ROSA MARIA JAZRA MONEA

ESTUDO DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE BORRACHA MOÍDA DE PNEUS EM ASFALTOS PARA IMPERMEABILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

São Paulo

2006

ROSA MARIA JAZRA MONEA

ESTUDO DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE BORRACHA MOÍDA DE PNEUS EM ASFALTOS PARA IMPERMEABILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Samuel Marcio Toffoli

São Paulo

2006

Dedico este trabalho à minha mãe, Leila (*in memoriam*), à minha tia, Lina (*in memoriam*), ao meu avô Antônio Monéa (*in memoriam*) pioneiro em Impermeabilização no Brasil, ao meu pai, José Monéa e aos meus tios Achiles e Toni, que também fazem parte desta história.

"Lutar, sempre;
Vencer, talvez;
Desistir, jamais!"

Anônimo

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida, à Jesus, à Nossa Senhora e à São Miguel Arcanjo pela proteção e pelo auxílio nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Samuel Márcio Toffoli pela amizade, compreensão, dedicação, e pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Hélio Wiebeck pela coorientação deste trabalho, pelo auxílio na escolha do tema e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Leonardo Gondim de Andrade e Silva, pela amizade e pela contribuição para o enriquecimento deste trabalho.

Aos professores do Laboratório de Matérias-Primas Particuladas e Sólidos Não-Metálicos (LMPSol), Prof. Dr. Francisco Rolando Valenzuela Díaz, Prof. Dr. Antônio Carlos Vieira Coelho e Prof. Dr. Pérsio Sousa Santos, que também contribuíram para o meu aprendizado durante todos esses anos de convívio.

À Profª Drª Nicole R. Demarquette pela amizade, pelo auxílio e que pelo rigor e seriedade com que conduz os seus trabalhos, muito contribuiu para o meu crescimento pessoal.

Ao Prof. Dr. Reinaldo Giudici, pessoa por quem cultivo grande respeito e admiração por sua capacidade e competência, agradeço pela gentileza e atenção.

Aos professores, Prof. Dr. Pedro M. Büchler e Prof. Dr. Augusto C. Neiva, pela amizade.

À Profª. Drª Liedi L. B. Bernucci pela atenção e pelo apoio.

Ao Dr. Victor Duailibi pelo direcionamento desta pesquisa para a área de impermeabilização.

Ao Prof. Hubert Alqueres que teve grande influência na minha opção pela vida acadêmica.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise do PMT, em particular à Dra. Clarice Terui Kunioshi e ao Vinícius.

Ao Laboratório de Pavimentos e Impermeabilização, do Agrupamento de Infra-Estrutura Viária, Impermeabilização e Obras do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, particularmente ao Tecnólogo Rubens Vieira e à Engª (MSc) Márcia Aps, pela preciosa oportunidade de realizar a parte experimental desta pesquisa , ao Engº (MSc) Marcus dos Reis, à secretária Silmara e aos técnicos: Valmir Barbosa Dias, Roberto Mariano da Silva, João Alberto Leal e Claudecir das Neves Santos, pela colaboração e amizade, e agradeço especialmente aos técnicos: Luiz Back Adelino e Jurandir Rodrigues pela amizade, dedicação e paciência.

À Kraton Polymers do Brasil S.A. pelo fornecimento do SBS, em particular ao Químico Rafael Zangarini pela atenção, gentileza e pelas literaturas técnicas.

À Ipiranga Asfaltos S.A. especialmente à Engª Anelise L.Zanon pelo fornecimento do asfalto e ainda ao Químico Emerson R. Maciel e à Sra. Deborah C. Frata pelas literaturas técnicas e atenção.

À Artgoma do Brasil Ltda e à Basile Borrachas Representações, principalmente à Valéria e à Adriana pelo fornecimento das borrachas de pneus.

À Dp Union Instrumentação Analítica e Científica Ltda, especialmente à Frederico Mendes Júnior e Abel Ribeiro pela atenção, pela gentileza e pelas literaturas técnicas.

Às funcionárias da biblioteca do PQI-EPUSP: Maria Lúcia Adamo Attar, Fátima e Mariazinha e da biblioteca do PCC-EPUSP: Fátima, Leonor, Vilma, Rosivaldo, Hélio e Elaine, pela dedicação e atenção.

Aos amigos que muito colaboraram, em particular à Miriam A. Abreu, Siegfried Steudner, Fábio Esper, Nelma Albanez, Nelson Siqueira, Ticiane S. Valera, Aline A. Rodrigues, Shirley Cosin, Carolina A. Pinto, Adriana Yoshiga, Rosângela Abdalla, Ricardo Yoshi, Kleberson e ainda à Rita, Kátia, Telma, Iara, Josefina, Marilda, Sérgio, Nícolas, Valquíria, Wilson e todos aqueles que tive o prazer de conviver.

Aos amigos da E.E. Prof. Joaquim Leme do Prado especialmente ao diretor Olavo Celso Kahn da Silveira, às vice-diretoras Hilda Dutra e Sônia Santa Cruz, às coordenadoras Cleide e Ana Maria Kuninari, às secretárias: Regina, Ângela, Maria Amália, Maria Conceição, Sueli, Rosa, Clélia, Neusa, às funcionárias: Vanilda, Elizabeth, Maria de Fátima, Marlene e aos professores com quem convivo diariamente, especialmente Marcelo Hidalgo Martins, Edson Lima, Carlos Alonso, Maria Zélia Leite Oliveira e Flávia Noronha Dutra.

Aos amigos que me deram dicas para manter a saúde e resistir à intensa jornada de atividades diárias especialmente, Prof. Dr. Tamio Shimizu, Profª Dra. Sumie Hoshino Shimizu, Prof. Antônio Roddriguez, Prof. Paulo Kamimura, Prof. César, Marina, Jucélia, Teresinha Abrami.

Aos meus ex-alunos e colegas: da Escola de Engenharia Mauá; das Faculdades Oswaldo Cruz; da E.E. Zuleika de Barros e ainda à direção e aos colegas da E.E. Tarcísio Álvares Lobo e E. E. Prof. Mauro de Oliveira, especialmente às professoras Ângela e Rita, à D. Nenê e ao Sr. Antônio pelo incentivo.

Ao Santuário da Mãe, Rainha e Vencedora Três Vezes Admirável de Schoenstatt, especialmente à Irmã Teomaris, à Irmã Rosa Maria e às voluntárias: Gilci e Regina, pelas orações e pelo auxílio durante a recuperação da saúde de meu pai.

Ao meu pai, José Monéa pelo apoio financeiro; à minha irmã Miriam e aos meus sobrinhos Gustavo e Thays pela colaboração nos momentos finais desta dissertação.

A todos, muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
RESUMO
ABSTRACT
1. INTRODUÇÃO..... 1
2. REVISÃO DE LITERATURA..... 3
2.1 ASFALTO..... 3
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ASFALTOS..... 4
2.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CAP..... 6
2.4 ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS..... 8
2.5 COMPATIBILIDADE ASFALTO-POLÍMERO..... 9
2.6 ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS E A IMPERMEABILIZAÇÃO..... 9
2.7 ASFALTOS MODIFICADOS POR BORRACHAS..... 10
2.7.1 Copolímero em bloco SBS..... 10
2.7.2 Borracha de pneu..... 11
2.8 ESTADO DA ARTE..... 13
3. MATERIAIS E MÉTODOS..... 16
3.1 MATERIAIS..... 16
3.2 MÉTODOS..... 16
3.2.1 Preparo dos Asfaltos Modificados..... 16
3.2.2 Determinação da Penetração..... 17
3.2.3 Determinação do Ponto de Amolecimento..... 17
3.2.4 Moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios de Flexibilidade e Escorrimento..... 17
3.2.5 Ensaio de Flexibilidade à baixa temperatura..... 17
3.2.6 Ensaio de Escorrimento..... 18
3.2.7 Determinação de Resistência à Tração e Alongamento..... 18
3.2.8 Determinação da Deformação Permanente..... 19
3.2.9 Determinação da Recuperação Elástica..... 19
3.2.10 Ensaio de Separação de Fase..... 20
3.2.11 Ensaio de Densidade Relativa para o CAP-20..... 20
3.2.12 Ensaio de Densidade Relativa para os Asfaltos Modificados..... 21
3.2.13 Análise Granulométrica..... 21
3.2.14 Morfologia..... 21
3.2.14.1 Microscopia de Fluorescência..... 21
3.2.14.2 Microscopia Eletrônica de Varredura..... 22

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 23
4.1 ENSAIOS DE PENETRAÇÃO E PONTO DE AMOLECIMENTO 23
4.2 ENSAIOS DE ESCORRIMENTO E FLEXIBILIDADE 25
4.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ALONGAMENTO 25
4.4 ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE 33
4.5 ENSAIOS DE RECUPERAÇÃO ELÁSTICA 34
4.6 ENSAIOS DE SEPARAÇÃO DE FASE 36
4.7 ENSAIOS DE DENSIDADE RELATIVA 36
4.8 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA 37
4.9 MORFOLOGIA 38
4.9.1 Microscopia de Fluorescência 38
4.9.2 Microscopia Eletrônica de Varredura 42
5. CONCLUSÕES 43
6. REFERÊNCIAS 44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura típica dos asfaltenos. **R** representa cadeias alifáticas, naftênicas ou aromáticas. **7**
Figura 2 – Estrutura típica dos aromáticos. **R** representa cadeias naftênicas e/ou aromáticas. **7**
Figura 3 – Estrutura típica dos saturados: alifático (esquerda), cíclico (direita). **R** representa cadeias alifáticas e/ou naftênicas. **7**
Figura 4 – Copolímero SBS **10**
Figura 5 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de flexibilidade. **25**
Figura 6 – Corpos-de-prova de CAP-20 modificados com BMP após a realização do ensaio de resistência à tração e alongamento **30**
Figura 7. Valores médios de Tensão (σ_m) em função do Teor de borrachas(%) **32**
Figura 8. Valores médios de Alongamento(ε_m) em função do Teor de borrachas (%) **32**
Figura 9. Deformação Permanente (DP) em função do Teor de borrachas (%) **33**
Figura 10. Recuperação Elástica (RE) versus Teor de borrachas **35**
Figura 11. Distribuição granulométrica das borrachas: SBS, BMP #30 e BMP #40 através das peneiras ABNT #20, #30, #40, #50, #100 e #200 **37**
Figura 12. Micrografia do CAP-20 modificado com 4% de SBS **38**
Figura 13. Micrografia do CAP-20 modificado com 8% de SBS **38**
Figura 14. Micrografia do CAP-20 modificado com 12% de SBS **39**
Figura 15. Dispersão nº 7 contida na norma DIN EN 13632 **39**
Figura 16. Dispersão nº 3 contida na norma DIN EN 13632 **40**
Figura 17. Dispersão nº 9 contida na norma DIN EN 13632 **40**
Figura 18. Micrografia do CAP-20 modificado com 12% de SBS **42**
Figura 19. Micrografia do CAP-20 modificado com 12% de BMP #40 **42**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição de pneus de automóveis e caminhões **12**
Tabela 2 – Composição do Cimento Asfáltico de Petróleo **16**
Tabela 3. Resultados obtidos nos ensaios de: ponto de amolecimento (PA), penetração(PN), flexibilidade e escorrimento para o CAP-20 não modificado **23**
Tabela 4. Resultados obtidos nos ensaios de: ponto de amolecimento (PA), penetração (PN), flexibilidade e escorrimento para o CAP-20 modificado por SBS **23**
Tabela 5. Resultados obtidos nos ensaios de: ponto de amolecimento (PA), penetração (PN), de flexibilidade e escorrimento para o CAP-20 modificado por BMP #30 **23**
Tabela 6. Resultados obtidos nos ensaios de ponto de amolecimento (PA), de penetração(PN), de flexibilidade e escorrimento para o CAP-20 modificado por BMP #40 **23**
Tabela 7. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento(ε_m) na carga máxima para o CAP-20 não modificado **26**
Tabela 8. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para o CAP-20 modificado por 4% de SBS **26**
Tabela 9. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para o CAP-20 modificado por 8% de SBS **27**
Tabela 10. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para o CAP-20 modificado por 12% de SBS **27**
Tabela 11. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 4% de BMP #30 **28**
Tabela 12. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 8% de BMP #30 **28**
Tabela 13. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento(ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 12% de BMP #30 **28**
Tabela 14. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 4% de BMP #40 **29**
Tabela 15. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 8% de BMP #40 **29**
Tabela 16. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento(ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 12% de BMP #40 **29**
Tabela 17. Valores médios de tensão (σ_m) calculados na carga máxima para o CAP-20 e CAP-20 modificado por: SBS, BMP #30 e BMP #40 **31**
Tabela 18. Valores médios de alongamento(ε_m) calculados na carga máxima para o CAP-20 e CAP-20 modificado por: SBS, BMP #30 e BMP #40 **31**
Tabela 19. Valores médios de Deformação Permanente (DP) calculados para o CAP-20 e CAP-20 modificado por:SBS, BMP #30 e BMP #40 **33**
Tabela 20. Valores médios de Recuperação Elástica (RE) calculados para o CAP-20 e CAP-20 modificado por:SBS, BMP #30 e BMP #40 **34**
Tabela 21. Valores de Separação de Fase (SF) calculados para os asfaltos modificados por: SBS, BMP #30 e BMP #40 **36**
Tabela 22. Valores de Densidade Relativa (DR) calculados para os asfaltos modificados por: SBS, BMP #30 e BMP #40 **36**

RESUMO

Este trabalho apresenta uma comparação de propriedades entre o cimento asfáltico de petróleo (CAP-20) e o mesmo CAP-20 modificado pela utilização de diferentes tipos de borrachas, visando avaliar uma alternativa para minimizar os problemas ambientais causados pela disposição de pneus usados. Foram preparadas misturas contendo 4, 8 e 12% em massa de SBS (estireno-butadieno-estireno) e Borracha Moída de Pneus (BMP) em duas granulometrias diferentes. Os comportamentos dessas misturas foram avaliados pelos ensaios de: penetração, ponto de amolecimento, separação de fase, resistência à tração, alongamento, flexibilidade, deformação permanente e recuperação elástica. Os resultados mostraram que é possível dispersar borracha de pneu em asfalto, embora os valores obtidos para as propriedades medidas não sejam tão favoráveis quanto às obtidas com SBS.

ABSTRACT

This work presents a comparison of properties between a CAP-20 asphalt and the same CAP modified using different kinds of rubbers, as a way to evaluate an alternative to minimize the environmental problems related to the disposal of used tires. Mixtures with 4, 8 and 12 wt% of SBS and two different particle size of scraped tire were prepared. The behaviors of these mixtures were evaluated by penetration, softening point, phase separation, tensile strength, elongation, flexibility, permanent deformation and elastic recovery tests. The results showed that it is possible to disperse tire rubber in asphalt, although the values obtained for some of the measured properties are not as good as the ones obtained with SBS.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com a qualidade do meio ambiente, cada vez mais agredido, voltou-se para os pneus descartados na natureza e que constituem nos países mais desenvolvidos, um enorme passivo ambiental[1].

Nos países da Comunidade Econômica Européia são descartados cerca de 180 milhões de pneus anualmente, e outros 150 milhões somente nos EUA, onde 3 bilhões de pneus formam montanhas em áreas desérticas, porém sob iminente ameaça de devastadores incêndios, liberando gases tóxicos na atmosfera. A disposição em aterros sanitários tem se mostrado inadequada, fazendo a comunidade européia estabelecer a partir de 2003, que os aterros sanitários não poderão mais receber pneus inteiros e, a partir de 2006, nem os fragmentados[1].

No Brasil, 110 milhões de pneus velhos estão espalhados em aterros, terrenos baldios, rios e lagos, segundo estimativa da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP). A cada ano, dezenas de milhões de pneus novos são fabricados no País e no mundo, agravando o problema do descarte. Em 2003, foram 49,2 milhões de pneus produzidos, sendo 18 milhões exportados, aproximadamente. Suas principais matérias-primas, as borrachas vulcanizadas, sintética e natural, não se degradam facilmente e, quando queimadas, contaminam o meio ambiente com carbono, enxofre e outros poluentes. Esses pneus abandonados não são apenas um problema ambiental, mas também de saúde pública, acumulando água das chuvas, formando ambientes propícios à disseminação de doenças como a dengue e a febre amarela[1].

Pode-se considerar que o Brasil encontra-se em condição mais avançada na questão da disposição final dos pneus descartados. A resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio-Ambiente – CONAMA, publicada no Diário Oficial de 02 de Dezembro de 1999, determina que a partir de 1º de Janeiro de 2002, as empresas fabricantes e as empresas importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção relativa às quantidades fabricadas e/ou importadas[1,2].

Considerando-se a dificuldade de reciclagem dos pneus, outras alternativas foram criadas para a sua reutilização como: a regeneração da borracha para a produção de peças utilitárias, a aplicação em obras de engenharia civil, a geração de energia e a modificação de asfalto[1,3].

Das alternativas citadas, apenas dois mercados apresentam potencial para uso de um número significativo de pneus: o de modificação de asfalto e o energético[3].

Em pavimentação, a modificação dos ligantes asfálticos com a adição de borracha de pneus, vem sendo considerada atrativa, para a melhoria das propriedades dos materiais betuminosos, principalmente em relação à resistência à fadiga, à redução ao desgaste e ao envelhecimento[4].

Existe, em nível mundial, uma substancial experiência na utilização de misturas asfálticas com ligantes modificados por borracha de pneu, principalmente no Canadá, Austrália e particularmente nos Estados Unidos, a partir de 1970[4]. Entretanto, estudos sistemáticos envolvendo esses materiais e aplicações são ainda pouco disponíveis na literatura técnica.

No Brasil, várias pesquisas vêm sendo realizadas por empresas e por universidades no que diz respeito à modificação de asfaltos com borracha de pneu, bem como a sua modificação com diversos polímeros. Em São Paulo, por exemplo, especialistas na área da Construção Civil apostam em materiais alternativos para pavimentação, estando as misturas de asfaltos com polímeros entre as opções para a cidade no futuro[5].

OBJETIVOS

Estudar a incorporação de borracha moída de pneus em asfaltos para impermeabilização na Construção Civil, comparando seu desempenho com o de asfaltos modificados por copolímeros SBS (estireno-butadieno-estireno), atualmente um dos polímeros mais empregados para este fim, comparando-os também com asfaltos sem adição de polímeros, numa tentativa de encontrar alternativas para problemas ambientais gerados pelo descarte de pneus.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Asfalto

O asfalto é sem dúvida nenhuma, um dos mais antigos materiais utilizado pelo homem. Escavações arqueológicas revelam o seu emprego em épocas anteriores à nossa era. Assim, na Mesopotâmia o asfalto era usado como aglutinante em trabalhos de alvenaria e construção de estradas. Os reservatórios de água e as salas de banho eram impermeabilizados com asfalto[6-8].

Citações bíblicas revelam o seu emprego como impermeabilizante na arca de Noé[6,7]. Os egípcios utilizaram o asfalto em trabalhos de mumificação[8]. Tem-se notícia de impermeabilizações de terraços, piscinas e outros, desde 3.000 a.C. Isto se deve certamente às suas características bastante apropriadas a este uso: são aglomerantes, hidrófugos, quimicamente inertes e apresentam sensibilidade à temperatura, o que facilita a sua aplicação[9].

As pavimentações asfálticas pioneiras datam de 1802 na França, 1838 nos Estados Unidos (Filadélfia) e 1869 na Inglaterra e foram executadas com asfaltos naturais provenientes de jazidas. A partir de 1909, iniciou-se o emprego de asfalto derivado de petróleo o qual, pelas suas características de economia e pureza em relação aos asfaltos naturais, constitui atualmente a principal fonte de suprimento[6,7].

Os asfaltos são materiais aglutinantes, de cor escura, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molar. Originam-se do petróleo onde estão dissolvidos e a partir do qual podem ser obtidos seja pela evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre (asfaltos naturais) ou por destilação em unidades industriais especialmente projetadas[6,7,8].

Os asfaltos naturais podem ocorrer em depressões da crosta terrestre, constituindo os lagos de asfaltos (Trinidad, Bermudas), ou aparecem impregnando os poros de algumas rochas, formando as denominadas rochas asfálticas (asfaltita e gilsonita). Encontram-se também misturados em impurezas minerais (areias e argilas), em quantidades variáveis, sendo geralmente submetidos a processos de purificação para serem aplicados em pavimentação[8].

Atualmente, a maior parte do asfalto produzido no mundo é extraído do petróleo, do qual é obtido isento de impurezas, sendo solúvel em tricloroetileno[8].

Para a obtenção de asfalto, o petróleo é submetido ao processo de destilação, no qual as frações leves (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 baixas, o estágio final consta de destilação à vácuo evitando-se assim, o craqueamento do asfalto com a conseqüente perda de suas propriedades aglutinantes. O produto obtido no fundo da torre de vácuo, após a remoção dos demais destilados de petróleo, quando enquadrado nas Especificações Brasileiras é denominado *cimento asfáltico de petróleo* (CAP)[8].

O CAP é um material termoplástico, (amolece quando aquecido e reversivelmente endurece quando resfriado), e portanto, termosensível. Pela ação do ar e do calor, sofre oxidação, o que provoca um aumento na sua consistência, tornando-o quebradiço. Esta oxidação é conhecida como envelhecimento do CAP[10].

A Petrobrás possui o monopólio de distribuição do produto, mas cada refinaria vende um CAP diferente, porque a empresa importa diferentes tipos de petróleo. A falta de homogeneidade das características do CAP, é um dos problemas da produção nacional que afetam a qualidade do asfalto[11].

O cimento asfáltico de petróleo pode ser obtido em diferentes consistências, medidas pelos ensaios de penetração ou viscosidade dinâmica. O elemento aglutinante ativo, que constitui o asfalto, denomina-se betume. Com o objetivo de estabelecer distinção entre esses dois termos define-se[8]:

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 do petróleo.

Betume: Misturas 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.

2.2 Classificação dos Asfaltos

Cerca de 95% dos asfaltos fabricados no Brasil são utilizados em trabalhos de pavimentação, destinando-se uma pequena parcela às aplicações industriais, como impermeabilizante, como isolante, dentre outros[8].

De acordo com a sua aplicação, os asfaltos classificam-se em dois grupos [8]:

Asfaltos para pavimentação:

- Cimentos Asfálticos,
- Asfaltos Diluídos,
- Emulsões Asfálticas,
- Asfaltos Modificados.

Asfaltos Industriais (para outras finalidades):

- Asfaltos Oxidados,
- Asfaltos Modificados para Impermeabilização.

Os CAP's que são produzidos no Brasil seguem a classificação por penetração e viscosidade[12]:

RLAM-Refinarias de Mataripe (Bahia) / ASFOR (Ceará) - Classificação por penetração:

	CAP 30/45	CAP 50/60	CAP 85/100
Penetração (100g,5s,25ºC)	30 a 45	50 a 60	85 a 100

Demais refinarias - Classificação por viscosidade:

	CAP-7	CAP-20	CAP-40
Viscosidade (Poise, 60ºC)	700 a 1500	2000 a 3500	4000 a 8000

Principais ensaios para cimentos asfálticos[7]:

- Penetração: indica a consistência do cimento asfáltico.
- Ponto de Fulgor (*flash point*): tem como objetivo a determinação da máxima temperatura a que se pode aquecer um asfalto sem perigo de incêndio.
- Ductilidade: é a medida do alongamento sem ruptura de uma amostra padrão de cimento asfáltico submetida à tração sob determinadas condições de velocidade e temperatura. Este ensaio constitui uma medida da coesão do asfalto.
- Ponto de Amolecimento: como os cimentos asfálticos não possuem ponto de fusão, o ensaio do ponto de amolecimento determina a temperatura em que o asfalto adquire a consistência, que corresponde, aproximadamente, ao ponto de fusão.
- Susceptibilidade: capacidade de um asfalto modificar sua consistência com maior ou menor intensidade, numa certa faixa de temperatura.

2.3 Composição Química do CAP

Os CAP's são compostos por 90 a 95% de hidrocarbonetos, 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio) e traços de metais como: vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio, que encontram-se na forma de sais inorgânicos e óxidos. A análise elementar de cimento asfáltico de petróleo de diferentes petróleos mostra aproximadamente a seguinte constituição[13,14]:

- Carbono 82 – 88%
- Hidrogênio 8 – 11%
- Enxofre 0 – 6%
- Oxigênio 0 – 1,5%
- Nitrogênio 0 – 1%

Sua composição é extremamente complexa, no entanto, é possível separá-lo em dois grupos químicos denominados: asfaltenos e maltenos. Os maltenos, por sua vez, podem ser separados em: saturados, resinas e aromáticos. Esta metodologia é descrita na norma ASTM D4124, onde os asfaltenos separam-se primeiro por precipitação, com a adição de n-heptano, e os maltenos, solúveis em n-heptano, são separados por cromatografia de adsorção. Esses componentes possuem as seguintes propriedades[13,14] :

- Asfaltenos: contribuem para a melhoria da suscetibilidade térmica e o aumento da viscosidade (Figura 1);
- Aromáticos: agem como plastificantes, contribuindo para a melhoria de suas propriedades físicas (Figura 2);
- Saturados: influenciam negativamente a suscetibilidade térmica, pois, em maior concentração amolecem o produto (Figura 3);
- Resinas: influenciam negativamente a suscetibilidade térmica, porém, contribuem para a melhoria da ductilidade e favorecem a dispersão dos asfaltenos.

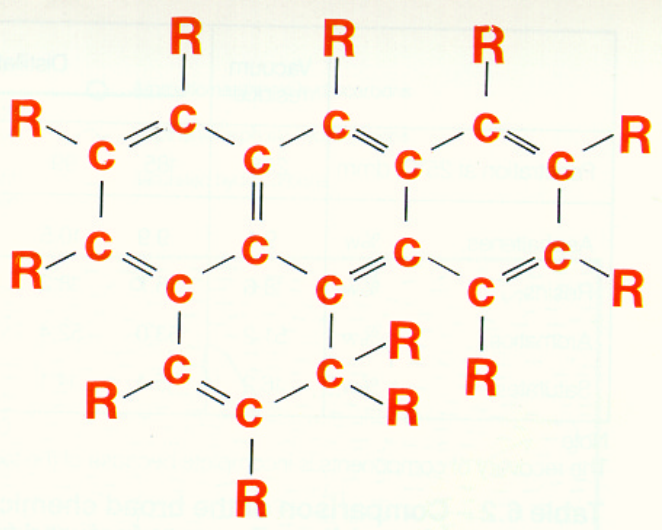


Figura 1 – Estrutura típica dos asfaltenos. **R** representa cadeias alifáticas, naftênicas ou aromáticas.

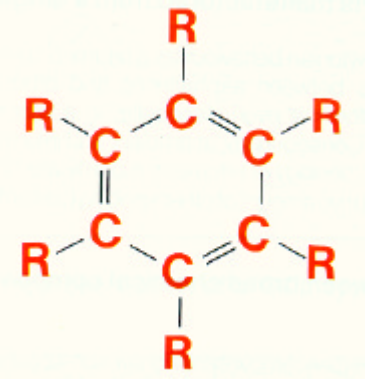
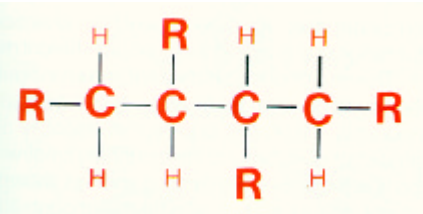


Figura 2 – Estrutura típica dos aromáticos. **R** representa cadeias naftênicas e/ou aromáticas.



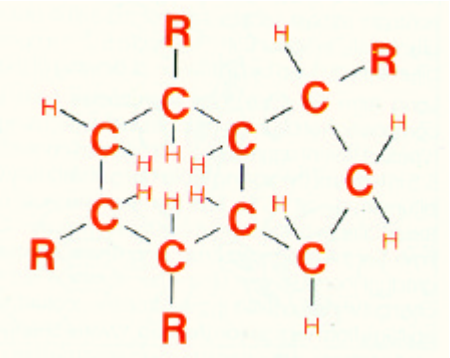


Figura 3 – Estrutura típica dos saturados: alifático (esquerda), cíclico (direita). **R** representa cadeias alifáticas e/ou naftênicas.

2.4 Asfaltos Modificados por Polímeros

Data das primeiras décadas do século XX, o emprego dos cimentos asfálticos modificados por polímeros. Ficou célebre, o trecho rodoviário construído na Holanda (Amsterdam em 1936), com um CAP-Elastômero que apresentou ótimo desempenho durante a IIª Guerra Mundial, durante a invasão e retirada alemã (tráfego de tanques de guerra) deixando maravilhados os engenheiros rodoviários[15].

As duas crises do petróleo (1973 e 1979) provocaram nos países desenvolvidos, a utilização de petróleos não tradicionais produzindo CAP's de pior qualidade. Devido à necessidade de melhora desses materiais, foi notado um crescimento nas pesquisas sobre cimentos asfálticos modificados por polímeros a partir da década de 70[15], que vem se estendendo até os dias atuais.

Acredita-se que os melhores polímeros para beneficiar os CAP's, sejam aqueles de elevada massa molar, que criem na estrutura desses, um emaranhado molecular que resulte numa *efetiva rede elástica* [15].

Os asfaltos modificados por polímeros são obtidos a partir da incorporação do polímero no CAP, em unidade apropriada, podendo ou não envolver reação química. Os cimentos asfálticos, que se prestam à modificação, são aqueles que apresentam compatibilidade com o polímero [15].

Os polímeros mais amplamente utilizados na modificação de asfaltos, para fins rodoviários são: o SBS (copolímero em bloco estireno-butadieno-estireno), SBR (borracha de butadieno-estireno) e EVA (copolímero de etileno-acetato de vinila)[8].

Os polímeros quando adicionados ao asfalto, podem alterar profundamente o seu comportamento reológico e melhorar as suas propriedades mecânicas, numa grande faixa de temperatura[8].

As principais vantagens dos asfaltos modificados por polímeros são[8]:

- Diminuição da suscetibilidade térmica,
- Elevação do Ponto de amolecimento,
- Maior resistência à deformação permanente,
- Melhor característica adesiva e coesiva,
- Melhor resistência ao envelhecimento.

2.5 Compatibilidade Asfalto-Polímero

Para a observação da compatibilidade e aparência da dispersão asfalto-polímero é usado o método de microscopia de fluorescência ao ultravioleta. A níveis microscópicos, correspondendo a ampliações na faixa de 500 a 1000, a maioria das misturas asfalto-polímero observadas, exibem pronunciada heterogeneidade. Entre as misturas asfalto-polímero a distinção é feita da seguinte forma: misturas cuja fase contínua é uma matriz polimérica, em que os glóbulos de asfalto estão dispersos e misturas cuja fase contínua é uma matriz asfáltica, em que as partículas de polímeros estão dispersas[16].

2.6 Asfaltos Modificados por Polímeros e a Impermeabilização

Define-se impermeabilização na Construção Civil, como sendo a proteção da construção contra a passagem de líquidos[17].

Pode-se dizer que a impermeabilização é, dentro da Construção Civil, um serviço especializado. É um setor que exige uma certa experiência, no qual os detalhes assumem um papel importante e onde uma mínima falha, mesmo que localizada, pode comprometer todo o serviço[17].

A impermeabilização é dividida em duas partes: a impermeabilização das superfícies principais, que recobrem grandes áreas sem variações bruscas de inclinação e a impermeabilização que protege cantos e arestas, as entradas de coletores de águas pluviais, as juntas de dilatação e todas as demais singularidades da cobertura, partes conhecidas como detalhes de impermeabilização[17].

A norma NBR-8083 define Sistema de Impermeabilização, como o conjunto de materiais que uma vez aplicados conferem impermeabilidade às construções. Dessa forma, um sistema de impermeabilização é caracterizado não só pelos materiais, mas também pela técnica de aplicação. Os mesmos materiais, aplicados de maneiras diferentes, podem gerar sistemas de impermeabilização diversos[17].

O setor de impermeabilização não sofreu grandes alterações em relação a conceitos e técnicas nos últimos anos. Impermeabilizar, porém se tornou uma tarefa muito mais fácil e eficiente. A evolução no período se deve, em grande parte, às inovações tecnológicas proporcionadas pelo acréscimo de polímeros em materiais já consagrados anteriormente[18].

As indústrias de impermeabilizantes preocupadas com as limitações naturais do asfalto, bem como, as mudanças arquitetônicas na Construção Civil, vem obtendo sucesso no desenvolvimento de produtos que atendam essas novas necessidades, utilizando asfaltos

modificados por polímeros. A melhor modificação de asfalto advém de uma perfeita seleção do tipo e da quantidade de polímeros, que vão ser introduzidos no asfalto. O resultado da mistura deve ter as seguintes características: baixa termo-sensibilidade (ponto de amolecimento alto), boa resistência à fadiga, boa elasticidade (capacidade de retorno à posição original), baixa viscosidade em temperatura normal de uso, flexibilidade quando submetido à baixas temperaturas e resistência ao envelhecimento[19].

Dentre os polímeros, que vem sendo utilizados na modificação dos asfaltos para fins de impermeabilização, pode-se citar: SBS, APP (polipropileno atático), borracha vulcanizada e resina epóxi[8].

2.7 Asfaltos Modificados por Borrachas

2.7.1 Copolímero em bloco SBS

Os elastômeros termoplásticos (*TPE* ou *TE – Thermoplastic Elastomers*) são um tipo de material polimérico que, nas condições ambiente exibem comportamento elastomérico (ou de borracha), mas que no entanto, possuem natureza termoplástica. Das variedades de TPE, uma das mais conhecidas e utilizadas, é um copolímero em bloco, que consiste em segmentos de blocos de um mero termoplástico duro e rígido, o estireno (S), e um mero elástico mole e flexível, o butadieno (B). Os segmentos polimerizados duros, estão localizados nas extremidades das cadeias, enquanto que a região central mole, consiste em unidades polimerizadas de butadieno. Esse tipo de TPE, freqüentemente chamado de *copolímero em bloco estirênico*[20] é denominado SBS, ou seja, estireno-butadieno-estireno (Figura 4)[21].

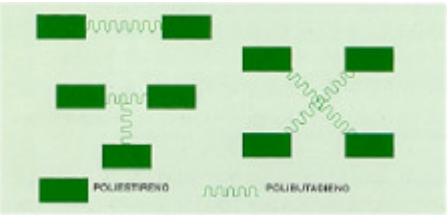


Figura 4 – Copolímero SBS[21]

À temperatura ambiente, os segmentos centrais (butadieno), moles e amorfos, conferem o comportamento elastomérico e emborrachado do material. Além do mais, para temperaturas abaixo da *Tf (temperatura de fusão)* do componente duro (estireno), os segmentos duros nas extremidades da cadeia de diversas cadeias adjacentes, se agregam para formar regiões rígidas independentes, chamadas *domínios*. Esses domínios independentes consistem em "ligações

cruzadas físicas", que atuam como pontos de fixação, cujo objetivo é restringir os movimentos dos segmentos moles das cadeias; eles funcionam de uma maneira semelhante às "ligações cruzadas químicas" para os elastômeros termofixos[20].

Assim, em determinadas condições de processo (temperatura, tempo, velocidade de mistura e equipamento adequado), o SBS se homogeneíza bem ao asfalto conferindo ao produto final: grande elasticidade, resistência à fadiga, resistência à tração, baixa deformação permanente, resistência ao escorrimento sob alta temperatura e flexibilidade a baixas temperaturas[19]. Quando o SBS é disperso no asfalto a quente, os domínios de poliestireno dissolvem-se completamente, assumindo características termoplásticas, que facilitam a mistura. Sob resfriamento, os blocos de poliestireno se associam novamente, promovendo um entrelaçamento entre as cadeias de polibutadieno, formando uma rede tridimensional, conferindo ao asfalto propriedades de resistência e elasticidade semelhantes aos da borracha vulcanizada[22].

2.7.2 Borracha de Pneu

A disposição final de pneus inservíveis representa um problema de difícil solução, o que evidencia a necessidade da elaboração de medidas para minimizar a geração dos mesmos. O aumento da duração da vida útil de um pneu e o aprimoramento das técnicas de recauchutagem, que prolonga a vida da carcaça, são dois fatores que permitem reduzir a geração desses resíduos e o número de pneus a dispor corretamente[2].

Os fabricantes têm procurado desenvolver tecnologias que aumentam a durabilidade dos pneus. Na Europa, a durabilidade de um pneu de passeio é da ordem dos 50.000 km. Nos Estados Unidos, onde as condições de circulação são específicas, são comercializados pneus cuja duração de vida garantida chega a 130.000 km, correspondente à do próprio automóvel. Já são comercializados pneus utilizados em veículos de carga cuja durabilidade chega aos 300.000 km. Neste caso, quando são utilizados todos os recursos de recauchutagem, um pneu de carga pode chegar a percorrer cerca de 600.000 quilômetros[2].

O fato é que todo o pneu, em algum momento, se transformará em um resíduo potencialmente danoso à saúde pública e ao meio ambiente, e uma solução adequada para sua destinação final deve ser adotada. Têm sido realizadas pesquisas, particularmente no exterior, buscando o desenvolvimento de novas tecnologias para reutilizar pneus velhos, seja na sua forma inteira, como borracha reciclada ou como combustível na geração de energia[2].

No Brasil, existem alguns grupos de pesquisa que têm abordado o assunto[23-38]. Na Universidade de São Paulo, tanto no Laboratório de Matérias-Primas Particuladas e Sólidos

Não-Metálicos (LMPSol), do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, como em outros laboratórios da Escola Politécnica, diversos trabalhos de Pós-Graduação têm sido conduzidos na área, sendo que diversos deles constituem-se em trabalhos colaborativos com grupos de pesquisa de instituições tais como IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) e IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo).

Do ponto de vista ambiental, a reciclagem das matérias-primas do pneu seria a solução mais satisfatória, desde que se pudesse recuperar materiais de qualidade a um custo energético mínimo. Mas, o pneu não é verdadeiramente reciclável no sentido exato do termo. O seu caráter compósito, bem como a irreversibilidade da reação de vulcanização, tornam impossível a obtenção das matérias-primas iniciais[2].

No entanto, é possível recuperar e reutilizar parte dos pneus inservíveis. Os pneus são cortados e triturados, seguindo-se a isto operações de separação dos diferentes materiais, o que permite a recuperação dos materiais contidos nos pneus. Obtém-se, desse modo, borracha pulverizada ou granulada que pode ser utilizada para diversas aplicações como: misturas asfálticas, revestimentos de quadras e pistas de esportes, fabricação de tapetes automotivos, adesivos, dentre outras[2].

Os pneus são compostos aproximadamente por 30% (em massa) de aço, 20 a 26% de borracha sintética e 21 a 33% de borracha natural. Geralmente, um pneu com cerca de 9 kg fornece entre 4,5 a 5,5 kg de borracha. Na Tabela 1 são apresentados os componentes químicos de pneus de automóveis e caminhões[39].

Tabela 1 – Composição dos pneus de automóveis e caminhões

COMPONENTES (% em massa)	**BANDA DE RODAGEM**		**PNEUS INTEIROS**	
	AUTOMÓVEL	CAMINHÃO	AUTOMÓVEL	CAMINHÃO
NEGRO DE FUMO	32,0	30,0	31,0	28,5
BORRACHA SINTÉTICA	37,0	23,0	26,0	21,0
BORRACHA NATURAL	5,0	27,0	20,0	33,0
SOLÚVEL EM ACETONA	21,0	16,0	19,0	12,5
SÍLICA	5,0	4,0	5,0	5,0

Fonte: HEIZTMAN, 1992b citada por Oda[39].

2.8 Estado da Arte

Trabalhos técnicos na área de modificação de asfaltos visando seu uso em impermeabilização na Indústria da Construção Civil, não são abundantes na literatura técnica. Estudos acadêmicos recentes reportam misturas de cimento asfáltico de petróleo (CAP) com vários polímeros, inclusive com SBS e borracha moída de pneus [14,39-43].

Oda[39], em sua tese de doutorado, assim como neste trabalho, também pesquisou a incorporação de borrachas de pneus em ligantes asfálticos, numa alternativa de solucionar o grave problema ambiental devido ao descarte de pneus, grande parte deles disposta em locais inadequados, representando risco de doenças e contaminação do meio-ambiente. Entretanto, seu trabalho foi direcionado para aplicações do sistema em pavimentação. Ela avaliou os efeitos de alguns fatores que influenciam o comportamento do sistema asfalto-borracha, tais como: temperatura da mistura, tempo de reação, teor e granulometria da borracha, através de ensaios tradicionais: ponto de fulgor, penetração, ponto de amolecimento, viscosidade Saybolt-Furol e ductilidade e ensaios do Método Superpave (conjunto de ensaios e especificações de materiais para pavimentação), que determinam propriedades fundamentais, diretamente relacionadas ao desempenho de pavimentos em uso. A autora utilizou planejamento fatorial de experimentos para que fossem avaliados não só o efeito dos fatores, mas também suas interações. Em seu trabalho, foram utilizados dois tipos de borrachas: uma fração mais grossa (passa em peneira #40 e fica retida na #50) e uma fração fina (passa na peneira #50 e fica retida na #100), nos seguintes teores: 6, 12, 18 e 24%.

Também aplicado à pavimentação, Leite[14], em sua pesquisa de doutorado, desenvolveu formulações e condições de preparo de asfaltos modificados com diferentes polímeros, tais como: SBS, EVA, SBR, PE e borracha moída de pneus (BMP). Nesse trabalho, diversas propriedades foram avaliadas, a partir dos seguintes ensaios: caracterização reológica dos asfaltos modificados (a várias temperaturas), efeito de compatibilizantes, obtenção de formulações estocáveis, redução da viscosidade de asfaltos modificados, comparação da elasticidade de asfaltos modificados pelos diferentes polímeros, dentre outros.

A busca de novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos asfálticos tem promovido o desenvolvimento e a utilização de asfaltos modificados por polímeros ou de seus resíduos. No trabalho de Cambuim[40] e colaboradores, foram preparadas misturas físicas contendo 0,5, 10, 15, 20% de borracha moída de pneu (BMP) e CAP-20, em presença ou não de enxofre elementar. Os resultados se mostraram promissores em relação à melhora das

propriedades visco-elásticas sugerindo possivelmente melhores propriedades como a redução da fragilização e degradação por intemperismo.

Com o objetivo de obter um CAP modificado por BMP que atendesse aos padrões técnicos recomendados pela *LandStar Polymer Asphalt, Inc. 2001*, foram estudadas por Santos[41] e seus colaboradores formulações de CAP 50/60 contendo 2, 5 ,8 ,12, 17 e 22% de BMP em presença e ausência de 10% de diluente. A composição SARA, a reologia, o envelhecimento pelo sistema RTFOT (estufa de filme fino rotativo), que simula os efeitos causados pela oxidação e perda de massa, foram estudados para o CAP original, com o objetivo de relacioná-los com as alterações ocorridas após a sua modificação. Para as formulações CAP/BMP foram realizados também os ensaios de penetração, resiliência, ponto de amolecimento e viscosidade. O CAP estudado apresentou alto teor de asfaltenos e baixo teor de aromáticos. A oxidação pelo sistema RTFOT ocasionou um aumento da fração de alta massa molar do CAP. Viscosidade, ponto de amolecimento e resiliência do CAP modificado aumentaram com o teor de BMP, enquanto que a penetração diminuiu. A incorporação de diluente melhorou a interação da mistura CAP/BMP, influenciando ainda as propriedades do produto final.

Como o processo de degradação do ligante asfáltico (envelhecimento) provoca a deterioração das estradas e conseqüentemente mudanças na composição e no comportamento reológico do ligante, o trabalho de Silva[42] e colaboradores, teve como objetivo monitorar e avaliar o envelhecimento de ligantes asfálticos (CAP-20) modificados por polímeros, tais como: SBS linear e EVA. Os ligantes puros e os modificados foram envelhecidos em estufa e em uma câmara de radiação UV. A avaliação do comportamento térmico e da estrutura química dos ligantes foi realizada através de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e FTIR. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que a técnica de DSC é apropriada para avaliar o envelhecimento de ligantes asfálticos e o efeito do polímero adicionado. O ligante modificado com EVA mostrou-se mais resistente ao envelhecimento térmico que aquele modificado com SBS. Através da técnica de FTIR pode-se monitorar as espécies formadas na oxidação e assim relacionar com o processo envolvido, UV e/ou calor.

Finalmente, estudos de envelhecimento de misturas asfálticas compostas por CAP modificado com 4,5% de SBS (pó) foram também realizados por Lucena[43] e seus colaboradores . As amostras de CAP, original e modificado, foram aquecidos em estufa de filme fino rotativo (RTFOT) e analisadas por espectroscopia de ^{13}C RMN (GATED inverso e DEPT135) e ^{1}H RMN em solução de clorofórmio deuterado. A análise dos espectros de ^{13}C RMN e de ^{1}H RMN permitiu a caracterização estrutural do CAP original e envelhecido. Compostos

naftênicos, aromáticos, saturados e olefinas foram identificados. O envelhecimento oxidativo do CAP original e do modificado resultou em uma diminuição no teor de carbonos aromáticos, possivelmente decorrentes de reações oxidativas com abertura de anéis aromáticos e formação de quinonas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP-20) foi fornecido pela Ipiranga Asfaltos S/A. O material é processado pela REPLAN – Refinaria do Planalto, localizada na região de Paulínia, São Paulo. Sua composição é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição do Cimento Asfáltico de Petróleo (Ipiranga Asfaltos S/A)

COMPONENTES DO CAP-20	CAP-20 REPLAN
Asfaltenos	13,1%
Saturados	8,7%
Aromáticos	42,3%
Resinas	35,9%

O Copolímero SBS foi fornecido pela Kraton Polymers do Brasil S/A. O Kraton D-1101BM é do tipo linear e apresenta-se na forma moída.

A Borracha Moída de Pneu (BMP) foi fornecida pela Artgoma do Brasil Ltda, em duas granulometrias diferentes, denominadas pelo fabricante como “malha #30” e “malha #40”. A distribuição granulométrica desses materiais foi determinada pelo uso de peneiras (Item 3.2.13).

3.2 Métodos

A seguir serão descritos os métodos de ensaio utilizados na determinação das propriedades das misturas estudadas. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentos e Impermeabilização, do Agrupamento de Infra-Estrutura Viária, Impermeabilização e Obras do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

3.2.1. Preparo dos Asfaltos Modificados

As misturas físicas de cimento asfáltico de petróleo (CAP-20) com as borrachas SBS e duas granulometrias diferentes de BMP (malhas #30 e #40), nos teores de 0,4,8 e 12% (em massa), foram preparadas a uma temperatura de 175ºC, permanecendo sob agitação durante três horas com o auxílio de um dispersor de alto cisalhamento.

3.2.2. Determinação da Penetração

Segundo a norma da ABNT / NBR-6576[44], penetração é a distância em décimos de milímetros, que uma agulha padrão penetra verticalmente em uma amostra de material, sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura. Salvo indicação contrária, o ensaio é efetuado a (25,0±0,1)ºC com (100,0±0,5) g durante 5 s.

A amostra previamente fundida foi colocada num recipiente apropriado, resfriada inicialmente à temperatura ambiente, permanecendo em banho de água com temperatura controlada. Em seguida as amostras foram submetidas à penetração por agulha padronizada no equipamento denominado penetrômetro (Sur Berlin-PNR 6). Foram realizadas de 3 a 5 leituras para cada amostra, sendo o resultado expresso pela média aritmética desses valores.

3.2.3. Determinação do Ponto de Amolecimento

De acordo com a norma da ABNT / NBR-6560[45] (Método do Anel e Bola), ponto de amolecimento, é a temperatura em graus Celsius, no momento em que o material betuminoso que envolve uma esfera metálica padronizada, atravessando um anel também padronizado, toca uma placa de referência, após ter percorrido uma distância de 25,4 mm.

As amostras foram fundidas e colocadas em moldes, que consistem de dois anéis de latão. Os anéis foram mantidos suspensos em um banho de água destilada a temperatura controlada e sobre cada um dos anéis, foi colocada uma bola de aço. O conjunto foi aquecido a uma taxa de aquecimento constante, fazendo a amostra amolecer e ceder ao peso da bola. Nesse instante, foram lidos os dois valores do ponto de amolecimento em ºC, correspondentes aos dois anéis. O equipamento utilizado foi da marca Solotest.

3.2.4. Moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios de Flexibilidade e Escorrimento

O preparo dos corpos-de-prova a serem submetidos aos ensaios de Flexibilidade e Escorrimento, consiste na aplicação do material asfáltico, em temperatura máxima de 180ºC, aquecido com fonte de calor indireta (banho de óleo térmico), sobre laminado de alumínio, apoiado em uma superfície rígida, dentro de formas com dimensões internas de 100 mm x 100mm x 1,60 mm. Os ensaios foram realizados 24 h após a aplicação do asfalto.

3.2.5. Ensaio de Flexibilidade à baixa temperatura

Com base na norma ASTM D-2939[46], três corpos-de-prova foram imersos em água com sal de cozinha e detergente biodegradável, mantidos à temperatura de (-5,0 ± 0,5)ºC, durante 1 h,

após o que foram ensaiados em mandril de 50 mm de diâmetro, ângulo de 180º durante 2 s. Como resultado favorável, os corpos-de-prova não deveriam trincar.

3.2.6. Ensaio de Escorrimento

Com base na norma ASTM D-2939[46], três corpos-de-prova foram mantidos em estufa à temperatura de (70 ± 1)ºC, na posição vertical; após 2 h deve-se verificar se houve escorrimento da parte inferior dos corpos-de-prova. Como resultado favorável, não deve haver escorrimento ou deslocamento do asfalto aplicado sobre o laminado de alumínio. Neste ensaio foi utilizada uma Estufa de Secagem e Esterilização da marca Fanem – modelo 320-SE com circulação mecânica.

3.2.7. Determinação da Resistência à Tração e Alongamento

Tomando como base a norma NBR-7462[47] para elastômeros vulcanizados, foram preparados sete corpos-de-prova com dimensões de 50 mm de largura (L) por 150 mm de comprimento, cortados a partir de placas previamente moldadas, marcados na sua porção paralela central com dois traços paralelos e presos pelas extremidades às garras da máquina, tomando-se o cuidado de regulá-lo simetricamente, de modo que a tensão se distribuísse uniformemente em qualquer seção transversal. A Máquina Universal de Ensaios foi acionada, observando-se continuamente a distância entre os centros dos traços de referência do alongamento. A temperatura do ensaio foi mantida entre (23 ± 2)ºC, a distância entra garras foi de 80 mm e a velocidade de separação entre as garras foi de (480 ± 20) mm/min.

Antes da realização dos ensaios foram medidas todas as espessuras – e_i (mm) de todos os corpos-de-prova e calculadas as respectivas médias – e (mm).

Os parâmetros lidos durante a realização desses ensaios foram: carga máxima - C_m (kgf), posteriormente convertida em C_m (N), alongamento na carga máxima - A_m (mm) e alongamento no curso final da máquina -A_f (mm).

Com base nesses dados foram calculados os valores de: tensão, σ_m (MPa) e alongamento ε_m (%) na carga máxima.

- Cálculo da Tensão (σ_m):

$$\sigma_m = C_m (N) / e. L$$

- Cálculo do Alongamento (ε_m):

$$\varepsilon_m = (A_m / 80) . 100$$

3.2.8. Determinação da Deformação Permanente

Cada corpo-de-prova com dimensões de 150 mm x 50 mm, permaneceu deformado a 50% em relação à distância inicial entre garras (40 mm) utilizando-se a Máquina Universal de Ensaios, pelo período de 1 h. A medida da deformação final do corpo-de-prova, foi realizada 1 h após o mesmo ter permanecido sob relaxamento.

As espessuras – e_i (mm) de todos os corpos-de-prova também foram medidas. O ensaio foi baseado na norma NBR-7462[47] e os resultados finais, calculados pela média aritmética de três determinações. Foi ensaiado apenas um corpo-de-prova para cada composição de asfalto.

Foi feita uma leitura inicial correspondente a L_i = 80 mm para todos os corpos-de-prova ensaiados e após o relaxamento de 1 h uma nova leitura L_f (mm). A deformação permanente – DP (%) foi calculada pela seguinte equação:

$$DP = (L_f – L_i / L_i) . 100$$

3.2.9. Determinação da Recuperação Elástica

As amostras de CAP e CAP modificado foram aquecidas até se tornarem suficientemente fluidas e colocadas em moldes. Após atingirem a temperatura ambiente, foram colocados em banho, à temperatura de ensaio 25ºC durante 30 minutos. Retirados do banho, os moldes foram aparados com o auxílio de uma faca aquecida, colocados no ductilômetro, tracionados a uma velocidade uniforme de 5 cm/min até alongamento de 20 cm e seccionado no seu ponto médio com uma tesoura. Os corpos-de-prova permaneceram na máquina de ensaio cobertos por água durante 60 minutos, sem sofrer nenhuma perturbação. A recuperação elástica foi determinada a partir da medição do alongamento residual do corpo-de-prova, após a junção das extremidades. Estes ensaios foram realizados com base na norma NBR-15086[48].

A recuperação elástica – RE (%) foi calculada como segue:

$$RE (\%) = (E – X / E) . 100$$

Em que:

- E é o comprimento após a tração da amostra
- X é o comprimento da amostra após a justaposição das pontas

A tendência para este método não foi determinada por não existir material de referência adequado[48].

3.2.10. Ensaio de Separação de Fase

De acordo com a norma NBR-15166[49], um suporte com tubos selados de alumínio contendo asfalto modificado por SBS e BMP, foi colocado em uma estufa a (163±5)ºC por um período de (48±1) h. Ao final desse período, o suporte foi removido da estufa e colocado no refrigerador a (-6,7±5)ºC na posição vertical durante aproximadamente 4 h, para que a amostra ficasse completamente solidificada. Retirados do refrigerador, os tubos foram colocados numa superfície plana, sendo cada tubo cortado em três partes de mesmo comprimento. A seção central foi descartada e as seções superior (topo) e inferior (fundo), foram utilizadas para a determinação do ponto de amolecimento (PA). A diferença entre estes pontos de amolecimento permitiu uma avaliação da estabilidade à estocagem, isto é da compatibilidade dos sistemas, em função de eventual separação de fases do asfalto modificado.

Cálculo da separação de fase (SF):

$$SF = PA(Topo)ºC - PA(Fundo)ºC$$

3.2.11. Ensaio de Densidade Relativa para o CAP-20

A amostra de CAP-20 foi colocada em um picnômetro calibrado, preenchendo cerca de ¾ do seu volume. Pesada a amostra e o picnômetro, o volume remanescente foi preenchido com água. O picnômetro cheio foi mantido a (25,0±0,1)ºC e pesado. A densidade da amostra foi calculada a partir da sua massa e da massa de água deslocada pela amostra do picnômetro cheio. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 6296[50].

Cálculo da Densidade Relativa (DR) do CAP-20:

$$DR = C-A / (B-A) – (D-C)$$

Em que:

A é a massa do picnômetro com tampa

B é a massa do picnômetro cheio com água

C é a massa do picnômetro parcialmente cheio com CAP-20

D é a massa do picnômetro mais CAP-20 e água

3.2.12. Ensaio de Densidade Relativa para os Asfaltos Modificados

De acordo com a norma ASTM D-71[51] , as amostras previamente moldadas em cubos (1 cm x 1 cm x 1 cm), foram colocadas em um suporte de metal e pesadas, primeiramente ao ar e depois submersas em água a 25ºC. A densidade relativa dos asfaltos modificados foi calculada da seguinte forma:

$$DR = a / (a - b)$$

Em que:

- a é massa da amostra ao ar
- b é a massa da amostra em água a 25ºC

3.2.13. Análise Granulométrica

Foram realizadas as análises granulométricas dos seguintes materiais: SBS, BMP#30 e BMP#40. Cada amostra foi pesada e seu conteúdo passado através das seguintes peneiras padronizadas ABNT: #20 (abertura = 0,85 mm), #30 (0,60 mm), #40 (0,425 mm), #50 (0,30mm), #100 (0,15 mm), #200 (0,075 mm). Todas as peneiras foram colocadas simultaneamente em um vibrador de peneiras, lá permanecendo por 70 min. Após esse período, a massa de material retida em cada peneira foi determinada e então expressa em termos porcentuais.

3.2.14. Morfologia

3.2.14.1 Microscopia de Fluorescência

A norma DIN EN 13632[52] estabelece um procedimento para a visualização da distribuição de polímero em asfalto modificado por polímero, pela utilização de um microscópio de fluorescência.

Com base nesta norma, a amostra de asfalto modificado por polímero SBS, foi homogeneizada por agitação e despejada sobre um papel siliconado. Depois de atingir a temperatura ambiente, a amostra foi resfriada até uma temperatura inferior a -20ºC. Assim, a camada de asfalto foi quebrada ou cortada com bisturi, com ventilação, para evitar o aquecimento da amostra, e sua superfície recém quebrada ou cortada, foi analisada em microscópio Olympus, modelo BX-FLA. As imagens foram registradas por fotografias.

3.1.14.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

As amostras de asfalto modificado por SBS e BMP foram observadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) de marca Philips, modelo XL-30.

Esta técnica tem como principal aplicação a análise da morfologia de superfícies, sendo a imagem formada por elétrons retroespalhados e por elétrons secundários. Se o feixe de elétrons incidir sobre uma protuberância, a imagem obtida será clara e se o feixe incidir sobre uma cavidade, a imagem obtida será escura[53].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaios de Penetração e Ponto de Amolecimento

Os resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento são apresentados nas Tabelas de 3 a 6, primeiramente para o CAP-20 não modificado e na seqüência para o CAP-20 modificado por SBS, BMP#30 e BMP #40.

Tabela 3. Resultados obtidos nos ensaios de: ponto de amolecimento (PA), penetração(PN), flexibilidade e escorrimento para o CAP-20 não modificado

PA (ºC)	PN (10^{-1} mm)	FLEXIBILIDADE	ESCORRIMENTO
48	28	Trincou	Escorreu

Tabela 4. Resultados obtidos nos ensaios de: ponto de amolecimento (PA), penetração (PN), flexibilidade e escorrimento para o CAP-20 modificado por SBS

TEOR (%)	PA (ºC)	PN (10^{-1} mm)	FLEXIBILIDADE	ESCORRIMENTO
4	63,0	22,9	Trincou	Escorreu
8	102,5	27,8	Trincou	Não Escorreu
12	109,5	28,6	Não Trincou	Não Escorreu

Tabela 5. Resultados obtidos nos ensaios de: ponto de amolecimento (PA), penetração (PN), de flexibilidade e escorrimento para o CAP-20 modificado por BMP #30

TEOR (%)	PA (ºC)	PN (10^{-1} mm)	FLEXIBILIDADE	ESCORRIMENTO
4	61,5	21,6	Trincou	Escorreu
8	57,3	27,6	Trincou	Escorreu
12	58,5	39,0	Trincou	Escorreu

Tabela 6. Resultados obtidos nos ensaios de ponto de amolecimento (PA), de penetração(PN), de flexibilidade e escorrimento para o CAP-20 modificado por BMP #40

TEOR (%)	PA (ºC)	PN (10^{-1} mm)	FLEXIBILIDADE	ESCORRIMENTO
4	60,9	18,4	Trincou	Escorreu
8	58,0	29,3	Trincou	Escorreu
12	59,0	37,9	Trincou	Escorreu

Em relação ao CAP puro, os resultados obtidos mostram que os pontos de amolecimento do CAP modificado pelos três tipos de borrachas utilizadas: SBS, BMP malhas #30 e #40 aumentaram e os valores de penetração para todas as amostras contendo 4% de borracha diminuíram. Para 8% de SBS e BMP e ainda 12% de SBS esses valores permaneceram praticamente constantes, enquanto que para as amostras contendo 12% de BMP os valores de penetração aumentaram.

Considerando o aumento de teores para cada tipo de borracha utilizada, pode ser constatado que para o SBS, o aumento dos valores para os ensaios de penetração não é significativo, enquanto que seus pontos de amolecimento tiveram um aumento mais pronunciado. Para as modificações feitas com as duas granulometrias de BMP, os pontos de amolecimento praticamente permaneceram constantes, enquanto que os valores de penetração aumentaram.

De acordo com Oda[39], que pesquisou misturas de asfalto-borracha (BMP) em duas granulometrias #40 e #50, pode-se dizer que o comportamento previsto é que a adição de teores cada vez maiores de borracha torne o asfalto mais consistente, resultando em valores mais baixos de penetração. Entretanto, os resultados obtidos mostraram que a penetração aumenta até o teor de 12%. Em seu estudo, Oda[39] concluiu ainda que, para teores de 18 e 24%, os valores de penetração estabilizaram ou diminuíram. Em relação ao ensaio de penetração, Oda[39] cita também que para as condições climáticas no Estado de São Paulo, suas amostras atendem aos limites mínimo (25) e máximo (75) da especificação ASTM-D6114 (*Standard Specifications for Asphalt-Rubber Binder*) e que apenas as amostras contendo 12% atendem aos limites estabelecidos por Baker Rubber Inc. (limites: mínimo de 50 e máximo de 100). Comparando com os resultados desta pesquisa, verificou-se que a maioria das amostras atendem à ASTM-D6114, exceto para os teores de 4% de BMP #30 e BMP #40, mas não à Baker Rubber Inc., estando apenas os resultados obtidos para 12% de BMP #30 e BMP #40, mais próximos desses limites.

Em relação ao ponto de amolecimento, Oda[39] concluiu que este é crescente com o teor de borracha. Os resultados desta pesquisa mostraram que para o teor de 4% de BMP #30 e BMP #40, os valores do ponto de amolecimento se apresentaram maiores que para os respectivos contendo 8 e 12%, mas que todos eles aumentaram, quando comparados à amostra de CAP-20 sem modificação. Oda[39] também verificou que todas as suas amostras atenderam ao mínimo de 49ºC estabelecido por Baker Rubber Inc. e que apenas alguns ensaios para 6% de borracha apresentaram valores abaixo do limite mínimo de 54,4ºC exigido pela ASTM-D6114. Quanto aos resultados desta pesquisa, foi constatado que todas as amostras atendem tanto aos limites solicitados pela ASTM-D6114, quanto aos estabelecidos por Baker Rubber Inc. Vale ressaltar que esses parâmetros valem apenas para os materiais modificados com borracha de pneu (BMP).

4.2 Ensaios de Escorrimento e Flexibilidade

Os resultados dos ensaios de escorrimento e flexibilidade, encontram-se também nas Tabelas de 3 a 6.

Da análise desses resultados apresentados nas Tabelas 3 a 6, pode-se verificar a ocorrência de escorrimento para a maioria dos corpos-de-prova. Este resultado já era previsto para os materiais com pontos de amolecimento menores que o valor de temperatura de 70ºC especificada para a realização desse experimento. Os únicos corpos-de-prova que não apresentaram escorrimento, foram as amostras contendo 8 e 12% de SBS, atendendo assim ao especificado pela norma ASTM-D2939[46] .

Com relação aos ensaios de flexibilidade à baixa temperatura, apenas os corpos-de-prova com 12% de SBS não apresentaram trincas e, portanto, atenderam à solicitação da norma ASTM-D2939.

Na Figura 5 são mostrados alguns corpos-de-prova trincados, após serem submetidos ao ensaio de flexibilidade à baixa temperatura.

Figura 5 – Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de flexibilidade. A flecha indica o local onde o corpo-de-prova trincou.

4.3 Ensaios de Resistência à Tração e Alongamento

Com os dados obtidos pelos ensaios de tração e alongamento foram calculados os valores de tensão (σ_m) e alongamento (ε_m) na carga máxima. Os resultados para o CAP-20 não modificado são apresentados na Tabela 7. Os valores obtidos para o CAP-20 modificado com 4, 8 e 12% de SBS encontram-se nas Tabelas 8, 9 e 10, respectivamente. Para o modificado

com BMP #30 nas Tabelas 11, 12 e 13 e finalmente, para o modificado com BMP #40, nas Tabelas 14, 15 e 16. Para cada composição, foram ensaiados 7 corpos-de-prova, denominados de CP1 a CP7, sendo que os corpos-de-prova de 1 a 4 foram testados logo após sua moldagem, enquanto que os corpos-de-prova de 5 a 7 foram testados após envelhecimento em condições ambientes de laboratório, por um tempo médio de 20 dias. As médias dos resultados das duas sequências de ensaios foram denominadas, respectivamente, CP1-4 e CP5-7.

Tabela 7. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento(ε_m) na carga máxima para o CAP-20 não modificado

CAP-20 Não Modificado		
	s_m (MPa)	**e_m (%)**
CP1	0,31	19,75
CP2	0,21	31,75
CP3	0,21	33,50
CP4	0,21	33,38
CP1-4	**0,23**	**29,59**
CP5	0,19	29,00
CP6	0,32	24,50
CP7	0,28	26,50
CP5-7	**0,27**	**26,67**

Nenhum corpo-de-prova rompeu

Tabela 8. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para o CAP-20 modificado por 4% de SBS

CAP-20 + 4% SBS		
CP	**s_m (MPa)**	**e_m (%)**
CP1	0,29	44,75
CP2	0,28	45,88
CP3	0,25	47,88
CP4	0,26	50,75
CP 1-4	**0,27**	**47,31**
CP5	0,39	58,13
CP6	0,39	60,00
CP7	0,32	50,25
CP 5-7	**0,37**	**56,13**

Nenhum corpo de prova rompeu

Tabela 9. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para o CAP-20 modificado por 8% de SBS

CAP-20 + 8% SBS		
	s_m (MPa)	e_m (%)
CP1	0,33	62,50
CP2	0,36	62,25
CP3	0,31	49,75
CP4	0,31	37,25
CP 1-4	**0,33**	**52,94**
CP5	0,57	57,00
CP6	0,54	46,00
CP7	0,58	61,13
CP 5-7	**0,56**	**54,71**

Nenhum corpo-de-prova rompeu

Tabela 10. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para o CAP-20 modificado por 12% de SBS

CAP-20 + 12% SBS		
	s_m (MPa)	e_m (%)
CP1	0,34	35,88
CP2	0,37	36,50
CP3	0,37	40,38
CP4	0,41	37,25
CP 1-4	**0,37**	**37,50**
CP5	0,49	43,50
CP6	0,43	54,75
CP7	0,45	43,25
CP 5-7	**0,46**	**47,17**

Nenhum corpo-de-prova rompeu

Tabela 11. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 4% de BMP #30

CAP-20 + 4% BMP #30		
	s_m (MPa)	e_m (%)
CP1	0,32	55,75
CP2	0,33	55,63
CP3	0,29	53,50
CP4	0,31	44,63
CP 1-4	**0,31**	**52,88**
CP5	0,38	50,50
CP6	0,39	45,63
CP7	0,34	48,75
CP 5-7	**0,37**	**48,29**

Todos os corpos-de-prova romperam

Tabela 12. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 8% de BMP #30

CAP-20 + 8% BMP #30		
	s_m (MPa)	e_m (%)
CP1	0,31	34,75
CP2	0,38	44,25
CP3	0,31	34,88
CP4	0,31	34,13
CP 1-4	**0,33**	**37,00**
CP5	0,61	32,25
CP6	0,57	36,00
CP7	0,55	44,75
CP 5-7	**0,57**	**37,67**

Todos os corpos-de-prova romperam

Tabela 13. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento(ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 12% de BMP #30

CAP-20 + 12% BMP #30		
	s_m (MPa)	e_m (%)
CP1	0,25	44,75
CP2	0,24	37,25
CP3	0,25	32,13
CP4	0,22	28,50
CP 1-4	**0,24**	**35,66**
CP5	0,41	33,50
CP6	0,41	36,00
CP7	0,37	46,00
CP 5-7	**0,40**	**38,50**

Todos os corpos-de-prova romperam

Tabela 14. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 4% de BMP #40

CAP-20 + 4% BMP #40		
	s_m (MPa)	e_m (%)
CP1	0,32	61,25
CP2	0,33	57,38
CP3	0,36	62,50
CP4	0,36	61,88
CP 1-4	**0,34**	**60,75**
CP5	0,38	52,50
CP6	0,32	54,38
CP7	0,47	51,50
CP 5-7	**0,39**	**52,79**

Todos os corpos-de-prova romperam

Tabela 15. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento (ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 8% de BMP #40

CAP-20 + 8% BMP #40		
	s_m (MPa)	e_m (%)
CP1	0,34	32,00
CP2	0,34	32,25
CP3	0,31	32,25
CP4	0,33	32,25
CP 1-4	**0,33**	**32,19**
CP5	0,51	34,75
CP6	0,51	36,00
CP7	0,51	26,00
CP 5-7	**0,51**	**32,25**

Todos os corpos-de-prova romperam

Tabela 16. Valores de Tensão (σ_m) e Alongamento(ε_m) na carga máxima para CAP-20 modificado por 12% de BMP #40

CAP-20 + 12% BMP #40		
	s_m (Mpa)	e_m (%)
CP1	0,26	40,13
CP2	0,25	29,50
CP3	0,23	29,75
CP4	0,25	32,25
CP 1-4	**0,24**	**32,91**
CP5	0,41	21,00
CP6	0,38	29,75
CP7	0,36	27,25
CP 5-7	**0,39**	**26,00**

Todos os corpos-de-prova romperam

Na Figura 6 são mostrados corpos-de-prova referentes as amostras de CAP-20 modificado somente com teores de BMP. Foi constatado que após o rompimento, o material não tem tendência à retomar sua aparência inicial, apresentando-se muito rugoso, visto que sua superfície original era homogênea e lisa. Uma possível explicação para esse efeito é que a borracha não tenha ficado homogeneamente dispersa no CAP-20, apesar da temperatura (175ºC) e do tempo de processamento (3 horas) empregados.

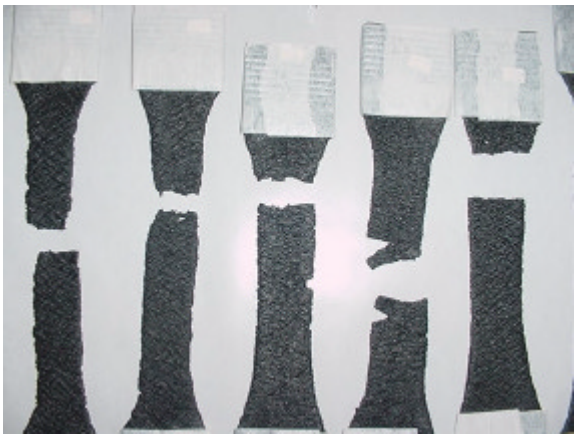


Figura 6 – Corpos-de-prova de CAP-20 modificados com BMP após a realização do ensaio de resistência à tração e alongamento

Por outro lado, o verso dos corpos-de-prova modificados com SBS apresentaram a presença de irregularidades na forma de pequenas depressões. Apesar disso, não ocorreu o rompimento de nenhum desses corpos-de-prova no ensaio de tração, sendo que após período de relaxamento o material retornou à sua forma original.

Portanto, devido aos problemas verificados para os dois tipos de asfaltos modificados (SBS e BMP), indica-se o estudo da adição de agentes compatibilizantes, de forma a promover uma melhora das dispersões.

As Tabelas 17 e 18 resumem os resultados apresentados nas tabelas 7 a 16, comparando, respectivamente, os valores médios de tensão (σ_m) e alongamento (ε_m) na carga máxima para o CAP-20 e suas composições modificadas com SBS, BMP #30 e BMP #40.

Tabela 17. Valores médios de tensão (σ_m) calculados na carga máxima para o CAP-20 e CAP-20 modificado por: SBS, BMP #30 e BMP #40

	s_m (MPa)					
	SBS		**BMP #30**		**BMP #40**	
Teor (%)	**CP 1-4**	**CP 5-7**	**CP 1-4**	**CP 5-7**	**CP 1-4**	**CP 5-7**
4	0,27	0,37	0,31	0,37	0,34	0,39
8	0,33	0,56	0,33	0,57	0,33	0,51
12	0,37	0,46	0,24	0,40	0,24	0,39
CAP-20 Não modificado: CP 1-4 = 0,23 MPa CP 5-7 = 0,27 MPa						

Tabela 18. Valores médios de alongamento(ε_m) calculados na carga máxima para o CAP-20 e CAP-20 modificado por: SBS, BMP #30 e BMP #40

	e_m (%)					
	SBS		**BMP #30**		**BMP #40**	
Teor (%)	**CP 1-4**	**CP 5-7**	**CP 1-4**	**CP 5-7**	**CP 1-4**	**CP 5-7**
4	47,31	56,13	52,88	48,29	60,75	52,79
8	52,94	54,71	37,00	37,67	32,19	32,25
12	37,50	47,17	35,66	38,50	32,91	26,00
CAP-20 Não modificado: CP 1-4 = 29,59 % CP 5-7 = 26,67 %						

A análise dos resultados apresentados nas Tabelas 17 e 18 indica que os valores médios de tensão (σ_m) e alongamento(ε_m) para os materiais modificados recém-preparados, aumentaram em relação ao CAP-20 não modificado, em especial para as composições contendo SBS. Para as composições contendo BMP, esses valores aumentaram para o teor de 4% de adição do modificador, mas a partir daí foram gradativamente reduzidos. Por outro lado, os resultados também indicaram que o processo de envelhecimento ao ar exerceu forte influência sobre o comportamento mecânico dessas misturas. A variabilidade dos resultados obtidos para estas composições não permitiu uma clara conclusão sobre suas tendências de comportamento. Para uma compreensão mais precisa do efeito do fenômeno de envelhecimento, ensaios adicionais, realizados com corpos-de-prova envelhecidos por várias durações de tempo, serão necessários.

Para melhor visualização das tendências de comportamento mecânico das misturas, os dados das Tabelas 7 a 16, resumidos nas Tabelas 17 e 18, foram também apresentados na forma de gráficos (Figuras 7 e 8).

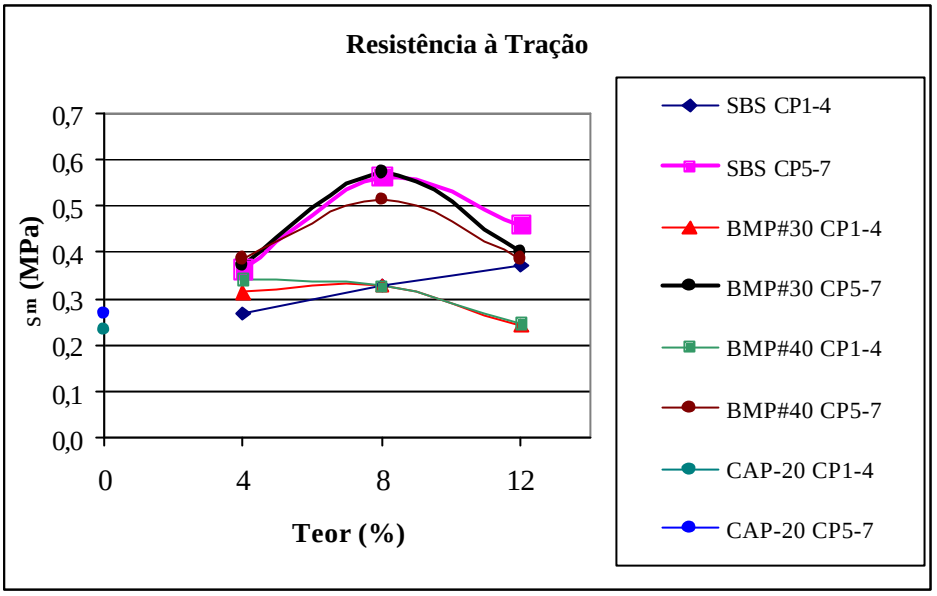


Figura 7. Valores médios de Tensão (σ_m) em função do Teor de borrachas(%)

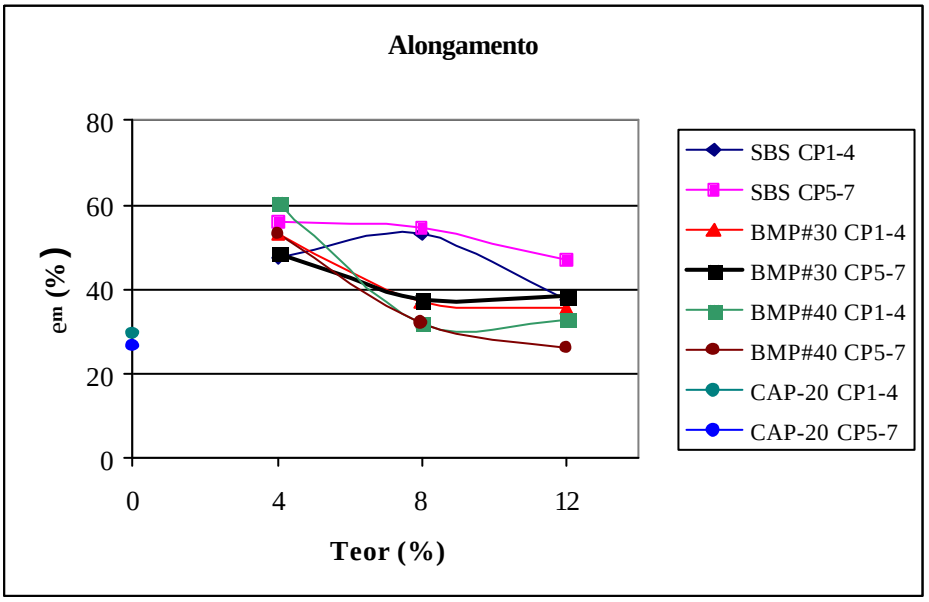


Figura 8. Valores médios de Alongamento(ε_m) em função do Teor de borrachas (%)

4.4 Ensaios de Deformação Permanente

Na Tabela 19 são apresentados os valores médios obtidos pelo cálculo da deformação permanente para o CAP-20 e o CAP-20 modificado por: SBS, BMP #30 e BMP #40.

Tabela 19. Valores médios de Deformação Permanente (DP) calculados para o CAP-20 e CAP-20 modificado por:SBS, BMP #30 e BMP #40

Deformação Permanente - DP (%)			
Teor (%)	**SBS**	**BMP #30**	**BMP #40**
4	42,7	44,6	43,3
8	6,3	45,0	45,0
12	7,2	45,0	42,5
CAP-20 Não modificado: DP = 81,3%			

Da análise dos resultados da Tabela 19, pode-se dizer que a adição das borrachas praticamente reduziu pela metade os valores das deformações permanentes, sendo que para os teores de 8 e 12% de SBS, esses resultados tiveram uma redução bem significativa.

Os resultados da Tabela 19 são mostrados na Figura 9.

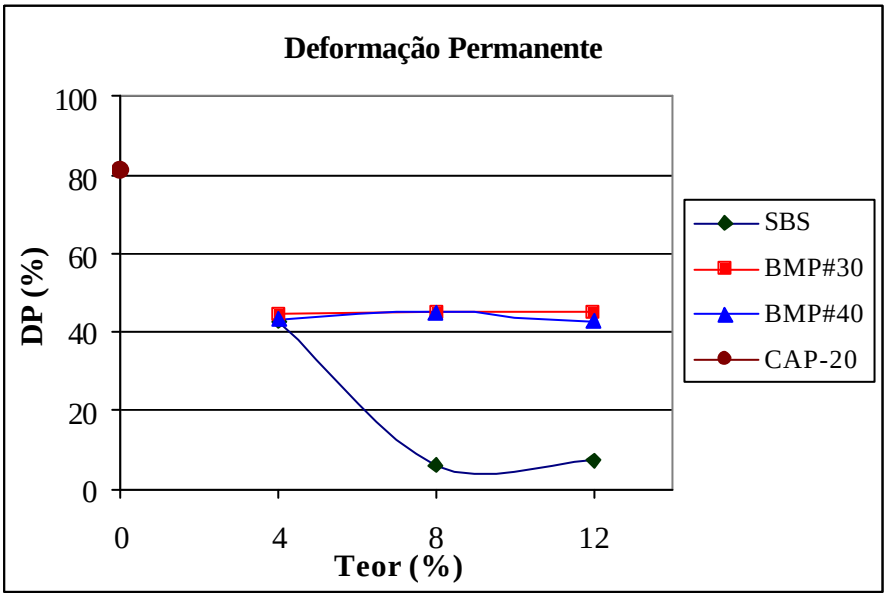


Figura 9. Deformação Permanente (DP) em função do Teor de borrachas (%)

De acordo com a literatura[8], uma das vantagens dos asfaltos modificados por polímero é a obtenção de maior resistência à deformação permanente. Outra citação, a de Oda[39], afirma que o ponto de amolecimento crescente com o teor de borracha sugere um aumento na resistência à deformação permanente. Os resultados deste trabalho indicaram que o material com melhor desempenho foi o modificado com SBS, uma vez que ele teve um aumento considerável do seu ponto de amolecimento e valores bem menores para deformação permanente, para os teores de 8 e 12%.

Comparando ainda os resultados obtidos com a normalizaçao existente[54], o único material que atende à especificação de valor máximo de 15% para a deformação permanente é o SBS para os teores de 8% e 12%, que apresentaram valores de 6,3% e 7,2% respectivamente.

4.5 Ensaios de Recuperação Elástica

Os valores médios obtidos pelo cálculo de recuperação elástica para o CAP-20 e o CAP-20 modificado por: SBS, BMP #30 e BMP #40 são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20. Valores médios de Recuperação Elástica (RE) calculados para o CAP-20 e CAP-20 modificado por:SBS, BMP #30 e BMP #40

Recuperação Elástica – RE (%)			
Teor (%)	**SBS**	**BMP #30**	**BMP #40**
4	65,0	54,5	50,0
8	96,5	65,0	59,0
12	98,0	64,0	57,5
CAP-20 Não modificado: RE = 10**%**			

Na Figura 10 é mostrado o comportamento do CAP-20 e das misturas de CAP-20 modificadas por: SBS, BMP #30 e BMP #40 de acordo com os valores médios apresentados na Tabela 12.

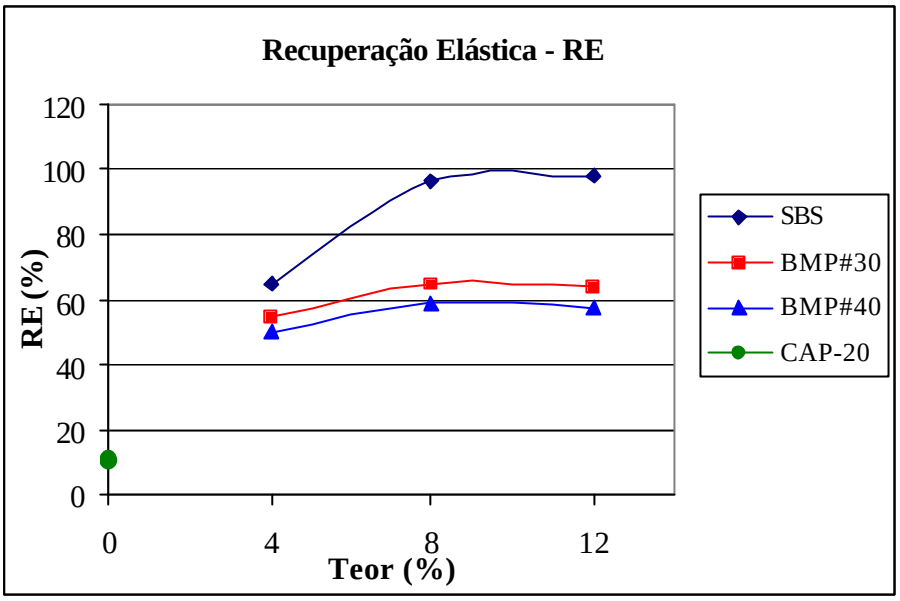


Figura 10. Recuperação Elástica (RE) versus Teor de borrachas

Na análise dos gráficos mostrados na Figura 10 observou-se que, os valores de recuperação elástica obtidos, tanto para o CAP-20 modificado por SBS, quanto para os modificados por BMP #30 e BMP#40, eram bem superiores à recuperação elástica do CAP-20 original. Mesmo assim, os resultados revelaram, que a recuperação elástica do CAP-20 modificado por SBS, foi superior à do modificado por BMP #30 e BMP #40.

A norma NBR 15086[48], não estabelece nenhum valor de referência para este tipo de ensaio. Ela cita que a tendência para este método não foi determinada, por não existir material de referência adequado. Na literatura, também não foi encontrado nenhum valor de referência, embora seja uma tendência no mercado de impermeabilização, considerar aceitáveis valores de recuperação elástica superiores a 50-60 %.

4.6 Ensaios de Separação de Fase

Os resultados dos ensaios de separação de fase são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21. Valores de Separação de Fase (SF) calculados para os asfaltos modificados por: SBS, BMP #30 e BMP #40

Separação de Fase - SF									
Borracha	**SBS**			**BMP #30**			**BMP #40**		
Teor	**4%**	**8%**	**12%**	**4%**	**8%**	**12%**	**4%**	**8%**	**12%**
Base(B)	68,5	71,5	112,0	68,0	64,8	63,0	69,0	65,3	62,8
Topo(T)	63,0	67,0	109,0	63,0	58,0	58,0	62,8	57,0	56,0
(B – T)	**5,5**	**4,5**	**3,0**	**5,0**	**6,8**	**5,0**	**6,2**	**8,3**	**6,8**

Base (B) = ponto de amolecimento (PA)ºC na base do tubo; Topo (T) = ponto de amolecimento (PA)ºC no topo de tubo; (B-T)ºC

O ensaio de separação de fase indica a estabilidade da amostra à estocagem, isto é, a compatibilidade do sistema. Quanto menor o valor (B-T), menor será a separação de fase, e portanto, o sistema apresentará melhor compatibilidade.

Os resultados apresentados na Tabela 21 mostraram que, a compatibilidade do CAP-20 modificado por SBS, quando comparado com a do modificado por BMP #30, apresentou desempenho inferior somente para o teor de 4%, mas para 8 e 12% sua compatibilidade foi superior. Dos três materiais testados, o que apresentou pior desempenho foi o CAP-20 modificado por BMP #40 e quando comparadas as duas granulometrias de borrachas de pneus, o CAP-20 modificado por BMP #30 apresentou melhor compatibilidade.

4.7 Ensaios de Densidade Relativa

Na Tabela 22 são apresentados os resultados obtidos após o cálculo da densidade relativa para o CAP-20 e o CAP-20 modificado por: SBS, BMP #30 e BMP #40.

Tabela 22. Valores de Densidade Relativa (DR) calculados para os asfaltos modificados por: SBS, BMP #30 e BMP #40

Densidade Relativa – DR (g/cm ^{3})			
Teor (%)	**SBS**	**BMP #30**	**BMP #40**
4	1,01	1,02	1,02
8	0,97	1,02	1,02
12	1,07	1,03	1,04
CAP-20 Não modificado: DR = 1,03 **(g/cm^3)**			

Da análise da Tabela 22, pode-se concluir que para 4% de SBS e 4, 8 e 12% de BMP #30 e BMP #40, os valores calculados de densidade relativa encontram-se próximos ao do CAP-20 não modificado e que apenas as densidades relativas para 8 e 12% de SBS sofreram uma maior variação. Vale ressaltar que, estes valores atendem à norma NBR 13121[54], e que a densidade relativa máxima deve ser de 1,15 g/cm^3 .

4.8 Análise Granulométrica

Na Figura 11 são mostrados os resultados obtidos para a distribuição granulométrica das borrachas: SBS, BMP #30 e BMP #40 executada com a utilização de peneiras padronizadas.

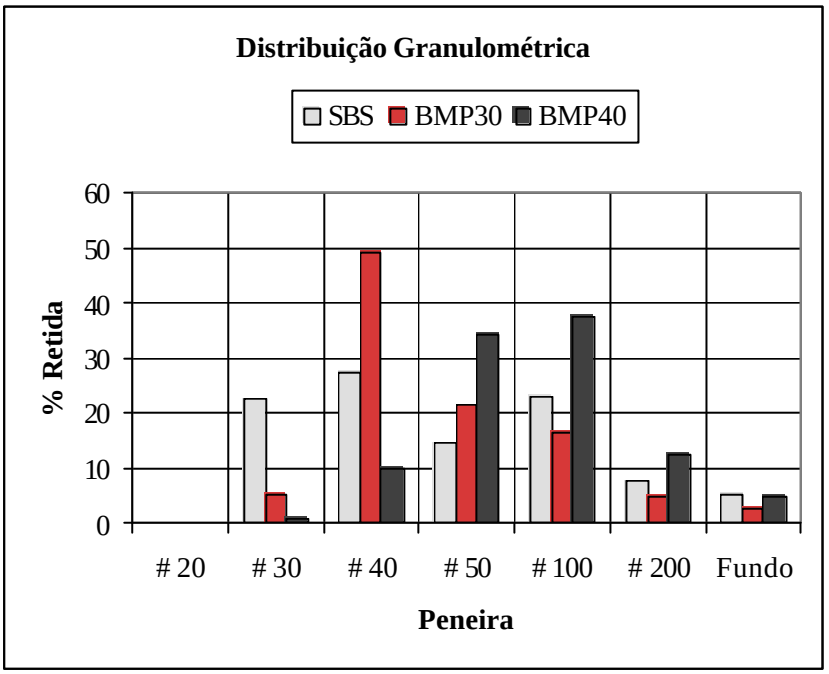


Figura 11. Distribuição granulométrica das borrachas: SBS, BMP #30 e BMP #40 através das peneiras ABNT #20, #30, #40, #50, #100 e #200

A análise da Figura 11 mostra que entre as borrachas, a que apresenta distribuição granulométrica mais homogênea é o SBS, enquanto que a borracha BMP #30 possui a maior parte de suas partículas retidas em peneira #40, enquanto que no caso da BMP #40, a maior parte de suas partículas possuem tamanhos maiores do que a abertura da peneira #100.

4.9 Morfologia

4.9.1 Microscopia de Fluorescência

As micrografias de asfaltos modificados com 4, 8 e 12% de SBS são mostradas nas Figuras 12 a 14.

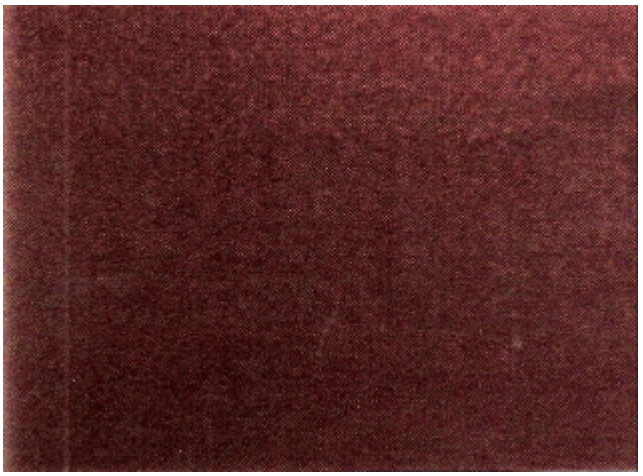


Figura 12. Micrografia do CAP-20 modificado com 4% de SBS

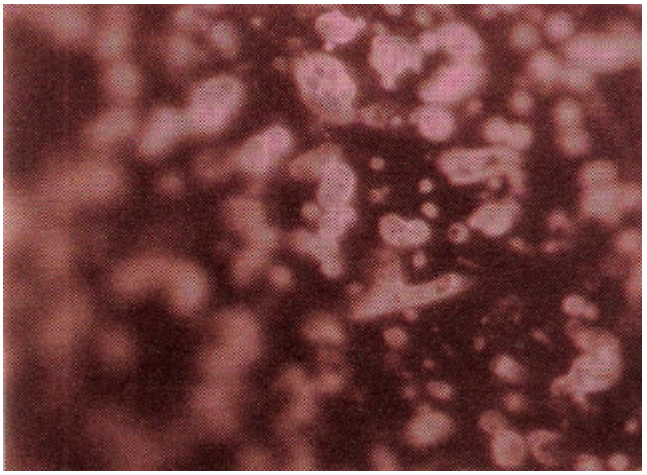


Figura 13. Micrografia do CAP-20 modificado com 8% de SBS

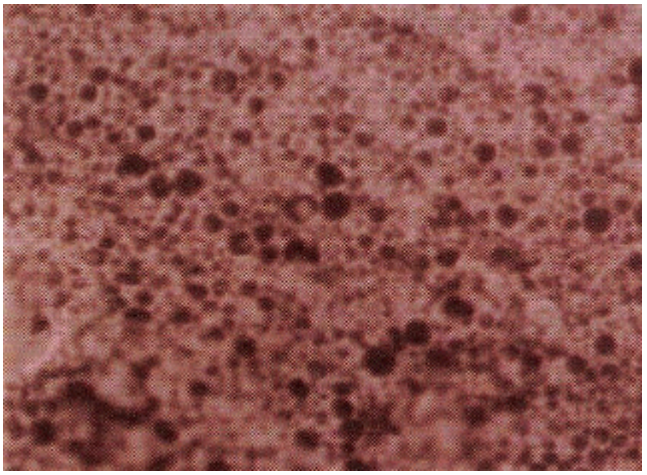


Figura 14. Micrografia do CAP-20 modificado com 12% de SBS

Nas Figuras 15, 16 e 17 são mostradas algumas dispersões típicas de asfalto / polímero, contidas na norma DIN EN 13632[52].

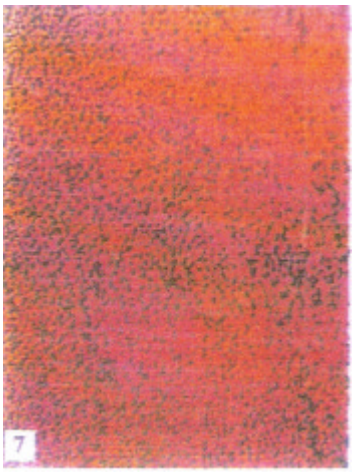


Figura 15. Dispersão nº 7 contida na norma DIN EN 13632

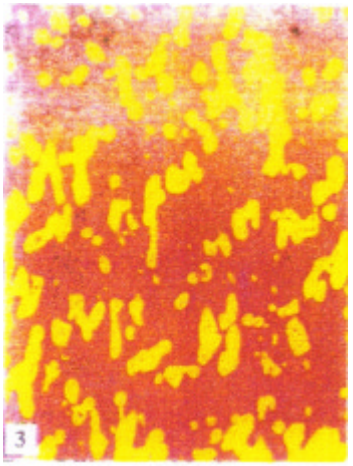


Figura 16. Dispersão nº 3 contida na norma DIN EN 13632

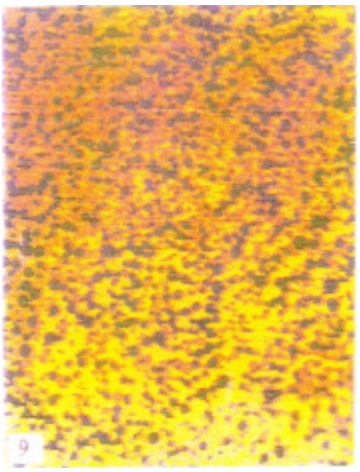


Figura 17. Dispersão nº 9 contida na norma DIN EN 13632

Pela comparação visual das micrografias obtidas, com algumas dispersões típicas contidas na DIN EN 13632[52], pode-se perceber alguma semelhança entre elas e ainda, pela análise da Tabela A.1 contida nesta mesma norma, é possível estimar algumas de suas características como: Fase Contínua, Descrição da Fase, Descrição do Tamanho e Descrição da Forma.

Micrografia do CAP-20 modificado com 4% de SBS (Figura 12), comparada à dispersão nº 7 (Figura 15):

- **Fase contínua**: as duas fases são contínuas
- **Descrição da Fase**: homogênea
- **Descrição do Tamanho**: pequeno (< 10 µm)
- **Descrição da Forma**: outras

Micrografia do CAP-20 modificado com 8% de SBS (Figura 13), comparada à dispersão nº 3 (Figura 16):

- **Fase contínua**: fase contínua de asfalto
- **Descrição da Fase**: homogênea
- **Descrição do Tamanho**: médio (entre 10 µm e 100µm)
- **Descrição da Forma**: tiras (estrias)

Micrografia do CAP-20 modificado com 12%de SBS (Figura 14), comparada à dispersão nº 9 (Figura 17):

- **Fase contínua**: fase contínua de polímero
- **Descrição da Fase**: homogênea
- **Descrição do Tamanho**: pequeno (< 10 µm)
- **Descrição da Forma**: arredondada

A comparação das amostras de CAP-20 contendo 8 e 12% de SBS, pode sugerir que para algum teor de borracha nessa faixa de adição, pode haver a ocorrência de uma inversão de fase (fase contínua ↔ fase descontínua) e que ela estaria ainda relacionada com a formação de uma rede tridimensional elástica, o que, por consequência, seria responsável pelos melhores resultados obtidos para este material em relação às borrachas de pneus (BMP #30 e BMP #40).

4.9.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Micrografias MEV com detector de elétrons secundários, de amostras das composições com 12% de SBS e 12% de BMP#40, crio-fraturadas, são mostradas nas Figuras 18 e 19.

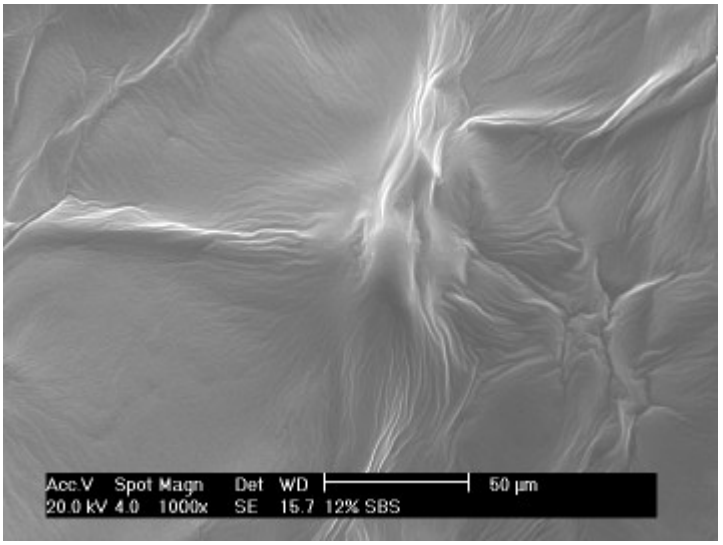


Figura 18. Micrografia do CAP-20 modificado com 12% de SBS

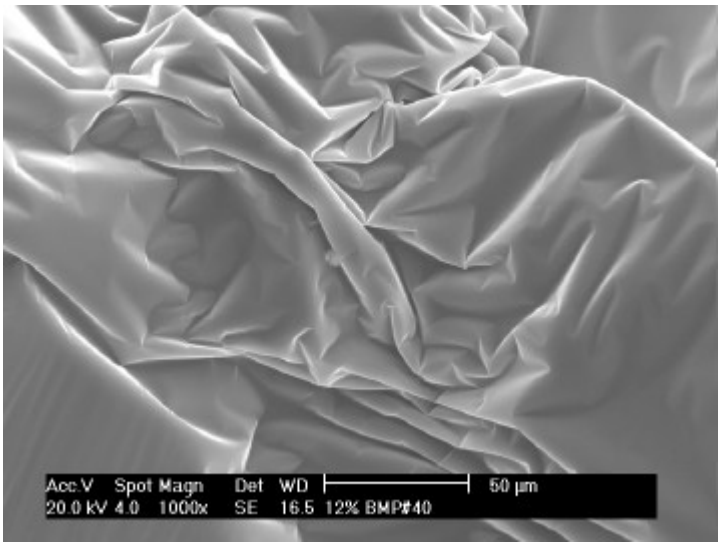


Figura 19. Micrografia do CAP-20 modificado com 12% de BMP #40

Da análise das micrografias verifica-se que as irregularidades na superfície de fratura, mostradas na Figura 18 (12% de SBS), são mais finas que aquelas que aparecem na Figura 19 (12% de BMP#40). Esta diferença na fratura pode indicar uma melhor dispersão e portanto, maior homogeneidade do SBS no asfalto CAP-20, quando comparada à dispersão do BMP#4

5. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- É possível dispersar borracha moída de pneus inservíveis em asfaltos para impermeabilização e pavimentação.
- As misturas contendo SBS apresentaram melhor desempenho geral do que aquelas contendo BMP.
- Esses resultados favoráveis ao SBS poderiam ser atribuídos à tendência que esse material apresenta, quando disperso no asfalto, de formar uma rede tridimensional elástica ("*crosslinking* físico").
- Provavelmente a interação do BMP quando disperso no asfalto não seja tão intensa, devido às ligações cruzadas resultantes da vulcanização das borrachas sintéticas e natural que compõem os pneus.
- Mesmo apresentando dificuldade de dispersão, algumas propriedades como recuperação elástica, densidade e separação de fases, foram favorecidas pela modificação do asfalto com BMP.
- Quando comparados os desempenhos obtidos com as borrachas BMP #30 e #40 quanto às suas propriedades mecânicas e compatibilidade, há uma tendência de se obter melhores resultados para o material com granulometria mais grossa (BMP #30).

6. REFERÊNCIAS

1. SPALLETTA, A. R. C. O Meio Ambiente pede ajuda: Reciclagem Urgente. **Borracha Atual**, Ano VIII, n. 54, p. 6-18, set./out. 2004.

2. BERTOLLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. 2002. 198p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

3. PNEUS. Disponível em: http://geocities.yahoo.com.br/voceusou/cap5.html. Acesso em: 18 de mar. 2003.

4. PETROBRAS. Rio de Janeiro. **Ecoflex: asfalto ecológico**. Disponível em: http://www.greca-asfaltos.com.br/ecoflex.htm. Acesso em: 14 de mar. 2003.

5. BERNUCCI, L. L. B. Novos materiais podem melhorar pavimento. **O Estado de São Paulo**, 27 de mar. 2000. P. C. 06.

6. AGOPYAN, V. **Materiais betuminosos para a construção civil**. São Paulo: PCC/EPUSP, 2003. [Apostila de curso]. Disponível em: <http://graduacao.pcc.usp.br/pcc337/1999%2001/Aulas%2099%2001/betum.../sld001.ht>. Acesso em: 03 de jun. 2003.

7. PETROBRAS. Refinaria Presidente Bernardes. **Asfalto para pavimentação**. Rio de Janeiro: Petrobras, 1960. 132p.

8. Instituto Brasileiro do Petróleo – *Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos*, Rio de Janeiro, 1999, 71p.

9. PICCHI, F. A. **Impermeabilização de coberturas de concreto-materiais, sistemas, normalização**. 1970. 372p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de |São Paulo, 1979.

10. COSTA, A. C. Atenção, pista reciclável. **Téchne**: revista de tecnologia da construção, v. 1, n.2, p.34-36, jan./fev. 1993.

11. SAYEGH, S. Inovações flexíveis. **Téchne**: revista de tecnologia da construção, v. 65, n. 10, p. 32-36, 2002. [Reportagem]

12. PETROBRAS. Rio de Janeiro. **Cimentos asfálticos de petróleo (CAP's)**. Disponível em: < http://www.br-petrobras.com.br/>. Acesso em: 11 de mar. 2003.

13. MACIEL, E. R. **A adição de polímeros em cimentos asfálticos de petróleo**. 2003. 58p. Monografia – Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, 2003.

14. LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. 1999. 266p. Tese (Doutorado) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1999.

15. SANTANA, H.; SALATHÉ, J. E. Os asfaltos-polímeros e o dimensionamento de pavimentos asfálticos. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 10., Rio de Janeiro, 1990. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 1990. p.209-257.

16. FRANCKEN, L. (Ed.) **Bituminous binders and mixes**. London: E&FN Spon, 1998. 328p. (RILEM Report: n. 17)

17. PICCHI, F. A. **Impermeabilização de coberturas**. São Paulo: Pini: Instituto Brasileiro de Impermeabilização, 1986. 216p.

18. LOTURCO, B. Impermeabilização: tendência polimérica. **Téchne**: revista de tecnologia da construção, v. 69, p. 42-43, 2002. [Reportagem]

19. ASFALTOS VITÓRIA. **Asfaltos modificados com polímeros e elastômeros**. Valinhos: [s.n.], [199?]. Não publicado.

20. CALLISTER, Jr. W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002, 589p.

21. SHELL QUÍMICA. **Kraton – a mais avançada tecnologia em borracha termoplástica para a modificação de asfaltos**, [199?]

22. REIS, R. M. M.; SANTO, N. R. E. – **Asfalto modificado com polímero**, 3ª Ed, Ipiranga Asfaltos, 1999, 71p.

23. RODRIGUES, A.A.; WIEBECK, H. Estudo da influência do pó de pneu nas propriedades da pasta vinílica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15., Natal, 2002

24. KOZIEVITCH, V. F. J.; PINTO, C. A.; HAMASSAKI, L. T.; BÜCHLER, P. M.; VALENZUELA DÍAZ, F. R. Compósitos cimento portland-bentonita-borracha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15., Natal, 2002

25. PINTO, C. A.; RAMOS VIANNA, M. M. G.; KOZIEVITCH, V. F. J.; HAMASSAKI, L. T.; VALENZUELA DÍAZ , F. R.; BÜCHLER, P. M. Estudo mecânico de cimento Portland ao ser incorporado à matriz pó de borracha de pneu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 14., Natal, 2002

26. MONEA, R. M. J.; VIEIRA, R.; APS, M.; WIEBECK, H.; TOFFOLI, S. M. Estudo de misturas asfálticas com borrachas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 8., Águas de Lindóia, 2005

27. PITARELI, G.; SOARES, E.P.; NUNES, E.C.D.; SILVA, L. G. A.; VIEIRA COELHO, A.C. Estudo da influência de poli(vinil butiral) na incorporação de borracha reciclada de pneus em poli(cloreto de vinila flexível) . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15., Natal, 2002

28. CAPONERO, J. ; LEVENDIS, Y. A.; CARLSON, J.; TENÓRIO, J. A. S. Caracterização das emissões da pirólise de pneus descartados. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM INTERNACIONAL, 57., São Paulo, 2002

29. MADUREIRA, C. J. **O uso de pneus descartados em aterros reforçados**. 2002. 285p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

30. NEVES FILHO, C. L. D.; BERNUCCI, L. L. B.; FERNANDES JR, J. L.; Avaliação de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha quanto ao módulo de resiliência, a resistência à tração e a fadiga. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., Rio de Janeiro, 2004. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 2004. p.128-136.

31. FERRO, C. C.; ODA, S.; FERNANDES JR, J. L.; Avaliação de alterações de propriedades de ligantes asfalto-borracha após armazenamento. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., Rio de Janeiro, 2004. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 2004. p.137-145.

32. SEVERO, L. E. P.; RUWER, P.; MORILHA JR, A.; CERATTI, J. A. Trecho experimental de asfalto-borracha na rodovia BR/116: monitoramento e análise do desempenho. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., Rio de Janeiro, 2004. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 2004. p.320-327.

33. MORILHA JR, A.; TRICHÊS, G. Análise comparativa de envelhecimento entre ligantes asfálticos tradicionais e modificados. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., Rio de Janeiro, 2004. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 2004. p.233-244.

34. CLERMAN, D. S.; CERATTI, J. A. P. Utilização de borracha moída de pneu como agregado em pré-misturados a frio. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., Rio de Janeiro, 2004. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 2004. p.48-56.

35. SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. Avaliação laboratorial do emprego do ligante asfalto-borracha em concreto asfáltico. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., Rio de Janeiro, 2004. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 2004. p.219-226.

36. FAXINA, A. L.; SÓRIA, M. H. A.; LEITE, L. F. M.; TAHARA, C. S. Viscosidade aparente de asfaltos modificados com borracha de pneu e óleo de xisto. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., Rio de Janeiro, 2004. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 2004. p.257-265.

37. FAXINA, A. L.; SÓRIA, M. H. A.; LEITE, L. F. M.; TAHARA, C. S. Efeito do óleo de xisto sobre características físicas de asfaltos-borracha. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., Rio de Janeiro, 2004. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 2004. p.266-274.

38. MOMM, L.; DUMKE, M. P.; LEONETTI, F. B.; OTTO, G. G. Estudo do desempenho de concreto asfáltico drenante modificado com asfalto-borracha em sua composição. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., Rio de Janeiro, 2004. **Trabalhos técnicos**. Rio de Janeiro: IBP, 2004. p.300-307.

39. ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. 2000. 251p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

40. CAMBUIM, K. B.; SOBRINHO, A. A. B. Aspectos tecnológicos de misturas físicas de resíduos de pneus com asfaltos brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 7.,Belo Horizonte, 2003

41. SANTOS, E. F.; FEITOSA; J. P. A. Caracterização de cimento asfáltico de petróleo brasileiro modificado por borracha de pneu moído de renovadoras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 7., Belo Horizonte, 2003

42. SILVA, L. S.; FORTE, M. C. Estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos modificados com polímeros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 7., Belo Horizonte, 2003

43. LUCENA, M. C. C.; SOARES, S. A. Estudo do envelhecimento de asfalto modificado por SBS através de RMN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 7., Belo Horizonte, 2003

44. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais betuminosos – Determinação da penetração. Rio de Janeiro: 1998.

45. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560**: Materiais betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. Rio de Janeiro: 2000.

46. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-2939**: Method of testing emulsified bitumens used as proctetive coatings. USA,1990

47. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7462**: Elastômero vulcanizado – Determinação da resistência à tração. Rio de Janeiro: 1992

48. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15086**: Materiais betuminosos – Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro. Rio de Janeiro: 2004

49. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15166**: Asfalto modificado – Ensaio de separação de fase. Rio de Janeiro: 2004

50. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6296**: Produtos betuminosos semi-sólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro: 2004

51. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-71**: Standard test method for relative density of solid pitch and asphalt. USA, 1989

52. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 13632**: Bitumen und bitumenhaltige bindemittel – Visualisierung der polymerverteilung in polymermodifiziertem bitumen. Berlin, 2004

53. VALERA, T. S. **Blenda de poliamida 6/poli(vinil butiral) obtida a partir de resíduos poliméricos**. 2000. 85p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

54. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13121**: Asfalto elastomérico para impermeabilização. Rio de Janeiro: 1994