova e a fluência é a medida da deformação correspondente, requerida para produzir ruptura. Retained Marshall é o ensaio Marshall realizado após inversão do CP, sob condições diferentes da anteriormente descrito, mas com ela comparada de modo a avaliar a adesividade do ligante aos agregados em presença da água⁷.

7.4.4.3 Ensaio de Tração Indireta Estática (DNER ME 138/94)

O corpo de prova cilíndrico é posicionado diametralmente em relação à direção da compressão, resultando numa tração , agindo perpendicularmente ao longo do plano diametral que promove a ruptura do corpo nesta direção. É realizada numa prensa Marshall, sendo o corpo de prova apoiado ao longo de suas geratrizes por dois frisos de cargas posicionadas na parte superior e inferior do corpo de prova⁷.

7.4.4.4 Módulo resiliente por compressão diametral (DNER ME 133/94 e ASTM D 4123)

Definido como a relação de tensão de tração gerada no corpo de prova com a deformação de tração recuperável correspondente. Este ensaio consiste em solicitar o corpo de prova dinamicamente por uma carga de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas a medir a deformação resiliente ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga aplicada.

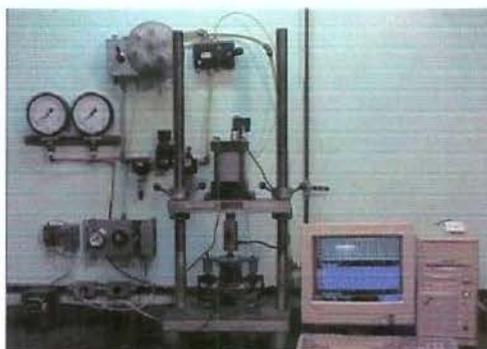


Figura 32: Equipamento de determinação do módulo de resiliência por compressão diametral⁷

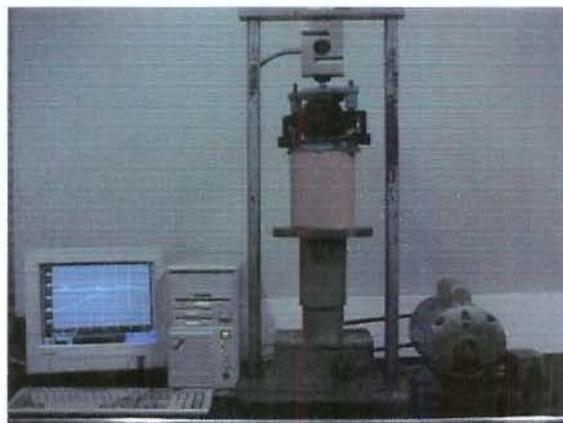


Figura 33: Equipamento de determinação da resistência a tração por compressão diametral⁷

7.4.4.5. Ensaio de Fadiga

Definida como o número de repetição de uma carga, capaz de promover ruptura de um corpo de prova, sendo esta carga inferior à resistência de tração estática do material. A força aplicada produz uma tensão de tração horizontal que deve ser uma fração da resistência à tração indireta estática previamente determinada.

Ensaio feito a tensão controlada de carga repetida pulsante até a ruptura total do corpo de prova⁷.

7.4.4.6. Ensaio de deformação permanente no simulador de Tráfego tipo LPC – LCPC – Laboratório Central de Ponts et Chaussées

A mistura betuminosa é compactada através de amassamento por rodas de pneus na temperatura de projeto, gerando placas compactada de mistura betuminosa, processo similar ao de campo, por um equipamento chamado nisa compactadora tipo LPC. O ensaio é feito num equipamento munido de rodas pneumáticas, cuja pressão do pneu e carga no eixo são controláveis, onde ocorre passagem de roda na placa compactada à temperatura controlada. Mede-se o afundamento na trilha de roda em diversos pontos a cada determinado número de solicitações. As figuras 34 e 35 mostram o compactador e o simulador LCPC, respectivamente.



Figura 34: Compactador LCPC⁷

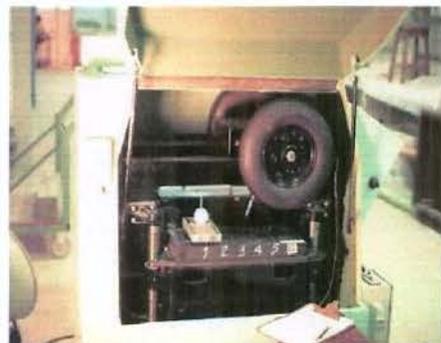
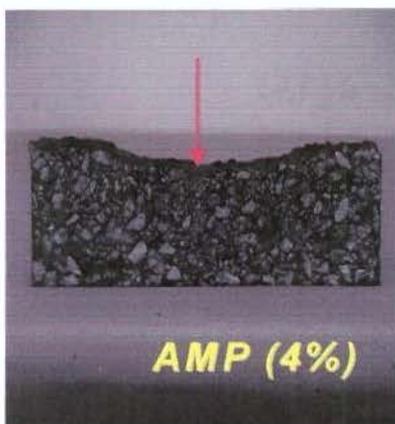
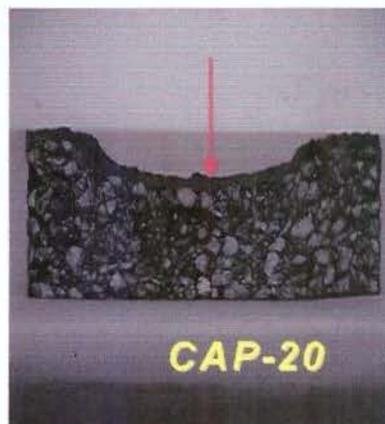


Figura 35: Simulador LCPC⁷



(a)



(b)

Figura 36: (a) Afundamento na trilha de roda muito menor com asfalto modificado com polímero comparado com (b) cimento asfáltico de petróleo⁷

7.4.4.7. Ensaio de Lottman (ASTHO T 283-89)

Método trata do processo de corpos de prova e medidas de variação de resistência à tração estática resultante dos efeitos do acondicionamento acelerado pela água e da saturação da misturas betuminosas compactadas em laboratório. O resultado pode ser usado para previsão desagregação ligante agregado e avaliação do desempenho de agentes melhoradores de adesividade⁷.



Figura 37: Equipamento para ensaio Lottman

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1 Resultados

Foram formulados asfaltos modificados com polímero com cerca de 4% de SBS, e 20% de borracha moída de pneu. Antes se avaliou o cimento asfáltico (CAP 20) procedente da refinaria da REPLAN. Todos os resultados são apresentados abaixo:

Tabela 6: Resultados encontrados com CAP 20

CAP 20 REPLAN ENSAIOS	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS	
		ANTES ECA	APOS ECA
Ponto de Amolecimento, °C	---	50	57
Penetração, a 25°C, 100g, 5seg, dmm	Min. 50	51	38
Viscosidade Cinemática 60 °C, Poise	2000 – 3500	2884	7800
Viscosidade absoluta			
135 °C, SSF	Min 100	164	246
177 °C, SSF	15 a 60	32	39
Ductilidade a 25 °C, cm	Min. 20	> 100	> 100
Ductilidade a 15 °C, cm	---	> 100	> 100
Solubilidade em Tricloroetileno	Min. 99,9	99,99	99,99
Ponto de Fulgor, °C	Min. 235	285	289
Índice de Suscetibilidade Térmica	(-1,5) a (+1,0)	- 1,15	-0,22
Separação Química, SARA, IIATROSCAN CCD/FID			
Saturados, %	---	9,8	10,7
Aromáticos, %	---	37,1	33,6
Resinas, %	---	35,3	40,2
Asfaltenos, %	---	17,8	15,4
Varição em massa, % m/m	---	0,16	---

Tabela 7: Resultados encontrados para o asfalto com SBS⁵

ASFALTO MODIFICADO COM SBS (AM – SBS)	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS	
		ANTES ECA	APÓS ECA
Ponto de Amolecimento, °C	65 – 75	74	75
Penetração, a 25 °C, 100 g, 5 seg	50 – 70	59	50
Viscosidade absoluta			
135 °C, SSF	Máx 3000	1200	1580
177 °C, SSF	Máx 450	220	250
Ductilidade a 25 °C, cm	Mín. 100	> 100	> 100
Ductilidade a 25 °C, cm	Mín 100	> 100	> 100
Solubilidade em Tricloroetileno	Mín 99,9	99,94	99,94
Ponto de Fulgor, °C	Mín. 235	280	290
Índice de Suscetibilidade Térmica	---	+ 3,93	+ 3,62
Teor de Polímero, %	3,8 a 4,2	4,1	4,0
Varição em massa, % m/m	1,0	0,04	---
Recuperação Elástica, a 25°, %	Mín. 70	91,0	90,2

Tabela 8: Resultados encontrados para o asfalto BPM⁵

ASFALTO MODIFICADO POR BORRACHA DE PNEU MOÍDO (AMBPM)	RESULTADOS	
	ANTES ECA	APÓS ECA
Ponto de Amolecimento, °C	62,2	65,5
Penetração, a 25 °C, 100 g, 5 Seg, dmm	55	42
Viscosidade absoluta		
135 °C, SSF*	924	1000
177 °C, SSF*	225	270
Ductilidade a 25 °C, cm	48	40
Ductilidade a 15 °C, cm	30	28
Ponto de Fulgor, °C	298	297
Índice de Suscetibilidade Térmica	+1,71	+1,64
Varição em massa, % mm	0,04	---

* onde SSF = segundos Saybolt-Furol

Tabela 9: Avaliação Mecânica das Misturas Betuminosas⁵

ENSAIO	CAP 20	AMP – SBS	ESPECIFICAÇÕES
Densidade Aparente, kN/m ³	23,10	23,25	-
Estabilidade Marshall, kgf	1037	1158	-
Módulo Resiliente Compressão diametral, MPa	3800	3600	-
Relação Resistência Tração, %	125,0	112,0	Mín.70,0
Deformação Permanente, para 30000 ciclos, %	12	9	-

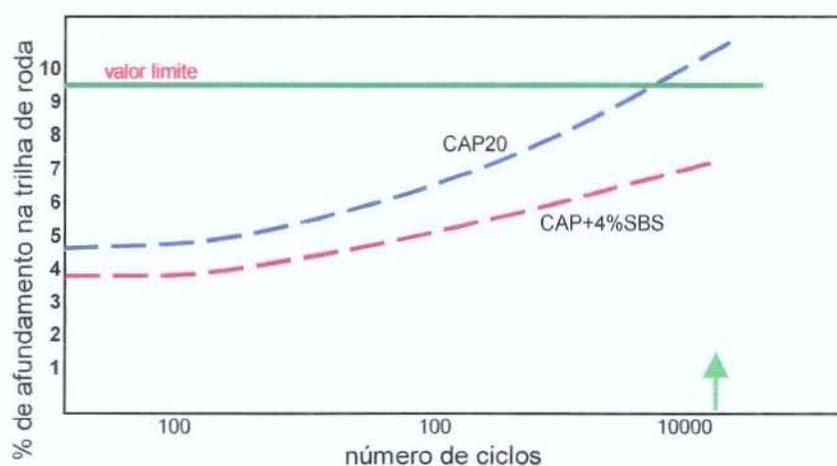


Figura 38: Gráfico do afundamento de trilhas de roda no simulador de tráfego LCPC⁷.

8.2. Discussões dos resultados

A utilização do moinho de alto cisalhamento e não somente agitadores, reduziu o tempo para incorporação de SBS no asfalto, emprego de SBS em “pellets”, menor viscosidade a 135°C, significando menor temperatura de usinagem e compactação de resultados betuminosos assim como maior resistência ao envelhecimento dos asfaltos modificados. Além disso, o valor mínimo de 85% para ensaio de recuperação elástica das especificações propostas pelo DNER significa a imposição de teores superiores em 4% de SBS, além do que não deveria constar uma especificação tão estreita de Índice de Suscetibilidade Térmica.

Em relação ao asfalto modificado por borracha moída de pneu apresentam alta viscosidade a 135°C, superiores a dos asfaltos modificados por SBS. Dependendo do volume tráfego e do clima, o construtor tem opção de escolher este tipo de asfalto, pois apresenta um preço mais interessante que o asfalto modificado por SBS (cerca de 3 a 4 vezes mais baratos). As misturas com borracha moída de pneu requerem mais passagens pelo moinho para apresentarem boa compatibilidade, mas necessita de circulação e agitação com maior frequência se comparado com o asfalto modificado com SBS. O asfalto modificado por borracha moída de pneu mostrou-se excelente quanto a característica de resistência à deformação permanente e à fadiga em relação ao ligante puro (CAP 20). A principal vantagem na utilização deste tipo de material, borracha moída de pneu, está associado ao grande apelo ecológico, pois hoje são queimados em cimenteiras e muitos se encontram em depósitos gerando grande impacto ambiental (descarte de pneus) facilitando a proliferação de ratos e doenças.

Os mecanismos de degradação dos pavimentos são: trincamento, deformações permanentes e as desagregações mecânicas.

O trincamento ocorrem devido à fadiga, responsável pelos efeitos cumulativo das repetições das cargas e conseqüentes deformações elásticas. A oxidação do ligantes (devido ao envelhecimento por interperismos), onde o pavimento torna-se mais rígido, leva ao trincamento. Observa-se pelos dados que a adição de polímeros diminui sensivelmente a variação em massa, ou seja, diminui o envelhecimento por interperismos, quando comparado com o cimento asfáltico de petróleo.

As deformações permanentes que ocorrem por afundamento nas trilhas de roda e ondulações no revestimento asfáltico associados elevadas temperaturas, causam irregularidades longitudinais afetando a dinâmica das cargas, qualidade do rolamento, acúmulo de água e risco à segurança dos usuários. De acordo com os resultados obtidos na tabela 9, a adição de polímero SBS, o CAP reduz consideravelmente os afundamentos em relação ao CAP 20, pois a adição do polímero SBS ao CAP altera as propriedades de consistência de reologia do ligante asfáltico, e, de modo, estas ações combinadas resultam num menor valor de deformação permanente (para 30.000 ciclos).

A desagregação pode ser definida como a perda de agregado superficial devido a perda de coesão ou pela perda de adesão do par agregado/ ligante na presença de água. Na relação resistência à tração o menor valor obtido com o asfalto modificado com SBS mostra que são resistentes à ação deletéria da água e resistência à ruptura. O ensaio de módulo de resiliência compressão diametral confirma que o ligante modificado continuou apresentando flexibilidade.