

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**LETÍCIA SILVA DE OLIVEIRA  
MARCO AURÉLIO REZENDE ARAÚJO**

**ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMERO SBS**

**ANÁPOLIS / GO  
2015**

**LETÍCIA SILVA DE OLIVEIRA  
MARCO AURÉLIO REZENDE ARAÚJO**

**ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMERO SBS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: BENJAMIM JORGE RODRIGUES DOS  
SANTOS**

**ANÁPOLIS / GO: 2015**

**LETÍCIA SILVA DE OLIVEIRA**  
**MARCO AURÉLIO REZENDE ARAÚJO**

**ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMERO SBS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

**APROVADO POR:**

---

**BENJAMIM JORGE RODRIGUES DOS SANTOS, Doutor (UniEvangélica)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**ISA LORENA SILVA BARBOSA, Mestre (UniEvangélica)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ANDRÉA LÚCIO QUEIROZ, Especialista (UniEvangélica)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 26 de NOVEMBRO de 2015.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Índice de envelhecimento em função da idade do asfalto. ....	21
Figura 2 – Mistura de ligante asfáltico e agregados compondo o CBUQ .....	24
Figura 3 – Asfalto compactado de CBUQ seccionado .....	25
Figura 4 – Estrutura do polímero SBS .....	36
Figura 5 – Amostra do polímero SBS (estireno, butileno, estireno) .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fabricação comercial de polímeros. . . . .	32
---	----

## RESUMO

Conforme o volume do tráfego rodoviário aumenta, é visível a necessidade de um pavimento que, não só esteja preparado para receber esses carregamentos, mas que também suporte as variações de temperatura a que são submetidos com as mudanças climáticas ao longo do ano. Diante disso, uma das alternativas encontradas foi a incorporação de polímeros aos ligantes asfálticas, os quais foram comprovados aumentar a performance do pavimento, mantendo-o em boas condições por mais tempo que o asfalto convencional. Contudo, nem todo polímero é adequado a modificação de asfaltos devido as propriedades físicas, químicas e mecânicas de ambos. Mesmo com as vantagens, as modificações também têm suas limitações e os diferentes polímeros existentes trazem diferentes benefícios. Em vista disso e analisando os polímeros mais utilizados, foi possível concluir que o mais conveniente é o copolímero SBS (estireno-butadieno-estireno), correspondendo a maior parte das expectativas em relação a performance do pavimento. Sendo assim, apesar de seu alto custo, seus benefícios em relação a ausência de manutenções e recapeamentos torna-o uma opção viável devido a seu alto desempenho.

## **ABSTRACT**

As the volume of road traffic increases, it is clear the need for a floor that is not only prepared to receive these shipments, but also support the temperature variations they undergo climate change throughout the year. Therefore, one of the alternatives found was the incorporation of polymers to the asphalt binders, which have been proven to increase pavement performance, keeping it in good condition for longer than conventional asphalt. However, not all suitable polymer is modified asphalts because the physical, chemical and mechanical properties of both. Despite the advantages, the changes also have their limitations and the different existing polymers bring different benefits. In view of this and analyzing the most frequently used polymers, it was concluded that the most convenient copolymer is SBS (styrene butadiene styrene), corresponding to most expectations regarding the performance of the pavement. Thus, despite its high cost, its benefits over the lack of maintenance and resurface makes it a viable option due to its high performance.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	09
<b>1.1 JUSTIFICATIVA</b> .....	11
<b>1.2 OBJETIVO</b> .....	12
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	12
<b>1.2.2 Objetivo Específico</b> .....	12
<b>1.3 METODOLOGIA</b> .....	12
<b>1.4 COMPOSIÇÃO DO TRABALHO</b> .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
<b>3 OS ASFALTOS PARA PAVIMENTAÇÃO</b> .....	19
<b>4 MODIFICADORES DE ASFALTO</b> .....	29
<b>5 APLICAÇÃO DO ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMERO SBS</b> .....	35
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	41
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	42

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as estradas têm demonstrado cada vez mais deficiências constantes, severas e a curto prazo. Uma das causas para tais ocorrências é o aumento do tráfego intenso o qual o asfalto convencional não está preparado para suportar. Com a evolução da indústria automobilística ao longo do século XX encontrou-se a necessidade de evoluir a tecnologia da pavimentação.

Negrão (2006), apresenta o asfalto como um elemento proveniente da destilação do petróleo, sendo uma de suas frações mais pesadas, utilizado como material impermeabilizante há centenas de anos atrás. Uma mistura betuminosa deve ter como características principais a flexibilidade em temperaturas baixas para evitar trincas térmicas no pavimento e a rigidez em temperaturas altas para resistir à deformação permanente. Essas propriedades funcionais são imprescindíveis para que o pavimento seja capaz de suportar o constante crescimento dos carregamentos devido ao tráfego nas diversas variações climáticas no decorrer do ano.

A malha viária brasileira invariavelmente apresenta defeitos no revestimento dos pavimentos asfálticos. Esses defeitos são decorrentes de uma gerência de pavimentos inadequados ou praticamente inexistentes em várias regiões do país. Também por causa de deficiências no controle das cargas por eixo, os caminhões circulam pelas rodovias com cargas por eixo acima dos limites legais.

Considerando-se esses motivos, é que a malha de rodovias brasileira encontra-se em preocupante estado de conservação, apresentando defeitos funcionais e estruturais nos pavimentos. Uma forma de minimizar o desgaste do revestimento adiando o aparecimento de deficiências e até mesmo diminuindo o tempo necessário para manutenção é através da adição de polímeros ao asfalto. O desempenho do asfalto com polímero é superior ao do pavimento constituído de asfalto convencional, além de apresentar excelente compatibilidade custo/desempenho. O custo do emprego do polímero varia em função do seu tipo, bem como o teor (%) a ser incorporado no asfalto.

Lucena (2005), menciona que ao substituir o asfalto convencional pelo modificado com SBS (estireno-butadieno-estireno) é possível notar uma redução na frequência das

manutenções das estradas, visto que torna-se menos comum o aparecimento de fissuras, buracos e outros defeitos devido ao ganho de resistência do pavimento. Além dessas vantagens há ainda um prolongamento da vida útil de serviço de pavimentos, aumento da adesividade e coesividade, bem como uma maior resistência a abrasão.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Ao trafegar pelas estradas e rodovias brasileiras é provável deparar-se com inúmeras deficiências no pavimento, que vão desde pequenas fissuras até vastos trechos cobertos de buracos que se originaram devido ao tráfego pesado somado a influências das chuvas, falta de manutenção e até mesmo revestimentos inadequados para suportar a grande variação da temperatura anual.

Apesar de amplamente empregado o asfalto convencional possui alguns pontos negativos perante o aumento do fluxo de veículos e da ação das intempéries. Há uma diminuição da resistência à tração do pavimento devido ao processo de fadiga, uma vez que o asfalto está sujeito a aplicações constantes de carga. A presença de umidade entre o agregado e o ligante, por exemplo, provoca perda do material pétreo em determinadas misturas. O revestimento asfáltico torna-se rígido quando exposto a baixas temperaturas, ficando quebradiço e sujeito a trincas, ao passo que em altas temperaturas torna-se fluido, adquirindo deformações plásticas, ou irreversíveis.

Tendo em vista essas falhas que reduzem a vida útil dos pavimentos, pesquisas vêm sendo realizadas com a adição de substâncias que melhoram a resistência do pavimento prolongando sua vida útil. Gusmão (2009), constatou que quando há o acréscimo de polímero na composição do asfalto, suas características tendem a ser mantidas por mais tempo, havendo assim uma melhora no desempenho dos pavimentos o que traz em mais conforto e segurança aos usuários da malha rodoviária.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Apresentar o asfalto modificado por polímero SBS como uma alternativa para a confecção de pavimentos rodoviários submetidos a tráfego intenso, uma vez que o pavimento convencional apresenta deficiências impostas pelas variações climáticas, pelo aumento do fluxo de veículos e de cargas por eixo.

### **1.2.2 Objetivo Específico**

Apresentar propriedades do asfalto modificado por polímero.

Analisar o custo e o rendimento da adição de polímeros ao revestimento.

Comparar o desempenho do asfalto convencional com o asfalto modificado por polímero SBS.

## **1.3 METODOLOGIA**

Na execução do trabalho será realizada pesquisa bibliográfica abrangendo artigos técnicos que tratam sobre o assunto, apostilas, relatórios e resultados de ensaios realizados tanto por acadêmicos quanto por empresas distribuidoras de asfaltos na realização de testes para a comercialização desse produto, teses e dissertações, bem como pesquisas em páginas na internet as quais relatam informações sobre o tema abordado.

## 1.4 COMPOSIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é composto por seis capítulos, divididos de acordo com o tema abordado, em sequência para o melhor entendimento do leitor. O primeiro capítulo traz a introdução do objeto de estudo, trazendo informações gerais sobre o que está sendo abordado. O tópico contém a palavra de outros autores a respeito do assunto, bem como a descrição das ferramentas de pesquisa e dos objetivos a serem alcançados com a realização desta obra.

O capítulo dois traz uma descrição dos diferentes tipos de asfaltos utilizados na pavimentação de estradas. Serão expostos os materiais que compõe o asfalto e as camadas que constituem o pavimento, precedendo a aplicação da capa asfáltica.

O terceiro capítulo é uma introdução ao capítulo seguinte, sendo que o primeiro traz informações sobre polímeros usados na modificação asfáltica, além das melhoras no desempenho adquiridas com essa alteração. Já o quarto, e penúltimo capítulo, se volta diretamente para o polímero SBS, foco deste trabalho. Serão evidenciadas as vantagens alcançadas com a aplicação deste polímero e as melhoras em cada uma das propriedades do asfalto serão apontadas sequencialmente.

Por fim, o trabalho é concluído no capítulo cinco, onde são deixadas provas da eficiência da modificação do asfalto com o polímero SBS, além de serem deixadas recomendações para a realização de futuros trabalhos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Lira caracteriza o petróleo é um material de origem fóssil, sendo fonte de energia não renovável, além de ser atualmente utilizado pela indústria petrolífera e petroquímica como matéria-prima. Em sua composição química encontra-se uma cadeia de hidrocarbonetos nas quais gases são formados a partir de suas frações mais leves e das frações pesadas retira-se o óleo cru. A variedade de petróleos existentes no mundo é definida pela divisão dos percentuais de hidrocarbonetos encontrados na composição desse material.

O Instituto Brasileiro de Petróleo (1999) define o asfalto como um material aglutinante de tom pardo-escuro ou negro, possuindo consistência variável. É obtido de forma natural em jazidas ou em refinarias a partir da destilação do petróleo que forma o CAP (cimento asfáltico de petróleo).

Leite (1999) ressalta que além dos hidrocarbonetos, que compõem entre 90% e 95% do CAP, também fazem parte do CAP alguns heteroátomos como oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos produzidos no Brasil, ao contrário dos árabes e venezuelanos, têm um teor mais baixo de enxofre e de metais que é compensado pelo alto teor de nitrogênio.

Pesquisas realizadas por Cabrini (2013) afirmam que, na antiguidade o asfalto em sua forma natural teve suas primeiras aplicações como material impermeabilizante, além de aglutinante de tijolos em muros que eram erguidos, em pisos de ruas, trabalhos de mumificação e impermeabilização de aquedutos.

Em relação ao desempenho dos materiais betuminosos, Carvalho (2008) relata que a variação da temperatura tem grande influência sobre estes, amolecendo-os na medida em que ela aumenta e solidificando ao passo em que diminui, trazendo como vantagem a trabalhabilidade. No entanto, essa sensibilidade faz com que os mesmos se deformem no verão devido ao calor intenso e tornem-se duros e quebradiços no frio com a chegada do inverno. Essa característica é definida como suscetibilidade térmica. São materiais duráveis e conseguem manter suas propriedades por vários anos, desde que não sejam expostos a intempéries. A evaporação das substâncias responsáveis por sua plasticidade e a oxigenação

de seus principais constituintes são alguns dos fenômenos físicos e químicos que lentamente envelhecem o betume.

Sendo o CAP um material de função aglutinante, Balbo (2007) descreve que é conferida a ele uma boa aderência aos agregados cumprindo com seu papel de ligante, é flexível e apresenta propriedades impermeabilizantes, conforme já mencionada sua utilização na antiguidade. Possui relativa durabilidade e boa resistência contra grande parte dos ácidos, sais e álcalis, além de não possuir solubilidade em água. Contudo, é um material que passa por alterações químicas quando encontra a radiação solar, as águas ácidas e quando sofre ações de combustíveis, lubrificantes e óleos acidentalmente derramados sobre sua superfície por veículos que pelos pavimentos trafegam, ocasionando a oxidação do asfalto.

Além do intemperismo, alguns dos fatores que alteram as qualidades do pavimento são o tráfego intenso, falhas no projeto, construção inadequada e carência de manutenção. Essas alterações levam a deformação do revestimento, definida por Castro (2009) como toda modificação que altere negativamente seu desempenho, sendo esta na estrutura ou na superfície do mesmo.

Dentre essas modificações que prejudicam a estrutura do pavimento, Moura (2010) cita que as mais encontradas nos revestimentos asfálticos das rodovias brasileiras são a deformação permanente por trilha de roda e o trincamento por fadiga. Estes podem ser evitados a partir da realização de um projeto estrutural apropriado e no qual a mistura asfáltica atenda as especificações do referido projeto. Outras deformidades relevantes são a perda de adesividade causando desagregação e perda de durabilidade por oxidação, que apesar da gravidade podem ser corrigidos e evitados na fase da seleção dos materiais e no controle da usinagem do revestimento.

Estudos realizados por pesquisadores, dentre eles, Silva (2010), apontam que uma rodovia em estado de conservação ruim representa um aumento de 58% no consumo de combustível, de 38% no custo de manutenção dos veículos, de 100% no tempo de viagem e de 50% no número de acidentes. Estando cientes do aumento de acidentes, a preocupação aumenta quando estatísticas levantadas pela PRF apontam que desde 2003 houve um acréscimo de 136% da frota nacional, e ainda que, em setembro de 2014 haviam 86,7 milhões de veículos circulando pelas rodovias brasileiras, o que representa um aumento de 5,1 milhões

a mais que setembro do ano anterior. Ainda evidenciando dados coletados, a CNT de Rodovias apontou em 2014 que 49,9% da malha rodoviária apresenta algum grau de deficiência, como buracos, trincas, afundamentos e ondulações. A pesquisa ainda abrangeu trechos afetados pelo desgaste, o que atingiu o número de 98.475km de via.

Para parte das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais têm bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. No entanto, Bernucci et al. (2008) menciona que para um volume de veículos comerciais com peso por eixo aumentando gradativamente a cada ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, e para condições adversas de clima com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessário o uso dos asfaltos modificados por polímeros.

Os asfaltos modificados por polímeros são utilizados há 30 anos em países nos quais as condições climáticas sofrem variações extremas de temperatura, causando sérios danos aos pavimentos asfálticos. Mais empregados em regiões frias para combater trincas, atualmente tem sido usados também em regiões quentes combatendo deformações, tal como veio a ocorrer no Brasil em meio a década de 90 (IPR/DNER).

Em 1998, o DNER apresentou uma tabela de classificação de polímeros em que os mesmos eram divididos em quatro grupos. Dentre esses grupos temos os termofixos, quando expostos a temperaturas altas, endurecem irreversivelmente. Os termoplásticos, ao contrário dos termofixos, amolecem a altas temperaturas e endurecem após seu resfriamento. Os elastômeros, quando sujeitos ao calor, entram em decomposição antes de amolecem. E os elastômeros termoplásticos, possuindo propriedades mais adequadas a modificação de asfaltos, amolecendo ao entrar em contato com o calor e preservando boa parte de sua elasticidade após seu resfriamento.

Um fato evidenciado por Silva (2010) é que quando se acrescentam polímeros aos cimentos asfálticos é proporcionada uma modificação estrutural e química das propriedades do ligante. É adquirido um produto de estado homogêneo, com estabilidade térmica e que ultrapassa as limitações do asfalto convencional. Há assim uma modificação na reologia do asfalto conferindo benefícios ao mesmo como uma menor suscetibilidade a oxidação, aumento dos pontos de amolecimento e viscosidade, redução a penetração, aumento do

comportamento elástico e redução do fluxo viscoso, aumento da ductibilidade e do ponto de ruptura às baixas temperaturas.

Os elastômeros termoplásticos, na visão de Balbo (2007), são os polímeros mais utilizados em asfaltos modificados por suas propriedades mais adequadas perante as condições em que é exposto. Por sua vez, o polímero SBS (estireno-butadieno-estireno) é o elastômero termoplástico mais empregado atualmente aos CAP's. De acordo com Martinho (1995), os asfaltos modificados com o polímero SBS comportam-se como plásticos quando expostos a altas temperaturas, podendo ser moldados após a temperatura ir além do ponto de fusão. Ao resfriar se reestabelecem as características elásticas do material.

Os polímeros também podem ser incorporados a emulsões asfálticas, sendo que Baldo (2007) diz que a técnica mais utilizada para sua produção é a fabricação prévia do CAP modificado com SBS, emulsificando-a posteriormente. Ele afirma ainda que o percentual de polímeros sobre o CAP normalmente está entre 1% e 4% e que sua aplicação se dá a uma temperatura média de 70°C. Essa temperatura é um item imprescindível para a viscosidade do material, uma vez que o escorrimento da emulsão deve ser evitado durante sua aplicação. A presença do polímero aumenta o ponto de ruptura Frass em temperaturas frias, melhora seu ponto de amolecimento, sua viscosidade, além de adquirir uma melhor recuperação elástica.

De acordo com as pesquisas da CBB Asfaltos, a modificação do asfalto pela adição de polímero é executada pela incorporação do polímero derretido ao asfalto quente, em equipamentos especiais que exercem a mistura. Há casos em que a mistura acontece sem a presença de reações químicas, outros já exigem a ocorrência de reações entre o ligante asfáltico, o polímero e outros agentes químicos, tais como o enxofre. Um asfalto modificado de qualidade deve apresentar a dupla polímero e asfalto “entrelaçados” entre si, formando duas fases contínuas, uma permeando a outra. Em caso de a mistura não ser efetuada de forma apropriada, ou o polímero e o asfalto não serem quimicamente compatíveis, formam-se duas fases em que ou o asfalto ou o polímero prevalecem, lesando as propriedades que seriam adquiridas com a modificação correta.

Conforme os relatos de Reis, (2002), em 1990 os primeiros estudos sobre asfaltos modificados por polímeros foram realizados no Brasil pela companhia Ipiranga Asfaltos S. A. A companhia aplicou o material a elevadas temperaturas, além da aplicação de emulsões

asfálticas modificadas com polímero em micro revestimento, utilizando-se os polímeros do tipo SBR (borracha de Estireno-Butadieno) e SBS.

Os primeiros trabalhos envolvendo mistura de asfalto com o polímero SBS foram efetuados em 1990 pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem no Rio de Janeiro. Foi recoberto um trecho de cerca de 300 metros da Rua Leopoldo de Bulhões com mistura asfáltica modificada por polímero SBS (RAMOS *et al.*, 1995, *apud* BERNUCCI *et al.*, 2006). No Autódromo de Jacarepaguá foi feita uma aplicação entre 1996 e 1997, em 2000 foi construído um trecho experimental de alta qualidade para tráfego intenso e pesado na Rodovia Presidente Dutra entre o Km 128 e o Km 136 e em 2001 houve uma aplicação da mistura asfáltica modificada no Autódromo de Interlagos.

Estudos realizados por Brulê, 1996 (*apud* Balbo, 2007) apontam que desde a década de 70 os polímeros do tipo plastômeros e elastômeros já eram utilizados para modificar asfaltos. Seus objetivos eram elevar a coesão e aderência do CAP, bem como sua resistência a deformação plástica, à fissuração, à fadiga e ao envelhecimento; e reduzir sua viscosidade e sua suscetibilidade térmica.

Segundo Freitas (1996), algumas das propriedades que podem ser alteradas no asfalto com o acréscimo de polímeros SBS são a resistência à fadiga, que é a resistência contra solitação repetitiva de cargas; a elasticidade, caracterizada como a deformação reversível provocada pelo tráfego e pelas mudanças de temperatura; a susceptibilidade térmica, responsável pela variação da consistência de acordo com da temperatura; e a coesão, definida como a energia necessária para romper uma película de ligante fornecendo uma boa consistência nas temperaturas de serviços.

Segundo Machado (2007), O asfalto modificado por polímero SBS apresenta melhor comportamento que os asfaltos convencionais, com uma vida útil muito superior, proporcionando um pavimento drenante oferecendo maior segurança, durabilidade, conforto, menos custos com manutenção, tempo ganho em viagens, menos estresse, vidas poupadas, com todos esses benefícios deve-se comunicar as autoridades governamentais e as concessionárias de rodovias que é necessário o investimento nesses materiais de melhor qualidade, que gera um futuro retorno.

### 3. OS ASFALTOS PARA PAVIMENTAÇÃO

O betume é um produto orgânico, tendo sua origem natural em lagos de asfaltos formados na crosta terrestres, ou através do refino do petróleo em temperaturas próximas a 600°C. Este material é composto de hidrocarbonetos em seus diferentes estados de matéria. Em meados do século XX, o mercado automobilístico teve um grande impulso, este fato, unido ao descobrimento do asfalto produzido a partir da destilação do petróleo originou uma indústria em constante desenvolvimento. O asfalto se mostrou uma fonte econômica e abundante que seria utilizado em vias de rolamento, além de inúmeras outras formas de ser empregado. Segundo Negrão (2006), o asfalto é composto de materiais aglutinantes de consistência variável, de cor pardo-escuro ou negro, onde sua composição predominante é o betume, podendo ocorrer em jazidas na natureza, ou ser obtido pela destilação do petróleo.

No ano de 1909 os asfaltos provenientes da destilação de petróleo passaram a ser os mais utilizados, compondo a fonte mais importante de fornecimento de asfalto. Esse episódio se deve aos atributos do material quando comparado ao asfalto natural, uma vez que este possui pureza duvidosa, além de sua extração não ser tão econômica. O asfalto moderno tem seu processo produtivo originário da destilação do petróleo, conforme já mencionado. Nas destilarias, quando submetido a temperaturas cada vez mais elevadas, o petróleo é convertido em gasolina, querosene e diesel através do processo de vaporização, fracionamento e condensação em torres de fracionamento, passando por sua última etapa na destilação a vácuo. Adquire-se então, depois da retirada dos destilados já descritos, o cimento asfáltico de petróleo, também conhecido como CAP.

Os pavimentos são constituídos de estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Ceratti (2006) deduz que, portanto, essa camada deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos.

As misturas asfálticas, devido as condições de carregamento e de clima a que são submetidas, precisam ser flexíveis o bastante nas baixas temperaturas de serviço para que não ocorram trincas térmicas. Em contrapartida, precisam ser rígidas o suficiente em temperaturas

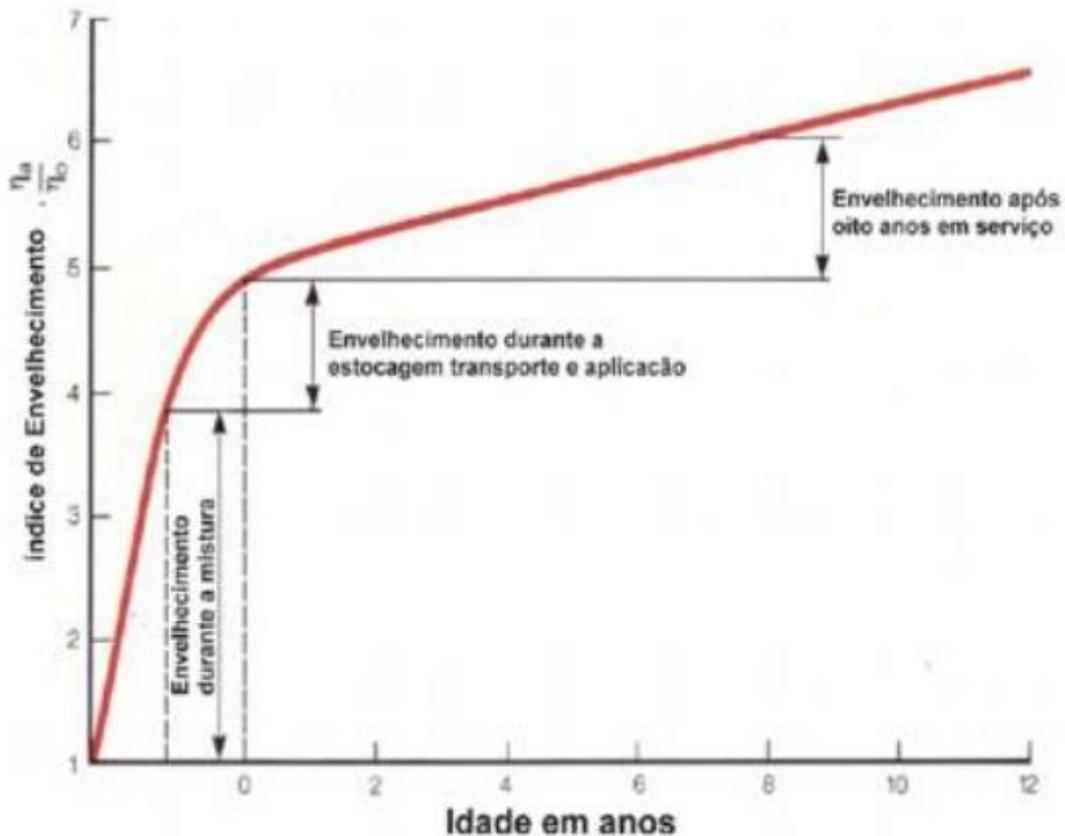
mais elevadas para que as deformações permanentes, que deterioram o pavimento, sejam evitadas.

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local (CERATTI *et al.*, 2006).

De acordo com o manual de pavimentação do DNIT 2006 os pavimentos de uma forma geral são classificados em flexíveis, semi- rígidos e rígidos, onde o flexível e quando aplicado um carregamento e todas suas camadas sofrem uma deformação elástica significativa, portanto a carga se distribui entre as camadas aproximadamente equivalentes, o semi – rígido caracteriza-se por ter uma base com materiais contendo propriedades cimentícias, por exemplo uma camada de solo cimento revestido por uma camada asfáltica, os pavimentos rígidos se caracteriza pelo o revestimento ter uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores, conseqüentemente sofre todas as tensões causadas pelos carregamentos aplicados.

O CAP tem sua composição básica feita por maltenos e asfaltenos. Os maltenos possuem aspecto oleoso e um menor peso molecular. Sensíveis ao envelhecimento, são constituídos por compostos saturados, que diminuem a susceptibilidade térmica; por aromáticos, que melhoram suas propriedades físicas; e por resinas, que aumentam sua ductibilidade. Os asfaltenos constituem a fração mais pesada do CAP, apresentando-se na cor preta, de forma sólida e quebradiça. Além de atribuírem um aumento em sua viscosidade, reduzindo a suscetibilidade térmica, são também os principais componentes responsáveis pelo comportamento reológico do CAP.

Figura 1 – Índice de envelhecimento em função da idade do asfalto.



Fonte: Whiteoak, 2003.

O asfalto é também um material betuminoso, porque contém betume, que é um hidrocarboneto, solúvel no bissulfeto de carbono (CS<sub>2</sub>), sendo ele o responsável pela característica aglutinante do asfalto. O alcatrão que se obtém da destilação destrutiva do carvão mineral ou vegetal, assim como o asfalto, resíduo obtido pela destilação de petróleo são considerados materiais betuminosos

O material de revestimento do asfalto pode ser fabricado em usina específica (misturas usinadas), fixa ou móvel, ou preparado na própria pista (tratamentos superficiais). Os revestimentos são também identificados quanto ao tipo de ligante: a quente com o uso de CAP, ou a frio com o uso de EAP. Motta (2006) separa as misturas usinadas quanto à distribuição granulométrica em: densas, abertas, contínuas e descontínuas

A mistura de agregados e ligante é realizada em usina estacionária e transportada posteriormente por caminhão para a pista, onde é lançada por equipamento apropriado, denominado vibro acabadora. Em seguida é compactada, até atingir um grau de compressão

tal que resulte num arranjo estrutural estável e resistente, tanto às deformações permanentes quanto às deformações elásticas repetidas da passagem do tráfego. As misturas a quente distinguem-se em vários tipos de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências de características mecânicas, em função da aplicação a que se destina.

Croney (1977) ressalta que o objetivo principal da pavimentação é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança. Uma vez que o solo natural não é suficientemente resistente para suportar a repetição de cargas de roda sem sofrer deformações significativas, torna-se necessária a construção de uma estrutura, denominada pavimento, que é construída sobre o subleito para suportar as cargas dos veículos de forma a distribuir as solicitações às suas diversas camadas e ao subleito limitando as tensões e as deformações de forma a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo.

Alguns dos principais ensaios que garantem a qualidade do asfalto são o de estabilidade e fluência Marshall, o ensaio de penetração, a viscosidade Sayboul-Furol, o ponto de amolecimento e de fissura Frass e o ensaio de recuperação elástica. Segundo parâmetros estabelecidos pelo DNER em 1995, a estabilidade Marshall é conceituada como a resistência máxima atingida por um corpo-de-prova em relação à compressão axial, expressa em Kgf. A fluência Marshall estabelece a deformação total que o corpo-de-prova sofre desde o início da aplicação da carga até o recebimento da carga máxima, cujo resultado é expresso em décimos de milímetros. O ensaio de penetração caracteriza a consistência da amostra de asfalto a partir da profundidade em que uma agulha de peso padronizado penetra uma amostra de cimento asfáltico por 5s dentre outros parâmetros. A viscosidade Saybolt-Furol, consiste no tempo em que a amostra do produto demora para passar por um furo padronizado em um aparelho conhecido como viscosímetro. O ponto de amolecimento é um ensaio no qual descobre-se a temperatura em que o asfalto amolece quando aquecido sob condições estabelecidas por norma. O ponto de ruptura Frass, ao contrário do ensaio do ponto de amolecimento, nos dá a temperatura em que o CAP se torna sensível ao fissuramento. O ensaio de determinação de recuperação elástica é o qual a adição do SBS mais se destaca. Ele é determinado a partir do estiramento do CAP em ductilômetro, e ao ser seccionado, mede-se a porcentagem do retorno do material após 60 minutos de repouso.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), um dos tipos mais empregados no Brasil é o concreto asfáltico (CA) também denominado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Ele resulta numa mistura proporcionada com agregados de vários tamanhos minerais, CAP e também de material de enchimento que pode ser o filer ou pó de brita e cimento asfáltico. Todo o material é dosado, espalhado e comprimido a quente, numa temperatura que pode variar entre 100°C e 165°C. Em caso se a temperatura for inferior a mínima especificada, gera consequências, pois o material não atinge a compactação necessária para atingir a resistência que suportará os esforços do tráfego, trazendo deformações futuras antes do prazo de projeto. A temperatura sendo mais alta do que a máxima, também gera pontos negativos no material porque assim a massa irá queimar, fazendo com que os componentes percam suas propriedades.

O CBUQ é transportado por caminhões basculantes da usina até o local onde será aplicado. Para realizar a aplicação, os caminhões descarregam a massa na “boca” da vibro acabadora, que é o equipamento responsável por distribuí-la na base imprimada. A vibro acabadora, por sua vez, espalha o material na espessura determinada em projeto com um acréscimo de 2mm por centímetro, que é o extra necessário devido ao fator de emolamento. Após a compactação ser realizada pelo rolo compactador de pneu e pelo rolo compactador liso, a espessura final será a de projeto.

Figura 2 – Mistura de ligante asfáltico e agregados com o CBUQ.



Fonte: Próprio autor, 2015.

Figura 3 –Asfalto compactado de CBUQ seccionado.



Fonte: Próprio autor, 2015.

Além do CBUQ, que é altamente impermeável, existem outros tipos de revestimentos asfálticos que são utilizados de acordo com a necessidade do projeto, variando o nível da resistência do revestimento, os materiais que fazem parte de sua composição e o custo de produção e aplicação do mesmo. Não há necessidade, por exemplo, de uma viela de 50m, que faz a ligação de duas vias secundárias em uma cidade pequena, a qual serve de passagem para poucos automóveis ser pavimentada por uma camada de CBUQ. Da mesma forma, é inviável que uma rodovia interestadual por onde transitam carretas e inúmeros veículos de carga e passeio seja revestida por PMF. Deve ser realizado um estudo prévio para a execução do dimensionamento do pavimento que melhor se adequa ao tráfego que será recebido por aquela via.

Pesquisas elaboradas por Soares *et al.* (2006), as misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e filer. Dessa forma usualmente existe três formas para essas misturas a quente:

- Graduação densa: esta se destaca por ser bem-graduada de forma que proporciona um material com poucos vazios, assim os agregados de dimensões menores completam os vazios dos maiores. Exemplo: concreto asfáltico (CA);
- Graduação aberta: os agregados são quase exclusivamente de um mesmo tamanho, desta forma proporciona um material com muitos vazios conectados internamente, com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para completar os vazios entre as partículas maiores, desta forma tem o objetivo de tornar a mistura com elevado volume de vazios com ar e assim sendo mais drenante, que possibilita a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA);
- Graduação descontínua: a curva granulométrica desta mistura tem os grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, e assim necessita serem completados por um material fino, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, com o objetivo de tornar o material mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos. Exemplo: matriz pétreas asfáltica (stonematrix asphalt – SMA); mistura sem agregados de certa graduação (gap-graded).

Os tipos de revestimentos asfálticos usinados costumam ser divididos a partir da temperatura em que ocorre a mistura e posteriormente pela granulometria do agregado, conforme já foi classificado neste trabalho. Os diferentes pavimentos possuem diferentes composições, diferentes formas de aplicações e diferentes desempenhos nas estradas. Dentre essas misturas, podemos citar a lama asfáltica, composta por emulsão asfáltica, agregado, material de enchimento e água. É empregado no rejuvenescimento de pavimentos danificados superficialmente, selagem de trincas, restauração da aderência entre o pneu e o pavimento, podendo inclusive servir como camada impermeabilizante, porém sem ganhos na resistência.

A lama asfáltica, que de acordo com a norma do DNIT 150/2010 - ES, se define na associação de agregado mineral, material de enchimento, emulsão asfáltica e água, com consistência fluida uniformemente espalhada em uma superfície previamente preparada, ela pode ser empregada como uma camada de selagem e também na impermeabilização e na conservação dos pavimentos. Levando em conta suas condições gerais de aplicação, em dias

de chuva ou quando a superfície indicar qualquer sinal de excesso de umidade, deve-se paralisar a execução do serviço, outra observação importante é verificar todo material de ligante asfáltico que chega á obra que deve apresentar por parte do fabricante, certificado de resultados de ensaios e análises , correspondente a data de fabricação ou dia de carregamento com destino ao canteiro de obras, se esse período ultrapassar 10 dias. Deve trazer também indicação de sua procedência, do tipo e quantidade do seu conteúdo e distância de transporte entre o fornecedor e o canteiro de obra.

Os constituintes que fazem parte da lama asfáltica, que são emulsão asfáltica, agregado miúdo, material de enchimento e água que são indicados no projeto devem respeitar a norma do DNIT em questão ao material, equipamento, execução, condicionantes ambiental, controle de insumos, verificação do produto, condições de conformidade e não conformidade, plano de amostragem, critérios de medição e controle de execução.

Um tipo de asfalto para pavimentação que é usado como camada selante, impermeabilizante, regularizadora, e rejuvenescedora ou camada antiderrapante de pavimentos, é o micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero. Conforme regulamentado na norma do DNIT 035/2004 – ES esse material consiste na associação de agregado, material de enchimento, emulsão asfáltica, modificada por polímero, água e aditivos caso seja preciso, com consistência fluida uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada. Esse tipo de revestimento deve seguir a norma do DNIT para sua execução obedecendo fatores tais como: materiais utilizados, equipamento, execução, correção de falhas, manejo ambiental, agregados, quanto a instalação, Operação, e inspeção.

O micro revestimento é uma mistura usinada a frio com composição próxima a da lama asfáltica, diferindo-se devido ao acréscimo de polímero na emulsão utilizada, retardando o envelhecimento do revestimento e trazendo um melhor desempenho quando comparado a lama. Sua utilização traz serventia como capa selante, revestimento de pistas onde o volume de tráfego é pequeno e na recuperação de pavimentos danificados superficialmente. Como mistura não-usinada é possível citar os tratamentos superficiais. O tratamento superficial simples consiste na distribuição de agregados minerais sobre a pista. O agregado é distribuído, seguido do espargimento da emulsão asfáltica sobre ele, sendo ambos compactados em seguida a temperatura ambiente, podendo essa aplicação ter ordem invertida.

É possível aplicar esta capa mais de uma vez, no que chamamos de tratamento superficial duplo. Sua classificação varia de acordo com a quantidade de aplicações do conjunto agregado + emulsão, podendo ser duplo, triplo ou até mesmo quádruplo.

Pinto (2012) afirma que o micro revestimento é uma das opções mais econômicas para recapeamento quando considerado custo x benefício, tendo uma vantagem de até 1/3 do valor gasto com o uso do CBUQ. A produtividade também é maior, pois seu volume de produção também é superior ao do CBUQ devido a rapidez na execução. Já os tratamentos superficiais, apesar de trazerem uma camada pouco espessa de capa, possui alta resistência, além de proporcionar um revestimento bastante flexível e uma pista de rolamento antiderrapante, melhorando a aderência do pneu ao pavimento.

#### 4. MODIFICADORES DE ASFALTO

Leite (1999) constatou que há boas chances de melhorar as propriedades mecânicas dos cimentos asfálticos de petróleo a partir da adição de asfaltos naturais, tais como gilsonita, asfaltita e asfalto de Trinidad; fileres, como cimento e cal; fibras, como as de vidro, de celulose e poliméricas; e ainda por enxofre elementar. Contudo, nos dias de hoje, os materiais mais utilizados na modificação de asfaltos são os polímeros e a borracha de pneus, que também otimizam as propriedades do CAP e conseqüentemente da massa asfáltica.

Os AMP's (asfaltos modificados por polímeros) trazem em sua composição produtos que alteram suas características, resultando em uma melhora em suas propriedades. Seu uso, apesar de aumentar o custo do CAP, visa fornecer benefícios em relação ao uso do asfalto convencional, estes que por fim reduzem a necessidade de manutenção do pavimento e aumentam sua durabilidade, conseqüentemente tornando o que seria mais caro no primeiro instante, um investimento que trará economias à longo prazo.

Dentre as vantagens conferidas ao pavimento com adições de polímero é possível citar o aumento da resistência ao envelhecimento tanto na aplicação quanto na utilização em rodovias, e a redução da suscetibilidade térmica, o que faz com que o material tenha menos variações ao longo das mudanças de temperaturas que ocorrem no ano devido ao clima estar sempre oscilando. Essa suscetibilidade é causada graças a outras características conferidas ao CAP, tal como um aumento na estabilidade, bem como na elasticidade do pavimento.

No entanto, há uma dificuldade na incorporação dos polímeros ao asfalto que interfere em seu desempenho nas estradas chegando a anular as qualidades que poderiam ser adquiridas. Os polímeros, em sua grande parte, mostram uma tendência a se dispersar, separando as fases por falta de compatibilidade coma matriz asfáltica. Contudo, estudos estão sendo realizados e os mesmos, até a atualidade, concluíram que o acréscimo de enxofre traz resultados positivos, mantendo a mistura estável quando adicionada ao CAP antes ou depois da incorporação do polímero.

A maior parte dos polímeros são acrescentados as misturas asfálticas em estado sólido, em forma de pallet. O polímero é incorporado ao ligante asfáltico em um pré-misturador que

trabalha em baixa velocidade e em temperatura controlada entre 180°C e 200°C (evitando a dispersão em caso de a temperatura cair demais ou oxidação caso a mesma se eleve mais que o recomendado) até que o polímero venha a inchar em contato com os óleos maltênicos do ligante. Em seguida a mistura é transferida para tanques de estocagem a quente, e ainda em estado heterogêneo é novamente transferida através de válvulas para um tanque de alta velocidade. O enxofre, como já mencionado, auxilia na compatibilidade e na estabilidade entre os elastômeros e o ligante.

Dados levantados por Maciel (2010) em gráficos revelam que, apesar de as rodovias executadas por gestão públicas terem maior extensão, as rodovias com melhor qualidade de pavimento foram executadas por concessionárias. A causa disso, em boa parte, deve-se ao fato de as rodovias concessionadas terem serem produto do asfalto com a adição de polímeros, o que pode explicar a maior durabilidade das mesmas. De fato, existem fatores como fiscalização de carga e controle de peso de tráfego que também auxiliam na conservação da estrada, mas não podemos ignorar a parcela de ajuda do asfalto modificado por polímero.

O asfalto naturalmente tem suas propriedades deterioradas por toda sua vida útil devido a exposição a radiação ultravioleta, ao oxigênio e às intempéries. Somado a isso, nos deparamos diariamente com um crescimento gradual da frota de veículos, cada vez com mais carga por eixo, que vem aumentando o volume de tráfego rodoviário. Temos como resultado rodovias com deformações permanentes como trilhas de roda, trincas devido a ruptura por fadiga, fissuras, afundamentos e buracos que atingem as camadas mais profundas da estrutura do pavimento.

Dentre as motivos para se substituir o asfalto convencional pelo modificado, temos o aumento da resistência a abrasão das misturas e da formação das trilhas de rodas (este que se dá através da melhoria na recuperação elástica), rodovias por onde transitam veículos pesados constantemente e reduções nos custos de manutenção dos pavimentos, evitando recapeamentos e operações tapa-buraco.

As características conferidas ao asfalto após a modificação dependem das propriedades e da concentração tanto do ligante quanto dos polímeros. O CAP deve, por exemplo, ser composto por boa parte de óleo para agir na dissolução e expansão do polímero.

Outro fator a ser considerado na mistura é a temperatura, esta que deve ser a menor dentro dos parâmetros, tal como o tempo em que a mistura é realizada, que deve respeitar um limite para que não haja perda nas propriedades mecânicas do composto. Durante a junção entre asfalto e polímero há o inchamento do polímero nos maltenos do CAP, o que traz melhoras na viscosidade do material, tornando-o mais resistente ao estiramento devido ao aumento de sua elasticidade. Dumke (2005) e Bernucci et. al (2008) fornecem uma classificação de polímeros a partir de suas reações diante das variações de temperatura:

- Termorrígidos – Quando submetidos a altas temperaturas, se deterioram antes mesmo de amolecer. Exemplo: Poliéster, poliuretano, resina epóxi.
- Termoplásticos – Derretem a altas temperaturas de forma reversível e endurecem quando resfriados, tornando-se altamente moldáveis. Exemplo: Polietileno, EVA, PVC.
- Elastômeros – Possuem propriedades altamente elásticas que lembram a borracha natural. Exemplo: SBR.
- Elastômeros termoplásticos – Comportam-se de forma elástica em temperaturas baixas e de forma termoplásticas quando aquecidos, sendo estes os preferidos dos asfaltos modificados. Exemplo: SBS.

Para Rosa (2012) *apud* Bernucci (2008), os polímeros favoritos dos asfaltos modificados são os elastômeros e elastômeros termoplásticos, o que nos remete ao fato de que nem todos os polímeros podem ser adicionados ao CAP, da mesma forma que não é qualquer CAP que se compatibiliza nas misturas com polímeros. Os diversos estudos realizados para melhorar as especificações deste produto fundamentam-se no que diz respeito ao comportamento referente a tensão x deformação, estabilidade, elasticidade e suscetibilidade térmica. Atualmente, as pesquisas sobre os polímeros que conferem propriedades para o asfalto têm girado em torno do SBR (estireno butadieno), EVA (etileno e acetato de vinila), borracha de pneus e SBS (estireno butadieno estireno), este último será o foco principal do trabalho aqui apresentado. A tabela a seguir expõe os polímeros comercializados para modificações de asfaltos. Silva (2005) menciona que o teor de polímero acrescentado varia entre 3% e 7%, variando em função de sua natureza química.

Tabela 1 – Fabricação comercial de polímeros.

<b>Polímero</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Nome Comercial</b>
Borracha moída de pneu	GRF 80	Rouse Rubber
Borracha moída de pneu	IGR	Baker
Borracha moída de pneu	Envirotire, Inc	Pluaride II
Copolímeros de etileno	Dupont	Elvaloy
Copolímeros de etileno	ARE,Inc	Starflex
Copolímeros de etileno	ARE,Inc	Modiflex
Copolímeros de etileno	Exxon Chemical	Polybilt
Copolímeros em blocos estirênicos	DexcoPolymers	Vector
Copolímeros em blocos estirênicos	Shell	Kraton
EPDM	Huls	Vestoplast
EVA	Dupont	Elvax
LPDE	Adv. Asphalt Tech.	Novophalt
PE funcionalizado	Eastman	Finaprene
Poliamina (melhorador adesão)	Morton Int.	Pave Bond
Polibutadieno (melhorador adesão)	Goodyear	UP-5000
Policloropreno látex	Dupont	Neoprene
SBR	Goodyear	UP-70, UP7289
SBR	Rub-R-road	R-504, R-550
SBR	BASF	Butonal
SBS	Ergon	Sealo-flex
SBS	Enichem	EuropreneSolt
SBS	FINA	-
Ácido polifosfórico	Innophos	Innovalt, Astaris
Parafina Fisher Tropsch	Sasobit	Sasol

Fonte: LEITE, 1999.

O asfalto borracha tem como um de seus benefícios, este que o confere destaque entre os demais polímeros, o reaproveitamento de pneus inservíveis que seriam descartados no meio ambiente, gerando poluição a longo prazo, uma vez que os pneus demoram cerca de 400 anos para se decomporem totalmente. Apesar de o número de pneus a ser utilizados chegar a mil por quilômetro, as desvantagens aparecem quando a mistura ao CAP, realizada em altas temperaturas, prejudica o ar que respiramos. A temperatura de usinagem de misturas asfálticas, por serem altas, acabam por trazer um certo nível de poluição atmosférica. Essa poluição se agrava quando se mistura a borracha de pneus ao CAP, pois a mesma exige temperaturas mais altas do que em usinagens convencionais.

O concreto asfáltico contendo asfalto borracha via úmida, de acordo com a norma do DNIT 2009 – ES é uma mistura executada a quente em usina apropriada, com características específicas, composta de material agregado graduado, material de enchimento (filer), se necessário, e asfalto borracha via úmido espalhada e compactada a quente. Suas considerações gerais de uso devem respeitar a respectiva norma onde esse tipo de asfalto somente deve ser fabricado, transportado e aplicado quando a temperatura ambiente for superior a 10°C, não deve ser distribuído em dias de chuva ou quando a superfície a ser pintado apresentar qualquer excesso de umidade, todo carregamento que chegar a obra deve apresentar por parte do fabricante/distribuidor certificado de análise.

O polímero EVA (etileno acetato de vinila), quando usado como modificador de asfalto, traz uma redução no envelhecimento e na suscetibilidade térmica, além de conferir melhoras nas propriedades de adesão e coesão, compondo assim materiais mais resistentes. Sua incorporação ao ligante asfáltico aumentam sua viscosidade e reduzem o processo de decomposição por oxidação do pavimento. Pesquisas e ensaios realizados por D'antona (2009) tiveram como resultado maior resistência que o CAP convencional, o que foi demonstrado através dos ensaios de viscosidade nos quais tal propriedade se mostrou maior que o asfalto convencional, maior consistência e, portanto, maior elasticidade. Durante o processo de incorporação, o ligante alcança uma temperatura de 170°C sendo transferido para um misturador em que o polímero é acrescentado junto a aditivos. O polímero passa pelo processo de inchamento em três tanques de maturação para onde a mistura é transferida e por fim passa por um misturador de alto cisalhamento para que a homogeneidade da mistura seja atingida.

O SBR, (estireno-butadieno) é um tipo de borracha com alta aplicação industrial, além de ser o elastômero mais utilizado na modificação de cimentos asfálticos de petróleo e o segundo modificador mais utilizado nos EUA. Ao contrário dos elastômeros termoplásticos, o SBR não é acrescentado a mistura em forma de pallets, mas sim como látex em sua forma líquida. Quando incorporada ao asfalto, seu uso torna-se desvantajoso a partir do momento em que suas propriedades dependem do acréscimo de outros grupos funcionais (como epóxidos, por exemplo) para melhorar a resistência do CAP a óleos e ao envelhecimento, e para minimizar sua alta permeabilidade ao ar.

O polímero SBS, estireno-butadieno-estireno, possui propriedades superiores as das borrachas convencionais, segundo informações da empresa Shell, uma das maiores fabricantes mundiais. Machado (2007), afirma que este é o polímero mais utilizado no Brasil, sendo produzido em nosso país pela Ipiranga Asfaltos S.A. Sua adição ao asfalto traz melhorias na adesão entre o ligante e o agregado e aumenta sua recuperação elástica. Esse resultado é procedido de um aumento da resistência a fadiga, o que aumenta a durabilidade do asfalto. Este polímero é um dos mais incorporados ao asfalto por poder ser utilizado tanto em lugares em que as temperaturas são muito altas, quanto em regiões de clima mais frio.

Para Iten (2011), as primeiras aplicações de misturas asfálticas modificadas por polímero foi em 1902 em Cannes, França, onde utilizaram um composto formado por borracha em uma rodovia. Machado (2007) ressalta que todas as modificações de asfalto com polímeros que ocorreram antes da Segunda Guerra Mundial foram realizadas com borracha natural devido a, até então, este ser o único material conceituado. Ele afirma ainda que quase 100 anos antes, em 1823 já haviam combinado asfalto de alcatrão com borracha natural, na criação de um produto que impermeabilizasse embarcações de madeira, o que já evidenciava lentamente as propriedades que a borracha conferia ao asfalto. Já em território nacional, os polímeros passaram a ser empregados como modificadores de asfaltos em 1968 na Bahia, onde o SBR foi incorporado ao CBUQ.

## 5. APLICAÇÃO DO ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMERO SBS

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os ligantes asfálticos convencionais têm suprido a necessidade com um bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos que são de extrema importância para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. Porém, para condições de volume de veículos comerciais e peso por eixo crescente ano a ano, em especial rodovias e os aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessário o uso de modificadores das propriedades dos asfaltos tendo em vista que os mesmos oferecem benefícios associados a resistência as diferenças climáticas, flexibilidade, drenagem, entre outros.

Em outras palavras, a modificação do CAP, ou seja, a incorporação do polímero tem por objetivo reduzir as variações de suas propriedades em relação às temperaturas de serviço, e assim evitando grandes alterações no comportamento mecânico do pavimento em função das demandas de tráfego que cresce ano após ano, com esta modificação o pavimento deve trazer melhoras na distribuição de cargas no pavimento devido ao aumento da coesividade do ligante, na resistência a trilhas de roda devido a sua melhor recuperação elástica, e na resistência a deformações permanentes e a trincas térmicas devido a diminuição da suscetibilidade térmica.

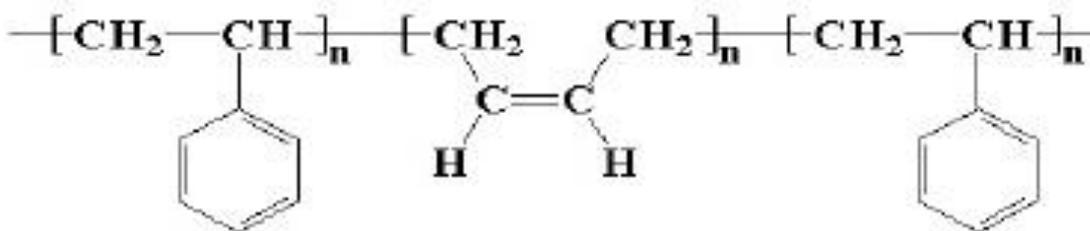
O aumento do intervalo de plasticidade conferido ao CAP pelo acréscimo do SBS causa um aumento do ponto de amolecimento e diminui o ponto de ruptura Frass, conferindo um voto de confiança a mais a este polímero ao aperfeiçoar seu desempenho em relação a deformação permanente. Ensaio realizados por Iten (2011) resultaram inclusive numa melhor compactação do CBUQ quando ensaiado perante a incorporação de SBS, o que pode trazer uma maior durabilidade as rodovias.

Como já mencionado anteriormente, o asfalto modificado por SBS é bem-vindo tanto em regiões em que o calor prevalece quanto em regiões de clima mais frio. Machado (2007) ressalta ainda que onde as temperaturas atingidas são altas a ponto de ultrapassar o ponto de

amolecimento do CAP tornando-o quase viscoso, o SBS forma uma malha envolvendo o ligante asfáltico em sua forma fluida e mantendo sua consistência alta devido aos domínios estirênicos ainda se manterem sólidos. Este polímero também traz uma queda significativa no ponto de ruptura Fraass, o que impossibilita o comportamento quebradiço que o asfalto teria a temperaturas baixas devido a sua elasticidade ser preservada mesmo nestas condições. Somando o aumento do ponto de amolecimento com a queda no ponto de ruptura Fraass, é conferido ao CAP um ganho no intervalo de plasticidade, o que significa diminuição da susceptibilidade térmica, característica esta que é a mais procurada dentre os modificadores das propriedades do asfalto.

Conforme a Sinicesp (2010) Asfalto polímero parte da produção de reações químicas entre o polímero virgem, usualmente o SBS (Estireno-butadieno-Estireno) que é um material manufaturado e especificado pela indústria petroquímica, e o cimento asfáltico de petróleo (CAP), sob condições padronizadas de processo (temperatura e cisalhamento mecânico).

Figura 4 –Estrutura do polímero SBS.



Fonte: Bringel, 2007.

Quando o polímero é incorporado ao asfalto, o produto final se torna homogêneo e apresenta uma única fase, isto significa que, visualmente não se observa o polímero disperso no asfalto. A partir da análise em laboratório, verifica-se a modificação das propriedades do CAP, principalmente: aumento de consistência que é a viscosidade e ponto de amolecimento e da capacidade de recuperação elástica sob deformação, entre outras.

O DNER (1998) apud Amaral (2000) apud Machado (2007) citam exemplos da aplicação de asfalto modificado em território nacional sendo estes citados a seguir:

- 1990 - trecho experimental com mistura densa e drenante na Rua Leopoldo Bulhões, com SBS e EVA, construído no estudo realizado pelo IPR;
- 1992 - trecho na Rodovia dos Bandeirantes, com SBS (Betutlex);
- 1993- trecho na PE-75 (Pernambuco) com SBS; trecho no Estado do Paraná, em corredores de ônibus;
- 1994- trecho na PE-74 (Pernambuco) com SBS;
- 1996 -Autódromo de Jacarepaguá, com SBS, Fórmula Indy.

Vale ressaltar que na Rua Leopoldo de Bulhões, foram retirados anualmente corpos-de-prova por 6 anos sendo realizados ensaios para conferir o desempenho da modificação. Foi constatado que neste trecho a pista de rolamento se conservou em excelente estado, não apresentando trincas nem fissuras, além de manter o valor de deflexão característica. Em contrapartida, os trechos constituídos por asfalto convencional e asfalto modificado por EVA demonstraram deformações visíveis, buraco e trincas do tipo couro de crocodilo.

O concreto asfáltico (CBUQ) com polímero introduzido ao CAP, pode ter também várias funções podendo ser usado como revestimento, base regularização ou reforço do pavimento, ressaltando suas condições gerais, não é permitido executar os serviços sob temperaturas climáticas não favoráveis, tais como chuva ou nível de calor inferior a 10°C, lembrando que todo carregamento de asfalto modificado por polímero que chegar á obra deve apresentar o certificado de análise, trazendo as indicações com clareza de sua origem, do seu tipo de preparo, da quantidade de seu conteúdo.e a distância a ser percorrida até o canteiro de obra, todas essa especificações devem respeitar a norma do DNER – ES 385/99

O asfalto modificado pelo polímero contém condições específicas onde o material usado é o material de enchimento (filer) se for necessário no tipo de mistura, agregado miúdo, agregado graúdo e o cimento asfáltico modificado pelo SBS, os quais devem obedecer as normas vigentes para o uso. Os cimentos asfálticos que são modificados devem ser empregados com petróleo modificado por esse polímero, os agregados graúdos podem ser seixo rolado, escória e pedra. O agregado graúdo deve ser constituído de fragmentos duráveis livres de substâncias nocivas e apresentar as características de desgaste igual ou inferior a

55%, admitindo agregados de maior diâmetro, quando na utilização apresentar desempenho satisfatório, seguindo a norma do DNER – ES 385/99

O agregado miúdo para essa mistura pode ser constituído de pó-de-brita, areia ou misturando ambos, esses materiais devem apresentar características resistentes, apresentar moderada angulosidade, evitando substâncias nocivas e torrões de argila, o equivalente de areia deve apresentar igual ou superior a 55%, ainda nas condições específicas o material de enchimento (filer), deve ser constituídos por materiais divididos finamente, secos, isento de grumos e não plásticos, tais como o cimento portland, pó calcário entre outros quem atendam a seguinte granulometria da norma DNER - ME 083

A massa asfáltica modificada por SBS é obtida a partir da incorporação desse polímero ao CAP, em unidades devidamente apropriadas, podendo haver reações químicas, para o cimento asfáltico ser introduzido e obter resultados nesta modificação ele deve conter compatibilidade com o polímero a ser usado. Segundo IBP (1999) os polímeros SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) quando são acrescentados podem modificar bruscamente as funções reológicas do asfalto, fazendo assim a melhora de suas propriedades mecânicas contra as ações adversas do clima, um pouco mais de suas respectivas vantagens são:

- Redução de sua sensibilidade térmica
- Aumento nas propriedades de ligações
- Fortifica a resistência ao longo do tempo
- Ponto de amolecimento mais elevado
- Ponto de ruptura com índices maiores
- Aumento nos fatores da resistência à deformação.

O sistema de aplicação da massa asfáltica modificada com polímero SBS, precisam estar em uma maior temperatura que a convencional para serem aplicados, com isso pode o ligante do polímero sofrer degradação por estarem a altas temperatura chegando a ser acima de 180°C. Precisam ser transportados em veículos contendo tanques isotérmicos, por eles conterem um sistema de aquecimento apropriado.

Os caminhões com tanques térmicos ao chegarem na obra devem descarregar com

uma temperatura maior em comparação com o concreto asfáltico convencional que é na faixa de 160°C, assim necessita ser estocados preferencialmente em lugares que contêm sistemas de aquecimentos de óleo térmico, sendo assim o local onde se encontra o material deve estar em uma temperatura uniformemente distribuída , usando uma bomba de recirculação.

Nos trabalhos na usina o asfalto modificado por polímero a temperatura do ligante será na faixa de 165/170°C e os agregados à temperatura de 170/ 175°C, para proporcionar condição adequada de viscosidade e envolvimento total dos materiais pétreos.

Figura 5 – Amostra do polímero SBS (estireno, butileno, estireno).



Fonte: Google, 2015.

Na figura 1 podemos ver o polímero SBS (estireno, butileno, estireno), é aplicado ao CAP para assim estabelecer uma reação química trazendo vários benefícios ao concreto asfáltico como dito anteriormente, mas como na maioria das vezes a forma em modificar o asfalto com recursos inovadores, tem como uma de suas finalidades principais a redução do CAP por ser um produto com o valor alto, e ao mesmo tempo melhorando sua flexibilidade, resistência e duração com um preço mais acessível que o CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) convencional, exemplo disso é o asfalto borracha, já o modificado por polímero obtêm resultados mais satisfatórios em termos de benefícios, porem seu custo é mais elevado e a relação custo/benefício com esse tipo de material e notado somente com o tempo, por ele ser mais flexível, resistente e suportar as ações do clima, e assim economizando com as manutenções.

Estudos realizados pela equipe da Brasquímica constataram que custo do CAP (50/70) convencional somado com o preço de transporte para o mesmo é de 1300,00 R\$/tonelada, já com a incorporação do polímero é de 2200,00 R\$/tonelada. Podemos concluir assim que o preço de custo do CAP modificado com polímero é quase 60% maior se comparado com o convencional. Portanto devido o uso deste material conter várias vantagens, sendo importante ressaltar que prolonga a vida útil do pavimento, evitando as manutenções que teriam ser feitas usando o convencional, considerando também a redução de manutenção e combustível dos veículos, diminuindo atrasos aos usuários da via e redução nos índices de acidentes, em termos de custo/benefício o polímero também é viável.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados estudados em outras pesquisas encontradas, foram avaliadas melhorias vantajosas nas características dos asfaltos modificados pelo polímero SBS. O aumento do ponto de amolecimento conquistado com a modificação implica redução na suscetibilidade térmica, impedindo o que veículos pesados formem trilhos de roda na pista. A recuperação elástica também tem grandes melhorias, uma vez que mesmo com o tráfego constante, após o trânsito da carga o SBS traz um retorno do ligante sem trazer perdas residuais. Há assim uma melhora em relação a fadiga, uma vez que há comprovações de Pereira et al. (1998) apud Amaral (2000) que o tempo de serviço dos pavimento pode ser 2,6 vezes superior ao do asfalto convencional. Além da análise de resultados de ensaios realizados em outros estudos e experimentos práticos, é possível observar diretamente os benefícios alcançados com o acréscimo do SBS ao asfalto. Como mencionado ao longo do trabalho, existem não somente no exterior, mas em território nacional, trechos de vias e rodovias executados com AMP que mesmo recebendo um tráfego pesado e constante, suportam com desempenho superior ao asfalto convencional todos os carregamentos e variações de temperatura. Concluimos então que o asfalto modificado por polímero SBS, apesar de ter uma usinagem mais específica e um custo mais elevado, torna-se econômico devido a sua excelente performance que praticamente dispensa o uso de manutenções e prolonga a vida do pavimento.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, S.C., estudo de misturas asfálticas densas com agregados do estado do para, utilizando asfalto convencional (cap40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betutlex b65/60). Tese de Mestrado, USP. São Paulo, 2000.
- AZEVEDO, Philipe N e SILVA, Antônio F. Asfalto Modificado com Polímero (SBS). 1999 Tese (Mestrado) – Universidade Católica de Salvador, Salvador.
- BALBO, Jose Tadeu. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo; Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI ET AL. Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, RJ: Petrobras/da, 504p, 2008.
- BRINGEL, R. M. Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2007.
- Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisas. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719).
- CABRINI, Danilo. Pavimento - TrabalhosFeitos.com. Retirado 11, 2013, de <http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Pavimento/43490641.html> Acesso em: 15. Jan. 2015.
- CARVALHO, Espedito T. - Materiais de Construção II. Apostila de sala de aula. 2008. Impresso.
- CASTRO, Pery C.G. – Defeitos dos pavimentos e suas causas. 27p Notas de Aula. 2009.
- CNT.ORG. Mais pontos críticos e metade do pavimento com problemas. Disponível em: <[http://www.cnt.org.br/Paginas/Agencia\\_Noticia.aspx?noticia=pesquisa-cnt-rodovias-2014](http://www.cnt.org.br/Paginas/Agencia_Noticia.aspx?noticia=pesquisa-cnt-rodovias-2014)>. Acesso em: set, 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, (1994) Ensaio Marshall para misturas butuminosas. DNER-ME 43/94. Rio de Janeiro.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem/IPR – Coletânea de Normas – Asfaltos Modificados por Polímeros. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT - ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2009.

DNER 385/99-ES: Pavimentação – Concreto Asfáltico Com Asfalto Polímero. Rio de Janeiro: IPR, 1999.

DNIT 035/2004-ES: Pavimentos flexíveis – Micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2004.

DNIT 131-ME. Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT 150/2010-ES: Pavimentação asfáltica – Lama asfáltica – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DNIT 155-ME. Material asfáltico - Determinação da penetração. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

D'ANTONA, D. M. G. – “Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado por polímero e resíduo da construção civil para as vias urbanas de Manaus”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas, Brasil (2009).

DUMKE, Marilan Pedro. Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha. 2005. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis, 2005.

FERRARA, Renata D`A (2006). Estudo comparativo do custo x benefício entre o asfalto convencional e asfalto modificado pela adição de borracha moída de pneu. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo.

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

GLOBO.COM. Número de mortes e acidentes em rodovias federais cai em 2014, diz PRF. Disponível em: <<http://g1.globo.com/carros/noticia/2015/02/n-de-mortes-e-acidentes-em-rodovias-federais-cai-em-2014-diz-policia.html>>. Acesso em: set, 2015.

- GUSMÃO, Márcio. Restauração rodoviária usando asfalto modificado por polímero. Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2009. (Dissertação de Mestrado).
- IBP, Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. 7 ed., IBP/Comissão do Asfalto. Rio de Janeiro, 1999.
- ITEN, D.O.V.F. – Estudo da mistura asfáltica em CBUQ utilizando asfalto convencional e asfalto modificado por polímero. Blumenau, AM: Universidade Regional de Blumenau, 2011. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- LEITE, L.F.M - Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero. 1999. 266p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- LIRA, Belarmino. Asfalto: Materiais de Construção I. 21p. Apostila – Universidade Federal da Paraíba Departamento de Engenharia Civil, PB.
- LUCENA, M. C. C. – Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.
- MACHADO, Z. Asfalto modificado com polímero SBS para pavimentos drenantes. 2007. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2007.
- MACIEL, Emerson. O emprego de borracha termoplástica tipo estireno-butadieno-estireno em cimentos asfálticos de petróleo. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2010. (Dissertação de Mestrado).
- Manual de Pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719).
- MOURA, Edson – Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório. 2010. 299p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- NEGRÃO, D. P. Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos. 2006. 179 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA, Mirian C – Revestimentos Asfálticos: Tipos e propriedades. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga – UNIFOR – Minas Gerais, 2014.

PINTO, José Luiz Giovanetti. Micro Pavimento: O grande e ainda pouco conhecido e aliado das administrações municipais na solução da recuperação e da manutenção dos pavimentos asfálticos. Asfalto em revista, Rio de Janeiro, ano 5, n. 22, mar 2012.

RAMOS, C. R., GUARÇONI, D. S., MARTINHO F. G. – Curso de Química de Asfalto – IBP. Rio de Janeiro, 1995.

REIS, R.M.M. - Asfalto Modificado com Polímero – Tecnologia de Ponta para Prolongar a Vida dos Pavimentos Asfálticos. 3ª edição. Publicação da Ipiranga Asfaltos S/A, São Paulo, julho de 1999.

ROSA, Ana Paula - Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.20, p.31-38, Novembro, 2012. Análise comparativa entre asfalto modificado com borracha reciclada de pneus e asfalto modificado com polímero, 2012.

SILVA, Eudier A - As vantagens dos polímeros nas misturas asfálticas. Jornal O Engenheiro, Espírito Santo, 15 ed. p.06-09, ago/set.2010.

SILVA, Letícia S. – Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV. 2005. 155p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do SUL, Porto Alegre, 2005.

WHITEOAK, D. 2003. Shell Bitumen Handbook. London : Thomas Telford, Ltd, 2003.

ZAGONEL, Ana Regina – Inovações em revestimentos asfálticos utilizados no Brasil. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Rio Grande do Sul, 2013.