



CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS - UNICHRISTUS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LAIDE MAGALHÃES RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR POLÍMERO SBS E
ADITIVO SURFACTANTE**

FORTALEZA

2020

LAIDE MAGALHÃES RODRIGUES

AVALIAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR POLÍMERO SBS E
ADITIVO SURFACTANTE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Christus como requisito final para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Ma. Alessandra Honório Oliveira.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R696a Rodrigues, Laide Magalhães.
Avaliação do ligante asfáltico modificado por polímero SBS e
aditivo surfactante / Laide Magalhães Rodrigues. - 2020.
62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,
Fortaleza, 2020.

Orientação: Profa. Ma. Alessandra Honório Oliveira.

1. Cimento asfáltico modificado. 2. Copolímero SBS. 3.
Surfactante. 4. Desempenho. I. Título.

CDD 624

LAIDE MAGALHÃES RODRIGUES

AVALIAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR POLÍMERO SBS E
ADITIVO SURFACTANTE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Christus como requisito final para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Ma. Alessandra Honório Oliveira.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ma. Alessandra Honório Oliveira
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Prof. Me. Lucas Cavalcante de Almeida
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Profa. Ma. Leila Maria Coelho de Carvalho
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Aos meus pais, José e Rozilda, que são exemplos de determinação, virtude, criatividade e coragem, e, pude assim, ser um pouco da imensidão que estes são.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que em seu infinito amor e misericórdia, me permitiu desbravar capacidades inimagináveis e tornar-me uma constante evolução neste mundo terreno em direção à máxima espiritual, contribuindo para a melhoria de um espaço justo e agradável a mim e aos que me rodeiam. Além de, ter colocado as demais pessoas que seguem no texto na minha vida.

Aos meus pais, José e Rozilda, que em sua forma singular de cuidar, me subsidiaram na concretização dessa caminhada.

À minha família que é sinônimo de fé e determinação.

À minha querida orientadora, Alessandra, que em sua paciência e firmeza me proporcionou estabilidade e certeza ao longo desse percurso, me ajudando a dar esse passo importante que antecede a minha futura profissão. Como também despertou a afeição pelo conteúdo temático e ter me auxiliado ao longo das orientações.

Aos meus amigos de vida e da faculdade, Elânia, Taynah, Laíse, Ana Beatriz, Maria Eugênia, Maria Cristiane, que ao longo dessa caminhada fiz, que me deram suporte físico, mental e psicológico para persistir na meta de seguir e tornar-me engenheira civil. Mitigando o efeito cansativo do percurso e motivando sempre ir além.

Às pessoas que compõem o Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Universidade Federal do Ceará, na pessoa da Sandra Aguiar e do Wesley, e aos que como eu estavam nas pesquisas laboratoriais, como a Vivian e o Jhonatan, que tornaram ainda mais estimulante ficar naquele espaço de obtenção de conhecimento prático.

À dona Rocilane, que me acolheu em sua casa, dando-me oportunidade para iniciar meus estudos em Fortaleza.

A todos, que contribuíram direta e indiretamente minha eterna gratidão!

“Conhece-te, aceita-te, supera-te.”

(AGOSTINHO, 430)

RESUMO

As estradas de rodagens brasileiras são bastante relevantes pela capacidade de conectar os diversos setores e serviços, como a educação, saúde, lazer e a sociedade de um modo geral. Porém, apenas 12,4% das estradas são pavimentadas, e desta pequena quantidade, 95% são de pavimentos flexíveis. As exigências, tanto climáticas como de tráfego, no revestimento asfáltico estimularam a formação de hipóteses, estudos e descobertas de tecnologias que possibilitam a elevação do desempenho do pavimento asfáltico, na qual se pode citar a implementação do copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS) no ligante asfáltico como modificador e melhorador de suas propriedades. O SBS pode proporcionar o aumento da resistência à deformação permanente e mitigação dos efeitos do envelhecimento, evitando o surgimento precoce de defeitos e prolongando a vida útil de serviço do pavimento, além de, proporcionar uma via mais segura, confortável e econômica. Com isso, o ligante asfáltico CAP 50/70, objeto de modificação, será analisado de duas maneiras: (i) com a incorporação de 4% de polímero SBS e (ii) com a incorporação de 4% de polímero SBS e 1% de aditivo surfactante Dinoram, sendo este último de análise principal. Realizadas as modificações, foram separadas amostras padronizadas conforme as recomendações descritas nas respectivas normas para a realização dos ensaios de: penetração, ponto de amolecimento e viscosidade a partir do viscosímetro rotacional Brookfield. O acréscimo SBS proporcionou o aumento da consistência, a elevação da temperatura de ponto de amolecimento, como também o acréscimo considerável na viscosidade do ligante modificado. O emprego do surfactante atenuou os efeitos das mudanças ocorridas, com exceção da viscosidade, que se manteve em valores altos. As suscetibilidades térmicas dos ligantes modificados apresentaram bom desempenho, ou seja, estabilidade frente aos gradientes térmicos. A viscosidade Brookfield gerou faixas de temperatura de usinagem e compactação bem elevadas devido uma resistência térmica ao aquecimento, causada pela elevação da consistência e, possivelmente, pelo aumento das cadeias químicas advindas da adesão de SBS. Esses resultados elevados sofreram uma suave redução com a adição do surfactante, porém o teor empregado não apresentou as respostas esperadas. Conclui-se que, por meio dos ensaios, é possível ter um ligante modificado por SBS com boa performance, apresentando propriedades de consistência, ponto de amolecimento e sensibilidade térmica melhoradas com o uso do polímero e do surfactante.

Palavras-chave: Cimento asfáltico modificado. Copolímero SBS. Surfactante. Desempenho.

ABSTRACT

Brazilian roadways are very relevant due to the ability to connect the various sectors and services, such as education, health, leisure and society in general. However, only 12.4% of roads are paved, and of this small amount, 95% are flexible pavements. The demands, both climatic and traffic, on the asphalt coating stimulated the formation of hypotheses, studies and discoveries of technologies that enable the increase in the performance of the asphalt pavement, in which we can mention the implementation of the styrene-butadiene-styrene copolymer (SBS) in the asphalt binder as a modifier and enhancer of its properties. SBS can provide increased resistance to permanent deformation and mitigate the effects of aging, preventing the early appearance of defects and extending the service life of the floor, in addition to providing a safer, more comfortable and economical way. With this, the asphalt binder CAP 50/70, object of modification, will be analyzed in two ways: (i) with the incorporation of 4% SBS polymer and (ii) with the incorporation of 4% SBS polymer and 1% surfactant additive Dinoram, the latter being the main analysis. Once the modifications were made, standardized samples were separated according to the recommendations described in the respective standards for carrying out the tests of: penetration, softening point and viscosity from the Brookfield rotational viscometer. The addition of SBS provided an increase in consistency, an increase in the softening point temperature, as well as a considerable increase in the viscosity of the modified binder. The use of surfactant attenuated the effects of the changes that occurred, with the exception of viscosity, which remained at high levels. The thermal susceptibilities of the modified binders showed good performance, that is, stability against thermal gradients. The Brookfield viscosity generated very high machining and compaction temperature ranges due to thermal resistance to heating, caused by the increase in consistency and, possibly, by the increase in chemical chains resulting from SBS adhesion. These high results suffered a slight reduction with the addition of the surfactant, however the content employed did not present the expected responses. It is concluded that, through the tests, it is possible to have a binder modified by SBS with good performance, presenting properties of consistency, softening point and thermal sensitivity improved with the use of the polymer and the surfactante.

Keywords: Modified asphalt cement. SBS copolymer. Surfactant. Performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fracionamento do asfalto através do método SARA	20
Figura 2 - Representação esquemática dos componentes do asfalto	21
Figura 3 - Modelo de micelas de Yen	22
Figura 4 - Comportamento esperado da modificação de ligantes asfálticos por polímero SBS	27
Figura 5 - Representação esquemática da estrutura de um elastômero termoplástico	29
Figura 6 - Representação de SBS: linear e radial	30
Figura 7 - Ligações químicas do copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS).....	30
Figura 8 - Fases morfológicas de um ligante modificado versus ponto de amolecimento	32
Figura 9 - Falha de adesão interfacial agregado-asfalto.....	35
Figura 10 - Viscosidades em função da temperatura para o LA puro e LA modificado por SBS e aditivos	37
Figura 11 - Materiais utilizados na modificação do ligante: SBS e surfactante	40
Figura 12 - Equipamento Silverson L4R de alto cisalhamento	41
Figura 13 - Representação do Ensaio de Penetração	42
Figura 14 - Representação do Ensaio de Ponto de Amolecimento.....	43
Figura 15 - Viscosímetro Brookfield	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de composições químicas de asfalto por tipo de cru	19
Tabela 2 - Temperaturas máximas de estocagem dos ligantes.....	33
Tabela 3 - Valores de temperaturas de usinagem (TU) e compactação (TC).....	38
Tabela 4 - Legenda das amostras utilizadas nos resultados	39
Tabela 5 - Índice de Suscetibilidade Térmica a partir dos resultados de Penetração e Ponto de Amolecimento	50
Tabela 6 – Resultados do ensaio de viscosidades aparente à temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C para os ligantes puro e modificados	51
Tabela 7 - Faixas de Temperaturas (°C) para usinagem e compactação dos ligantes modificados limitados a 177°C	53
Tabela 8 - Faixas de Temperaturas (°C) para usinagem e compactação dos ligantes modificados.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados para o Ensaio de Penetração.....	46
Gráfico 2 - Resultados de penetração para o ligante puro e modificado de Singh et al., 2019.....	47
Gráfico 3 - Resultados para o ensaio de Ponto de Amolecimento.....	49
Gráfico 4 - Viscosidade versus temperatura obtido no ensaio de viscosidade aparente Brookfield.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATR	Afundamento de Trilha de Roda
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
LCC	Líquido da Casca da Castanha do Caju
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
RTFOT	Rolling The Film Oven Test
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos
SBS	Copolímero de Estireno-Butadieno-Estireno
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	16
1.2	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	Ligante asfáltico	18
2.1.1	<i>Composição química do ligante asfáltico.....</i>	19
2.1.2	<i>Tipos de ligantes asfálticos.....</i>	23
2.1.2.1	Asfalto convencional.....	23
2.1.2.2	Asfalto modificados	24
2.1.2.3	Emulsões asfálticas.....	24
2.1.3	<i>Ensaio recorrentes nos ligantes asfálticos</i>	25
2.2	Modificadores de asfalto.....	26
2.2.1	<i>Polímeros</i>	27
2.2.1.1	Copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS)	29
2.2.1.2	Teores e temperaturas usuais para modificação com SBS.....	31
2.2.1.3	Comparativo de desempenho entre polímeros	34
2.2.2	<i>Surfactante</i>	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais.....	39
3.1.1	<i>Ligante asfáltico</i>	40
3.1.2	<i>Copolímero SBS.....</i>	40
3.1.3	<i>Surfactante</i>	41
3.2	Métodos de ensaio	41
3.2.1	<i>Ligantes modificados.....</i>	41

3.2.2	<i>Ensaio de Penetração</i>	42
3.2.3	<i>Ensaio de Ponto de Amolecimento</i>	43
3.2.4	<i>Índice de Suscetibilidade Térmica</i>	44
3.2.5	<i>Ensaio de Viscosidade Aparente por viscosímetro Brookfield</i>	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Ensaio de penetração	46
4.2	Ensaio de ponto de amolecimento	48
4.3	Índice de Suscetibilidade térmica	49
4.4	Ensaio de viscosidade aparente por viscosímetro Brookfield	51
5	CONCLUSÕES	55
5.1	Recomendações para pesquisas futuras	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

As estradas de rodagem do sistema rodoviário brasileiro são de valor bastante notável devido sua responsabilidade em contribuir nas atividades econômicas do país, como também pela capacidade de integrar e conectar os diversos serviços e setores, como a saúde, a educação, o lazer, ou seja, a sociedade de um modo geral. Porém, apenas 12,4% da malha rodoviária é constituída em rodovias pavimentadas, sendo representadas, em 95%, em pavimentos flexíveis, digo, por meio do emprego do revestimento asfáltico convencional (BERNUCCI *et al.*, 2010; CNT, 2019a).

O revestimento asfáltico apresenta características intrínsecas a sua combinação, de agregados pétreos e ligante asfáltico, que satisfazem, de modo geral, aos requisitos a qual são submetidos, sendo assim bastante empregado. Contudo, durante a vida útil de serviço dos pavimentos que se encontram submetidos a maiores exigências mecânicas e/ou climáticas, passou-se a notar alguns defeitos recorrentes, surgindo então, a imprescindibilidade de adoção de estudos e técnicas que alavancassem o desempenho do pavimento, propiciando uma via mais segura, confortável e econômica (SIMIONATO; SILVA JUNIOR; FONTENELE, 2018).

Para o alcance de um revestimento asfáltico eficiente, é necessário dimensioná-lo adequadamente ao ambiente requerido, a partir de informações como: clima, volume e velocidade do tráfego, como também selecionar muito bem os elementos que o constituem, por meio de testes para validação de suas propriedades e cumprimento do controle de qualidade (ABEDA, 2007; SOARES; CAVALCANTE, 2000).

O revestimento asfáltico convencional, mesmo seguindo o rigor que há no dimensionamento, não deixará de apresentar defeitos, sendo assim, prevenir e mitigar o seu aparecimento precoce, o principal desafio dos profissionais desta área. Visar o prolongamento da vida útil de serviço dos pavimentos com desempenho adequado, é uma das metas indispensáveis que o projetista almeja durante a delineação do pavimento asfáltico (WAHR *et al.*, 2011).

Os defeitos mais comuns são os de resistência (deformação permanente e trincamentos térmico e por fadiga), assim como, os associados a durabilidade (exposição a altas temperaturas, oxidação e intempéries ambientais adversas). O aparecimento dos defeitos pode surgir a curto e a longo prazos por causa de fatores

isolados ou combinados, onde apesar da correção destes, o pavimento já não é o mesmo quanto a capacidade resistiva e tempo útil de serviço, onde se faz necessário intervir com tecnologias que possam alterar e impulsionar o funcionamento do revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Uma das tecnologias adotadas para combater os efeitos e consequências dos defeitos é a modificação do ligante asfáltico, importante componente da mistura asfáltica. A modificação ocorre com a implementação de alguns polímeros que agem transformando sua estrutura química, física e seu comportamento reológico.

Os polímeros são produtos interessantes que têm como características a capacidade de otimizar as propriedades relativas à resistência e durabilidade do ligante, tais como: maior resistência às deformações permanentes (afundamento de trilha de roda - ATR); maior resistência a trincas de fadiga e de temperatura; maior adesão ao conjunto ligante-agregado; maior resistência ao envelhecimento de curto e longo prazo; e homogeneidade do ligante ao longo da obra (AURILIO *et al.*, 2020; BRINGEL, 2007; LEITE, 1999; LUCENA, 2005; PORTO *et al.*, 2019).

Dentre os polímeros, consta o copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS), que é uma alternativa adequada as pretensões para um ligante asfáltico com desempenho elevado, dado que, através de suas propriedades é capaz de mitigar as deformações permanentes, trincamentos e impactos do envelhecimento. O desafio, torna-se então, combater alguns problemas que podem ocorrer em detrimento da modificação do ligante asfáltico, como intensificação de algumas propriedades e a tendência a segregação, que podem ser combatidos com aditivos de comportamento surfactante (PORTO *et al.*, 2019; WAHR *et al.*, 2011).

Os aditivos surfactantes são produtos químicos capazes de modificar a interação entre as partículas agindo em sua interface, dispersando-os, geralmente, uma fase interna em uma externa, sendo o SBS e o asfalto, respectivamente. São constituídos por propriedades que são essenciais aos ligantes, favorecendo a melhoria da adesividade e da trabalhabilidade, além de serem capazes de proporcionar a redução de temperaturas de usinagem e compactação e consequente, diminuição dos voláteis lançados a atmosfera (RODRIGUES, 2016).

Diante do exposto, foi delineado os seguintes objetivos para a pesquisa, frente a elaboração do ligante asfáltico modificado:

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar e avaliar uma alternativa aos efeitos indesejados existentes em ligantes asfálticos modificados por SBS.

1.1.2 Objetivos específicos

Para isso, serão apresentadas avaliações para os ligantes asfálticos modificados: após a adição do polímero SBS e após a adição do polímero SBS mais o aditivo surfactante, de modo, a interpretar e correlacionar os resultados, por meio das seguintes investigações:

- Verificar a variação entre consistências encontradas nas modificações, tanto com SBS, como SBS e surfactante, e suas relações com o especificado em literatura, obtidas através do ensaio de penetração.
- Analisar o comportamento das diferentes temperaturas de amolecimento encontradas nas duas modificações realizadas no ligante através do ensaio de ponto de amolecimento.
- Acompanhar os efeitos do Índice de Suscetibilidade Térmica no desempenho nas duas modificações do ligante e a relação com outros parâmetros.
- Avaliar as viscosidades dos ligantes modificados, assim como, comparar as temperaturas de usinagem e compactação provenientes do ensaio de viscosidade Brookfield.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado de acordo com os seguintes capítulos:

O Capítulo de Introdução, corrente capítulo, apresenta a relevância deste trabalho através da explanação breve sobre o ligante modificado com polímero e aditivo surfactante, além da sucinta contextualização na pavimentação, seguida da problemática enfrentada, justificando a importância do estudo e os objetivos que foram almeçados com a realização da pesquisa.

O Capítulo de Revisão de Literatura é constituído com as principais referências sobre ligante asfáltico, polímero SBS e aditivo surfactante, na qual são

fontes que subsidiaram o desenvolvimento da pesquisa e definição das medidas adotadas posteriormente, como os elementos constituintes e os teores de análise.

O Capítulo de Materiais e Métodos indica os materiais utilizados na pesquisa e os métodos abordados para realização dos ensaios usados, como os ensaios de: penetração, ponto de amolecimento e viscosidade aparente por viscosímetro rotacional Brookfield.

O Capítulo de Resultados e Discussões apresenta os resultados obtidos com os ensaios realizados, como também manifesta a análise e comparações destes.

E, por fim, o Capítulo de Conclusões é caracterizado por representar se a ideia inicial foi alcançada e as principais características obtidas. Também foi realizado recomendações para trabalhos futuros baseados na corrente linha de pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção se encontra a base de referenciais essenciais a compreensão do estudo realizado. Será discutido o elemento principal, nesse caso, o ligante asfáltico e os elementos que modificarão a sua estrutura, como o polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) e o aditivo surfactante Dinoram. São descritas as propriedades dos componentes isolados e o provável comportamento que assumirão decorrente de sua combinação.

2.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico, cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou ainda asfalto, é o elemento que, derivado do petróleo e combinado com outros materiais (agregados e/ou agentes modificadores), viabiliza a utilização de revestimentos asfálticos em larga escala em rodovias devido suas especificidades que possibilitam um excelente desempenho físico e mecânico dos pavimentos, tais como (LEITE, 1999; MOTHE, 2009; BERNUCCI *et al.*, 2010):

- i. Termoviscoelasticidade: propriedade que modifica o comportamento mecânico, sendo suscetível à temperatura aplicada, como também à velocidade, tempo e intensidade do carregamento, ou seja, a deformação ocorre concomitante ao aumento dos fatores que o interferem.
- ii. Impermeabilidade a água: o ligante não sofre diretamente o efeito da água, como perda de resistência ou mudança química;
- iii. Pouca reatividade: pouco é afetado devido a ação de ácidos, álcalis e sais, evitando a modificação química e sua fragilização, porém sofre oxidação lenta (SINICESP, 2010); e
- iv. Boa adesividade: permite união entre os agregados pétreos em suas diversas granulometrias possibilitando a aplicabilidade do revestimento asfáltico.

Estas qualidades provenientes do ligante asfáltico são capazes de fazer o revestimento trabalhar como unidade e homogeneidade, absorvendo e resistindo às condições impostas de dimensionamento. Quando o ligante asfáltico tem as suas delineações modificadas e é submetido a condições atípicas de comportamento, ou seja, exigências superiores ao seu dimensionamento ou resistência intrínseca, pode sofrer antes do previsto e, assim, surgir defeitos no pavimento.

A consequência dos defeitos é totalmente indesejada, visto que, afeta diversos domínios, tendo como exemplos, o econômico, a segurança e o conforto do usuário. A análise das características químicas do ligante são essenciais, pois colabora na compreensão dos fenômenos do comportamento, além de, possibilitar a verificação de compatibilização (LEITE, 1999; PORTO *et al.*, 2019).

2.1.1 Composição química do ligante asfáltico

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas de acordo com a singularidade que cada fonte dispõe, apresentando mais ou menos asfalto em sua composição. Seu aspecto compreende variações de líquidos negros viscosos até líquidos castanhos bastante fluidos, com composição química predominantemente parafínica, naftênica ou aromática (BERNUCCI *et al.*, 2010).

O ligante asfáltico é uma combinação de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais - vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio), originados em fontes naturais de petróleo, aflorados em superfícies formando lagos ou através do processo de destilação, com 1 ou 2 estágios de refino do petróleo, processo que é em função da qualidade do petróleo, seja pesado ou leve (BERNUCCI *et al.*, 2010; HUNTER; SELF; READ, 2015).

Pela análise elementar, tem-se a composição do asfalto discriminado na Tabela 1, com a origem que este apresenta e a refinaria que o processa, onde as proporções, além de, depender da fonte, também recebem certa influência do refino. Essa distribuição elementar é bastante interessante quanto a modificação do ligante.

Tabela 1 - Exemplo de composições químicas de asfalto por tipo de cru

Origem	Mexicano	Boscan	Califórnia Estados Unidos	Cabiúnas Brasil	Cabiúnas Brasil	Árabe Leve Oriente Médio
Refinaria	-	RLAM	-	Regap Minas Gerais	Replan São Paulo	Reduc Rio de Janeiro
Carbono %	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio %	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio %	0,3	0,8	1,1	0,9	0,9	0,5
Enxofre %	5,2	5,4	1	0,9	2,1	4,4
Oxigênio %	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio ppm	180	1380	4	38	210	78
Níquel ppm	22	109	6	32	66	24

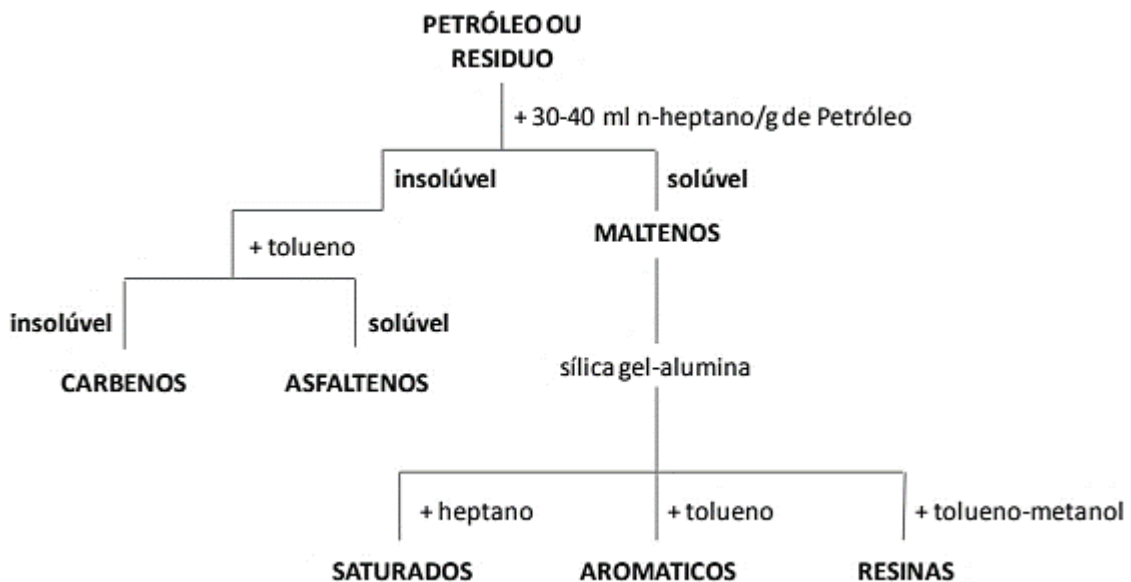
Fonte: Adaptado de Leite (2003).

Nessa primeira etapa inicia o processo de um dos problemas enfrentados pelo ligante, que é o envelhecimento ocasionado por conta das altas temperaturas de refino do asfalto, onde parte volátil evapora, permanecendo a parte mais rígida e com maior temperatura de corte (VALIM, 2016).

A composição química do asfalto também pode apresentar uma classificação quanto o fracionamento, sendo na Europa utilizado e bastante conhecido o método SARA, que consiste em separar os elementos constituintes através da técnica de cromatografia de camada fina com detecção por ionização de chama, distinguindo-os em saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos, originando a sigla SARA (HUNTER; SELF; READ, 2015).

A cromatografia de camada fina (TLC), método latroscan, é um método simples e rápido de se obter a composição química do asfalto. Os asfaltenos precipitam com n-heptano e em seguida ocorre a separação dos constituintes solúveis em colunas capilares contendo sílica ou alumina, como meio de adsorção. Os eluentes com solventes de diferentes polaridades, passam por ionização de chama, para a detecção de resinas, saturados e aromáticos. Entenda o processo na Figura 1.

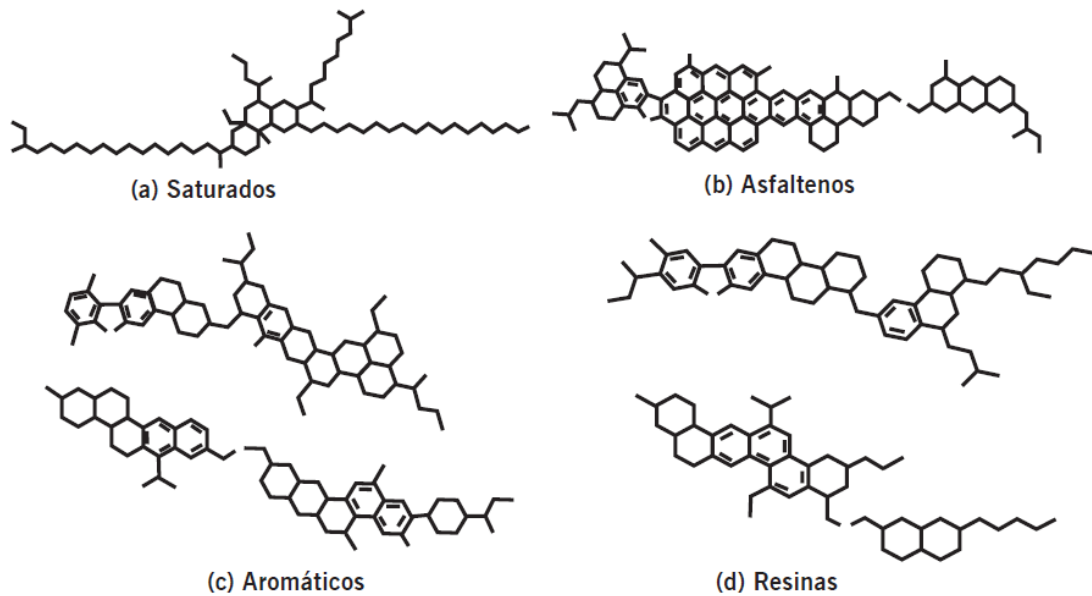
Figura 1 - Fracionamento do asfalto através do método SARA



Fonte: SPEICH, 2016 apud CAVA, 2020.

O método latroscan também separa por polaridade os asfaltenos, além dos saturados, aromáticos e resinas, em colunas capilares, sucedendo à eluição e à detecção por chama (FC, 2015; BERNUCCI *et al.*, 2010). A Figura 2 mostra a representação química dos elementos que compõem o fracionamento SARA.

Figura 2 - Representação esquemática dos componentes do asfalto



Fonte: Leite (2003).

Tomando como referência a composição do ligante asfáltico, é admissível inferir que este é um sistema constituído de moléculas de asfaltenos e frações maltênicas ou maltenos (óleos saturados, aromáticos e resinas) que a temperatura ambiente é semissólida, com coloração marrom-escura a preta, e que com quantidades diferenciadas de seus componentes podem apresentar consistência, dispersão e adesividade variadas (ABEDA, 2010).

Os saturados, compõem o CAP em 5 a 20%, influenciando de maneira negativa quanto a suscetibilidade térmica, devido seu arranjo em são cadeias retas e ramificadas de hidrocarbonetos, sendo óleos viscosos apolares transparentes. Em óleos brutos, com o aumento das frações de alto peso molecular, como as resinas e os asfaltenos, a porção saturada tende a diminuir (SILVA, 2016).

Os aromáticos são elementos que se encontram em maior proporção nos asfaltos, em cerca de 40 a 65%, a qual apresentam baixa massa molar e é o principal meio de dispersão e peptização dos asfaltenos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

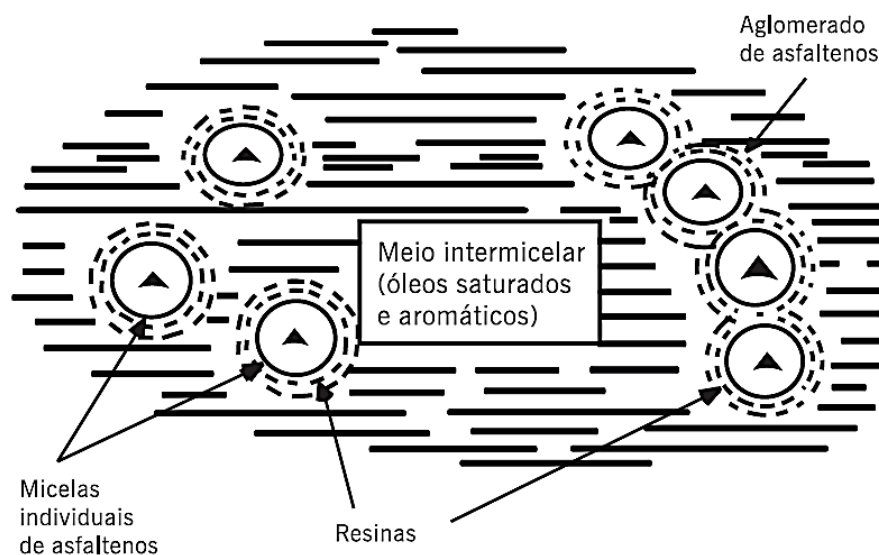
Os asfaltenos são, geralmente, sólidos friáveis de cor marrom escura a preta, sendo macromoléculas de petróleo de alta massa molar formadas preponderantemente por anéis aromáticos policondensados e cadeias alifáticas laterais, onde apresentam em menor proporção grupos funcionais ácidos e básicos que envolvem heteroátomos como nitrogênio, oxigênio e enxofre. Também ocorre a presença de alguns metais, como vanádio e níquel. Representando cerca de 5 a 25%

do asfalto, quando constituídos em proporções abaixo de 10% de asfaltenos podem resultar em ligantes pouco estáveis devido sua baixa capacidade de associação (CALEMMA *et al.*, 1995; LUCENA, 2005).

E, as resinas são solúveis em n-heptano, sendo compostos de hidrogênio e carbono e contêm um pequeno número de átomos de oxigênio, enxofre e nitrogênio. São de cor marrom escuro, sólido ou semissólido e, sendo de natureza polar, caracterizam-se como fortemente adesivas. As resinas são agentes dispersantes ou peptizadores para os asfaltenos, recobrando-os. Em óleos pesados, ocorre uma boa agregação e peptização dos asfaltenos devido a tendência a apresentar mais aromáticos e resinas em sua composição. A proporção de resinas para asfaltenos governa, até certo ponto, o caráter de solução (sol) ou de gelatina (gel) do betume (HUNTER; SELF; READ, 2015; QUINTERO, 2009).

Uma boa proporção de aromáticos e resinas, formam CAPs com boa mobilidade, apresentam suscetibilidade térmica alta e o ponto de amolecimento baixo, por vezes, chamados de CAPs moles, são características dos CAPs tipo Sol, que apresentam os asfaltenos peptizados na porção maltênica, como visualizado na parte esquerda da Figura 2. Os CAPs tipo GEL constituem os asfaltenos que em porções desbalanceadas não configuram uma boa solvência, se associando, o que proporciona baixa suscetibilidade térmica e maior ponto de amolecimento (lado direito da Figura 3). O comportamento gel é mitigado com o aumento da temperatura, quando o ligante apresenta uma menor viscosidade (LUCENA, 2005).

Figura 3 - Modelo de micelas de Yen



Fonte: YEN, 1991 apud BERNUCCI *et al.*, 2010.

As proporções das frações constituintes do ligante asfáltico com adequado balanceamento contribuem na qualidade e conseqüentemente na durabilidade da vida útil do pavimento. Um dos motivos é devido ao ligante asfáltico sofrer envelhecimento, seja por oxidação, do ar ou água ou por exposição a gradientes discrepantes de temperatura. A composição química é alterada, tornando-o mais rígido devido a volatilização da fração maltênica onde há prevalência dos asfaltenos, com tendência a aumento da elasticidade, ou seja, aumento da rigidez do revestimento asfáltico, o que predispõe ao surgimento de trincas ao longo da área afetada (CAVA, 2020).

A estruturação química do asfalto tem grande interferência nas propriedades físicas e mecânicas das misturas asfálticas, porém, seu maior impacto está identificado quanto a incorporação de agentes modificadores, etapa que possibilita melhorias no desempenho do pavimento (LEITE, 1999).

Dentre as mudanças visadas nas modificações do CAP, pode-se citar os que melhoram seu desempenho sem alterar significativamente suas propriedades físicas e as que alteram e mesmo assim conseguem assegurar uma boa performance, associado a elevação de características como: ponto de amolecimento e elasticidade superiores; adesividade ligante-agregado e coesão satisfatórias; e aumento de resistência à deformação e combate ao processo de envelhecimento. Porém, é necessário também conhecer os tipos de asfaltos disponíveis a pavimentação (BERNUCCI *et al.*, 2010; QUINTERO, 2009; SINICESP, 2010).

2.1.2 *Tipos de ligantes asfálticos*

Os ligantes recebem as seguintes classificações, para uso em pavimentação e em indústrias: i. Asfaltos convencionais e modificados; ii. Emulsões asfálticas convencionais e modificadas; iii. Aditivos e iv. Impermeabilizantes (DNIT, 2006a). Os usados na pavimentação são:

2.1.2.1 Asfalto convencional

É o ligante em sua forma pura, suas especificidades decorrem do parâmetro consistência, onde estão delimitadas pelo índice de penetração, como os CAPs: CAP 35/45; CAP 50/70; CAP 85/100; e CAP 150/200. Podem também estar discriminados quanto a adição de algum solvente volátil (querosene, nafta ou gasolina), de cura média-CM e cura rápida-CR, onde a cura representa a velocidade de evaporação do solvente, na qual têm-se ligantes asfálticos menos viscosos e

temperaturas mais baixas de manuseio, são exemplos de asfaltos diluídos de petróleo (ADPs): CM-30; CM-70; CR-70; e CR-250 (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.1.2.2 Asfalto modificados

São ligantes asfálticos que recebem a incorporação de outros elementos para melhoria de suas propriedades. Os asfaltos modificados por borracha (AMB) portam características que dependem do tipo de borracha usada, da porcentagem adicionada, do tamanho das partículas, do tempo, da temperatura de reação e da química do CAP, recebendo nomenclaturas como: AB 8 e AB 22 (CERATTI; BERNUCCI, SOARES, 2015).

Asfaltos modificados por polímero (AMP), constam com adições de um ou mais polímeros com valores entre 3 e 8% em massa da quantidade do CAP, sendo, AMPs: 55/75 E; 60/85 E; 64/90 E. Esse tipo de asfalto tem sido bastante utilizado como artifício para combater os defeitos recorrentes em rodovias que apresentam elevados tráfego e carregamentos e sensibilidade térmica, como deformações permanentes e trincamento por fadiga ou baixas temperatura (LUCENA, 2005; CERATTI; BERNUCCI, SOARES, 2015). Apresenta classificação em função do ponto de amolecimento e da recuperação elástica (DNIT, 2011).

Os CAP TLA são asfaltos naturais provenientes de Trinidad, este é usado como modificador de ligantes, com substituição em massa de 20 a 30%, proporcionando redução da suscetibilidade térmica, resistência a solventes e a deformações permanentes, como porta de técnicas de “fabricação” semelhantes aos asfaltos convencionais, onde comprovadamente supera o asfalto convencional (SANTOS *et al.*, 2009).

2.1.2.3 Emulsões asfálticas

A classificação das emulsões, definida no relatório técnico da Agência Nacional de Petróleo (ANP), são feitas em função: (a) do tempo necessário para que ocorra a ruptura, dividida em lenta, média ou rápida; (b) do teor de asfalto contido na mesma; e (c) da carga iônica. Por exemplo, uma emulsão designada de RR 1C representa uma emulsão de ruptura rápida RR, catiônica C, e o número 1 indica a faixa de viscosidade. O tempo de ruptura pode ser atrasada devido a alguns fatores, tais como: características químicas do asfalto, alto teor de emulsificante, agregados com problemas em algumas propriedades, entre outros (GUSMÃO, 2009).

As emulsões convencionais representam a dispersão de fluido coloidal de uma fase asfáltica (50 a 70% em massa) em fase aquosa, conseguida através da adição de agente emulsificante e aditivos.

Emulsões asfálticas modificadas, realizadas por polímeros elastoméricos, é um progresso dos ligantes asfálticos que possibilita apresentarem um maior retorno elástico, menor envelhecimento, melhor coesão e maior durabilidade (CERATTI; BERNUCCI, SOARES, 2015).

2.1.3 *Ensaaios recorrentes nos ligantes asfálticos*

A execução de ensaios em um material isolado ou resultante de uma combinação é fundamentada na necessidade de se conhecer as propriedades nele presentes. As propriedades são atributos que podem determinar o comportamento e sua influência a condicionantes variadas. O ensaio, além de, descrever o desempenho, vai possibilitar seu enquadramento frente aos parâmetros pretendidos para cada utilização e conseqüentemente sua adesão ou não.

Os ensaios dos ligantes podem ser categorizados em quatro tipos, sendo ensaios: de consistência, de durabilidade, de pureza e de segurança (BERNUCCI *et al.*, 2010). Logo, para atestar a qualidade e uma boa performance dos materiais asfálticos, utilizam-se os ensaios a seguir como indicadores para um ligante asfáltico adequado: ensaio de penetração, ensaio de ponto de amolecimento, ensaio de viscosidade aparente, ensaio de ponto de fulgor, Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), ensaio de reologia do ligante através de reômetro, ensaio de ductilidade. Os ensaios supracitados devem ter tal confiabilidade que possa simular bem o comportamento e alterações decorrentes em laboratório do ligante asfáltico não se diferenciando muito da realidade em campo.

O ensaio de penetração, medida de classificação dos cimentos asfálticos convencionais, além de prático é bastante rápido na determinação de valores de consistência. Ligantes com elevadas consistências estão relacionadas com temperaturas, de modo geral, também mais altas, que por sua vez, podem apresentar correlação com o surgimento de trincamento por fadigas entre outros defeitos, enquanto que ligantes menos consistentes estão associados com deformações permanentes (QUINTERO, 2016).

O ensaio de ponto de amolecimento representa a temperatura para uma trabalhabilidade ideal do ligante e quando este tende a mudar suas propriedades

viscoelásticas. Esta medida representa quão deve ser aquecido para iniciar sua fusão. E, a partir dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento, pode-se aferir a suscetibilidade térmica do ligante asfáltico analisado, informação imprescindível ao conhecimento tendencioso do comportamento frente a variações de temperaturas que o próprio ligante estará sujeito ao longo de seu manuseio e de sua vida útil de serviço (DNIT, 2006b; SILVA *et al.*, 2017; SOARES; CAVALCANTE, 2000).

A obtenção de parâmetros como consistência para bombeamento e estocagem são obtidos com o ensaio de viscosidade aparente, que também gera informações para traçar o gráfico viscosidade *versus* temperatura de usinagem e compactação (TUC) que retratam temperaturas ideais para trabalho, onde se obtêm as melhores condições de misturas dos elementos componentes do revestimento asfáltico e consequente aplicação adequando-se as exigências do ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2010; SOBREIRO, 2014).

2.2 Modificadores de asfalto

Situações com alta requisição do pavimento, acarretados por meio de carregamentos excepcionais e/ou exposição a mudanças climáticas discrepantes, submetem o ligante asfáltico a uma condição adversa que propicia o aparecimento precoce de falhas e o envelhecimento, tendo em consequência a sua inadequação para uso do pavimento (SILVA *et al.*, 2002). O combate contra o envelhecimento e o maior desempenho do revestimento asfáltico, através de testes e análises, possibilitou que outros elementos fossem incorporados ao ligante asfáltico objetivando sua otimização como importante componente do revestimento (BRINGEL *et al.*, 2006; KING; MUNCY; PRUDHOMME, 1999).

Os modificadores de asfalto mais empregados atualmente são os alteram suas propriedades, atribuindo-lhes ganhos de desempenho, tais como as fibras: poliméricas, de vidro, asbestos, de celulose; os asfaltos naturais como gilsonita, asfáltita ou asfalto proveniente de Trinidad; filleres como cal, cimento, sílica entre outros ou por enxofre elementar (GUSMÃO, 2009; LEITE, 1999).

E, ainda há, os elementos complementares que asseguram o uso dos modificadores, que por algum motivo podem necessitar de intervenção, tendo como exemplo a etapa de estocagem que pode ocorrer separação de fase, bastante presente em modificações com polímeros, na qual aditivos de compatibilização são

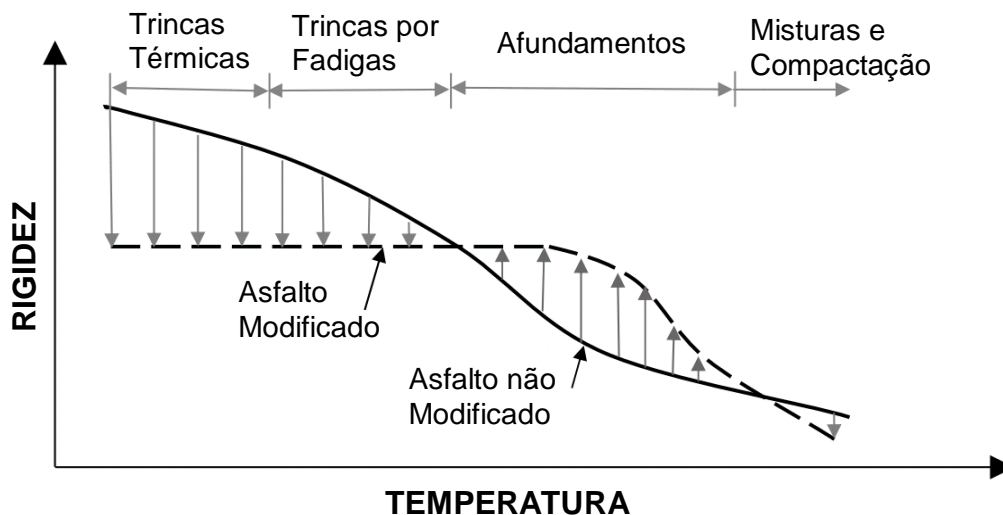
empregados para sanar tal efeito, atuando de modo a dispersar as moléculas e uni-las em uma só fase (PORTO *et al.*, 2019).

2.2.1 Polímeros

Dentre os modificadores do asfalto, tem se destacado o uso de polímeros, que estão sendo amplamente adotados e analisados como mecanismo para potencializar e adequar o uso de ligantes em pavimentos cujas solicitações de cargas e de clima são mais intensas, como visualizado na Figura 4. O uso do polímero torna o CAP mais elástico (mais dúctil), mais resistente ao processo oxidativo e com suscetibilidade térmica mais baixa, além de apresentar uma boa adesividade com o agregado (BRINGEL, 2007; SILVA *et al.*, 2002).

Ainda na figura 4, percebe-se o delineamento do provável comportamento do ligante asfáltico modificado, onde a linha contínua se refere ao ligante puro e a linha tracejada ao ligante modificado. É notado a tendência do ligante modificado dado temperaturas mais baixas e rigidez maior, proporcionar a mitigação de trincas de procedência térmica e por causa de fadigas, como também, o aumento da resistência aos afundamentos em temperaturas mais elevadas (BEHNOOD; GHAREHVERAN, 2019). Isso se deve a mudança de reologia do ligante frente às variações de carga, temperatura e tempo.

Figura 4 - Comportamento esperado da modificação de ligantes asfálticos por polímero SBS



Fonte: Adaptado de BEHNOOD; GHAREHVERAN (2019).

O Asfalto modificado por polímero (AMP) permite uma abrangente aplicação, podendo ser empregado nos diversos tipos de misturas, tanto usinadas à quente (concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ, *stone matrix asphalt* - SMA, concreto poroso de atrito - CPA) e à frio (pré-misturado à frio - PMF), como em tratamentos superficiais (BERNUCCI *et al.*, 2010; BRASQUIMICA, 2003).

As incorporações poliméricas mais corriqueiras na pavimentação asfáltica são: acetato de vinila (EVA), os copolímeros em bloco de estireno butadieno (SB), borracha estireno butadieno (SBR), estireno butadieno estireno (SBS), estireno isopreno estireno (SIS), estireno etileno butadieno estireno (SEBS) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS) (BERNUCCI *et al.*, 2010).

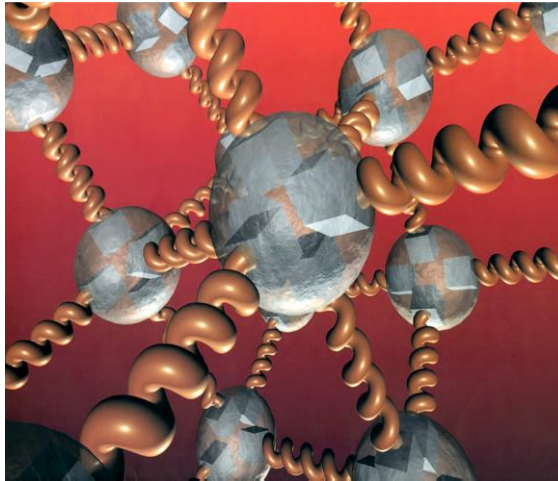
Os polímeros são elementos de elevado peso molecular, cuja estrutura é representada por repetições de unidades químicas simples denominadas meros, podendo ter origem natural ou sintética. Quando o polímero é constituído de tipos diferentes de meros este é denominado copolímero (SILVA; SILVA, 2003).

Os polímeros são materiais viscoelásticos dependentes do tempo e da temperatura. As propriedades mecânicas são afetadas pelo peso molecular, estrutura química (materiais de partida - meros), distribuição da cristalinidade e temperatura, sendo classificados em borrachas, plásticos e fibras (ANTT, 2016).

O tipo de reação empregado no polímero para sua obtenção e a técnica de preparação pode descrever seu comportamento. Poliadição, policondensação e modificação química de outro polímero são os tipos de reações empregados, onde produzem como exemplo o SBR, PET (Polietileno tereftalato) e SBS, respectivamente (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Quanto sua resposta frente a variações de temperatura, Mano e Mendes (1999), classificam em termorrígido, termoplástico, elastômeros e elastômeros termoplásticos, sendo este último característico do SBS. Estando representado na Figura 5, em uma configuração de sua estrutura tridimensional, é notável como ocorre o aumento do elemento através das ligações que podem ocorrer em suas diversas direções, criando assim uma espécie de malha no espaço, fator que contribui na resposta elástica e seu fortalecimento quanto a resistência de tração.

Figura 5 - Representação esquemática da estrutura de um elastômero termoplástico



Fonte: Hunter; Self; Read (2015).

Em geral, os elastômeros termoplásticos derivam sua força e elasticidade de uma reticulação física ou através de emaranhados de moléculas, configurado por formação de uma rede tridimensional de reticulação que pode ser alcançada pela associação dos blocos terminais de poliestireno em domínios separados para formar zonas semicristalinas, fornecendo ligações cruzadas com as cadeias de butadieno. As ligações cruzadas são formadas perto da temperatura ambiente, mas são quebradas a temperaturas elevadas, apenas para reformar novamente no resfriamento, sendo então uma rede tridimensional reversível (HUNTER; SELF; READ, 2015).

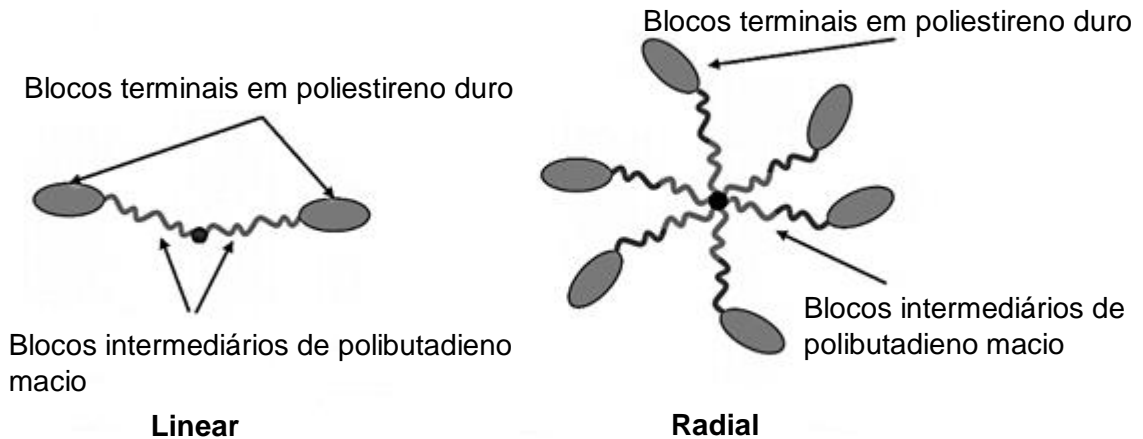
Os elastômeros termoplásticos, como o SBS, são fortes colaboradores aos ligantes asfálticos devido sua compatibilidade conferida pelas propriedades físicas, químicas e reológicas semelhantes presentes nos dois materiais. Além do, comportamento termoelástico em baixas temperaturas (retorno elástico) e em altas, termoplástico (moldabilidade), como também estabilidade química em boa parte de sua aplicação (BERNUCCI *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2002).

2.2.1.1 Copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS)

O SBS é um copolímero em bloco de estireno-butadieno-estireno, com significativa distinção devido ao seu tipo de associação, ocorrendo em lineares e radiais, representado na Figura 6. A conformação espacial do SBS é formada por duas regiões distintas chamadas de microdomínios estirênicos e butadiênicos, em que ocorre microseparação de fase (ABEDA, 2007). Essa configuração é bastante

importante para a determinação do desempenho final da modificação do ligante, apresentando uma maior estabilidade, como uma dispersão elástica e viscosa mais eficiente, nesse caso, mais propício a associação em radial (PORTO *et al.*, 2019).

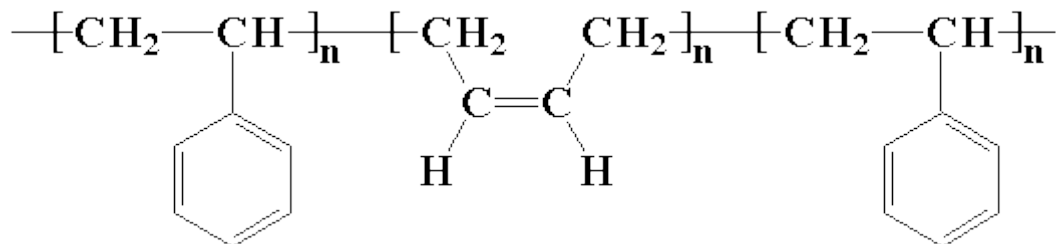
Figura 6 - Representação de SBS: linear e radial



Fonte: Adaptado de Porto *et al.* (2019)

A característica de durabilidade presente no SBS se deve a presença do poliestireno, que é um plástico resistente. O poliestireno devido sua elasticidade, dispõe de propriedades parecidas aos da borracha. Na figura 7, têm-se as ligações químicas do SBS, dos componentes dos microdomínios estirênicos e butadiênicos (POLYMER SCIENC LEARNING CENTER, 2020). O agrupamento é uma tendência das cadeias de estireno, quando isto ocorre, uma outra cadeia se associa a outro grupo e os diferentes grupos se ligam as cadeias de butadieno, na qual confere no final ao material a capacidade de mesmo após ser esticado manter sua forma.

Figura 7 - Ligações químicas do copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS)



Fonte: Polymer Scienc Learning Center (2020).

No ligante asfáltico, o bloco de butadieno consegue assegurar o firmamento dos blocos de poliestireno. O butadieno se associa com a fase maltênica do ligante

ocupando por vezes o volume do CAP. Por tal processo, é possível, então, que baixos teores do copolímero SBS constituam uma forte rede elástica dentro do CAP, contribuindo nas propriedades de resistência ao fluxo e deformação permanente devido sua alta recuperação elástica e resistência a tração (LEITE, 1999 apud LUCENA, 2005).

Logo, uma das tecnologias poliméricas mais satisfatórias é a modificação do ligante através da incorporação do copolímero SBS, destacando-se as características proporcionadas à combinação como melhoria na adesividade ao agregado e elasticidade, obtido por conta de sua estrutura química interagir o bloco butadieno e com os maltenos.

Os progressos das características do CAP também abrangem o crescimento da resistência à oxidação e conseqüentemente minoração do envelhecimento. O SBS, geralmente, é constituído em 20 a 30% (m/m) de teor de estireno, sendo o teor favorável, quando este valor supera os 30%, pode ocorrer uma inclinação a baixa compatibilidade do SBS com o ligante, seguidos de dificuldades quanto à dispersão e instabilidade no armazenamento (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

2.2.1.2 Teores e temperaturas usuais para modificação com SBS

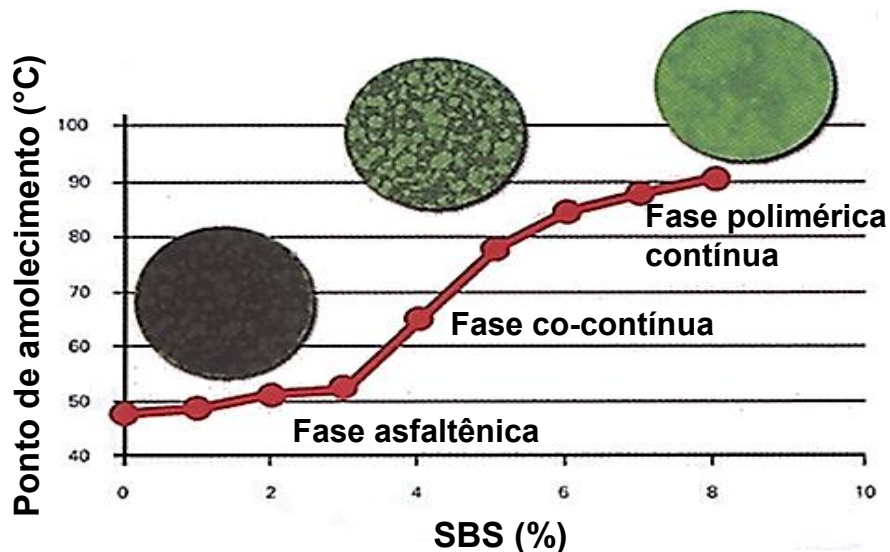
Para um ligante ser considerado um asfalto modificado por polímero o teor do modificador é limitado a 7%, ultrapassando tal valor, este passa a ter denominação de asfalto altamente modificado por polímero (HiMA).

Os teores mais recomendados de SBS, em porcentagem, oscilam entre 3 a 5%, onde há uma relação harmoniosa do aumento dos valores do SBS, da consistência e da temperatura. Valores acima de 5% podem apresentar comportamento atípico do ligante modificado com aumentos de temperaturas excepcionais que podem inviabilizar o processo de usinagem e compactação, além dos impactos negativos proporcionados a natureza devido as altas temperaturas impressas para aplicabilidade do ligante modificado (JONI, 2017; KANABAR, 2010; SOBREIRO, 2014).

A alteração de comportamento do ligante modificado se deve ao elemento dominante resultante da combinação, como pode ser observado na Figura 8. Com cerca de 2,5% de SBS a fase dominante é asfáltica, sendo 25% elastômero e 75% asfalto e com teores acima de 7% de SBS, o ligante modificado se comporta com uma

exata rede polimérica com alta resistência e continuidade, sendo em mais de 70% elastômeros, ou seja, fase polimérica. As propriedades desse ligante incluem alto ponto de amolecimento, índices de penetração maiores, elevado módulo e grande recuperação elástica, que representam uma viscosidade maior e elasticidade, e conseqüentemente uma alta resistência a deformação permanente (FARIA, 2012). Na Figura 8, baseado na curva ponto de amolecimento *versus* teor de SBS, é depreendido a análise baseado na mudança da coloração dos círculos (meramente ilustrativas), que são conduzidas da cor mais preta (fase asfáltica) a esverdeada (fase polimérica).

Figura 8 - Fases morfológicas de um ligante modificado versus ponto de amolecimento



Fonte: Faria (2012).

É necessário lembrar que deve existir uma compatibilidade adequada entre o CAP com o copolímero de SBS para a produção do asfalto modificado, visto que, quantidades desproporcionais dos constituintes químicos do SBS e do ligante, podem inviabilizar ou tornar pouco compatível, interferido principalmente pelo balanceamento das frações do asfalto e os agentes modificadores.

A temperatura ideal para a mistura entre o SBS e o ligante é em torno de 180°C através do processo de alto cisalhamento. Ressalta-se a imprescindibilidade de verificar as temperaturas favoráveis para mistura de ambos os materiais, sendo bastante acentuado o envelhecimento do ligante a partir dos 177°C (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

Segundo Leite (1999), a compatibilidade de um ligante modificado pode ser entendida como um mecanismo que depende da etapa de estocagem com definições

como: compatível e semicompatível. A compatibilidade retrata a união de fases, sem necessitar de medidas corretivas para manter o ligante com suas propriedades, e semicompatibilidade, representa a separação de fases e deve ser interferida com processos de agitações até mesmo em deslocamentos por curto espaço de tempo.

A separação de fase, se deve, principalmente, por causa da diferença de densidade e solubilidade do ligante e do SBS condicionadas a altas temperaturas mantidas estaticamente. Ocorre que a parte mais densa, asfáltica, sedimenta e a parte menos densa, polimérica, sobe (FERNANDES, 2009).

Rodrigues (2010) simulou a estabilidade a estocagem para suas três modificações, com 3, 4 e 4,5% de incorporação de SBS, onde foi possível assegurar que para valores inferiores de 3%, houve estabilidade do ligante modificado às condições trabalhadas, o intervalo entre 3 e 4% ficou desconhecido, mas que a partir de 4%, o ligante modificado passa a se comportar de maneira instável durante a estocagem, necessitando de intervenção de algum aditivo que possa combater esse efeito desagregador.

A modificação do ligante por polímero, de modo geral, proporciona um limite aceitável maior de temperaturas na etapa de estocagem, como as faixas apresentadas na Tabela 2. As temperaturas empregadas são mantidas através do processo de convecção, onde é imprescindível a mitigação do craqueamento térmico provocado pelas altas temperaturas que pode ser feita através da medida de inserção de agitadores nos tanques. O emprego de agitadores conduz a convecção forçada que realiza a movimentação do asfalto não só pela variação da densidade, mas também pelo seu movimento forçado (OMENA, 2012).

Tabela 2 - Temperaturas máximas de estocagem dos ligantes

TIPO DO LIGANTE ASFÁLTICO	TEMPERATURA MÁXIMA DE ESTOCAGEM(°C)
CAP 30-45	162
CAP 50-70	155
AMP 55-75	162
AMP 60-85	165
AMP 65-90	170
AMB 08	180
AMB 22	180

Fonte: Adaptado de Omena (2012).

O movimento realizado mantém o ligante modificado em contínuo agitação, o que diminui a tendência de separação de fase entre o ligante e o polímero. O reconhecimento da temperatura ideal de estocagem, visualizado na Tabela 2, é imprescindível na manutenção da continuidade das etapas consecutivas a esta, visto que, exigem temperaturas próximas às de manuseio, para que então contribua na logística global do processo de produção da mistura asfáltica. O terminal *blending*, representa como ocorre na maioria das usinas, tendo unidade central que produz, e que, posteriormente transporta as misturas à obra ou local de aplicação, valendo lembrar das distâncias que podem ser longas (LAWALL, 2019).

Vale frisar que, a estocagem é relevante, por muitas vezes não ser uma opção, mas uma obrigação em campo, visto que, durante o processo de usinagem, e posterior compactação da mistura asfáltica, não se tem viabilidade de produzir tal volume especificado, como também pode se ultrapassar a quantidade demandada, ou seja, a estocagem é essencial e esta deve conter ligante estável e pronto ao uso.

2.2.1.3 Comparativo de desempenho entre polímeros

O ligante asfáltico modificado por SBS, como não é somente constituído de benefícios, torna imprescindível acompanhar um certo tipo de comparação e verificação das propriedades deste elemento com outros polímeros, para que, então, quando comparados seja notado que este é uma potencial opção quanto o desempenho generalizado e sua aplicação vai assegurar uma mistura adequada as delimitações que se submeterá ao longo da vida de serviço.

Quando comparado o desempenho global do ligante asfáltico modificado com copolímero SBS com outros materiais como SEBS e polietileno modificado com anidrido maleico (PEAM), percebe-se o SBS a frente com melhorias mais evidentes nas propriedades analisadas, como elasticidade e adesividade (SILVA *et al.*, 2002).

Os polímeros, de modo geral, proporcionam uma vantagem elástica na modificação do ligante. Realizada por Bringel *et al.*, (2008), a análise de ligante modificado com EVA+ Cal hidratada e SBS, foi notado a formação da rede polimérica que garante uma estabilidade elástica a temperaturas mais elevadas. Quando aplicada em misturas asfálticas quem apresentou melhor performance quando a elasticidade e rigidez foi o EVA dado as condições antes e pós envelhecimento. E a tendência de degradação é mais evidente no ligante com SBS quando submetido a altas temperaturas.

2.2.2 Surfactante

O surfactante, o emulsificante ou ainda, tensoativo é um agente que possibilita a dispersão de moléculas presentes em duas fases fluidas imiscíveis ou parcialmente imiscíveis. A emulsão apresenta uma fase finamente dividida (dispersa ou interna) em outra fase (contínua ou externa). O uso do surfactante possibilita a combinação química de polares e apolares (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

A utilização do agente surfactante traz vantagens como a redução da viscosidade do CAP, possibilitando a aplicação em temperaturas reduzidas, e conseqüentemente, se tem a redução de voláteis liberados e lançados ao meio ambiente, como também a redução de custos com energia gasta para o alcançar as temperaturas de manuseio (RODRIGUES, 2016).

A atuação desses elementos químicos consiste na capacidade de modificar a tensão interfacial que há entre os agregados diminuindo o atrito no interior das misturas asfálticas, e, por conseguinte, melhoram a trabalhabilidade, reduzindo as temperaturas necessárias à compactação, além de, colaborar com o recobrimento do agregado, fator este, que afeta a propriedade de adesividade (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015; WARGHA FILHO, 2013).

Em pavimentação asfáltica, o surfactante é utilizado como aditivo para emulsões asfálticas para promover a dispersão das fases, água e ligante, propiciando uma mistura homogênea. Desvantagens podem surgir devido a presença de água e quebra de vínculo com o ligante e agregado como visualizado na Figura 9, o que causa, por conseguinte, o deslocamento do filme asfáltico do agregado (efeito *stripping*). Para tal, são recorridos o incremento de outros materiais para correção da adesividade e controladores de ruptura, como os aditivos dope (BERNUCCI *et al.*, 2010; GRECA ASFALTOS, 2004; MOTTA, BERNUCCI; FARIA, 2012).

Figura 9 - Falha de adesão interfacial agregado-asfalto



Fonte: Rossi, Teltayev e Angelico (2017).

Além do, mecanismo que possibilita o emprego das emulsões asfálticas, o surfactante é bastante usado em misturas asfálticas mornas, para promover a trabalhabilidade necessária para os processos de produção de uma mistura, com a redução de temperaturas de usinagem e compactação. Mello (2012) comprovou o desempenho do aditivo surfactante para aplicação em misturas mornas por meio de ensaios mecânicos, como: módulo de resiliência, dano por umidade induzida, resistência a tração por compressão diametral com retorno de valores dentro do estipulado nas normas e recomendações, tanto brasileiras como internacionais.

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2018), os surfactantes, em misturas asfálticas mornas, podem concomitantemente interagir com o ligante e o agregado, melhorando a lubricidade. Por conseguinte, a temperatura é reduzida, dado que, as altas temperaturas impressas no ligante tem por causa principal a viscosidade adequada que induzirá a uma moldabilidade maior. Logo, o aditivo surfactante, também é considerado um melhorador de adesividade, além de, permitir uma maleabilidade da mistura na fase de espalhamento e compactação.

Os surfactantes mais usados em misturas mornas são: Gemul XT14, Cecabase RT, Evotherm, QPR QualiTherm, Rediset WMX, WarmGrip, Revix. O diferencial desses produtos citados anteriormente incide na baixa alterabilidade das práticas em usinas e campos contribuindo com mecanismos já conhecidos (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

As vantagens do surfactante, além dos comentados, possibilita ainda, segundo Logaraj e Almeida (2009): i. a incorporação de agregados reciclados, mitigando os efeitos negativos do mesmo; ii. a preservação dos trabalhadores e o meio ambiente contra as altas temperaturas e emissões de gases poluentes; e iii. a acessibilidade de intervalos maiores no transporte (RODRIGUES, 2016).

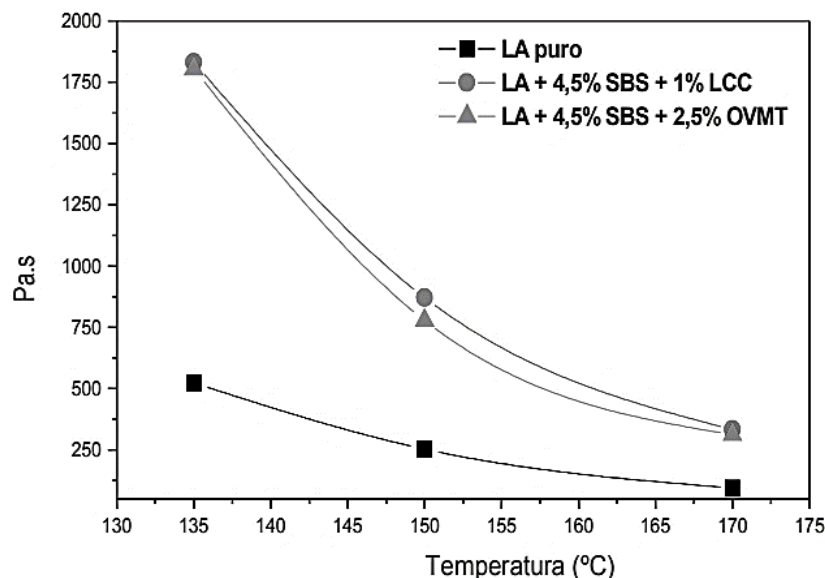
Apesar da inegável eficiência do aditivo surfactante, a sua natureza perigosa ao meio ambiente, estimulou o início de estudos voltados aos elementos que apresentam a mesma função, porém de caráter sustentável e que não afetem o meio ambiente de forma intensa ou que o cometam de forma amenizada, como o analisado por Blesic *et al.* (2018), que introduziram hidrofobinas, proteínas de alta atividade superficial e porta de boas propriedades emulsificantes, para estimular a dispersão do SBS no ligante, porém o efeito surtiu de maneira moderada e exigiu a aplicação de co-surfactantes para o alcance dos objetivos de dispersão total.

É possível ainda comentar nos elementos que não sendo surfactantes podem exercer função semelhante, como o caso examinado por Fernandes (2009), que constatou a viabilidade do óleo de xisto, que mesmo não sendo um agente emulsificante, foi capaz de compatibilizar o asfalto e SBS, além de ter alcançado aumento das resistências a deformação e ao trincamento por fadiga.

Alguns pesquisadores como Lima *et al.*, (2009) e Rodrigues (2010), ressaltam a eficiência da aplicação de enxofre e óleos extensores como compatibilizante na estabilidade a estocagem, mas com um perfil ambientalmente mais sustentável, como o uso do Líquido da casca da castanha de caju (LCC), que além de modificar a tendência a separação na estocagem, este também assegurou o desempenho do ligante.

Na Figura 10, é notado o efeito tanto da adição polimérica e do compatibilizante na alteração da viscosidade do ligante asfáltico puro. É evidente a ascensão das temperaturas essenciais a usinagem e compactação, devido ao aumento global das viscosidades, para as temperaturas de referência. É necessário, cuidado com as temperaturas de manuseio, pois, além de, haver um maior gasto energético para o uso do ligante modificado, há também o processo de envelhecimento dos componentes, nesse caso, o endurecimento do ligante e degradação do polímero SBS, na qual a resposta elástica diminui (BULATOVIC; REK; MORKOVIC, 2012; LIMA *et al.*, 2009).

Figura 10 - Viscosidades em função da temperatura para o LA puro e LA modificado por SBS e aditivos



Fonte: Lima *et al.*, (2009).

Com a Tabela 3, é evidente o efeito dos agentes modificadores do ligante quando adicionados, tomando como base o ligante puro asfáltico (LA) puro. Onde há o acréscimo de temperaturas suficientes a usinagem e compactação decorrente do SBS, mitigado com o agente dispersivo LCC (RODRIGUES, 2010).

Tabela 3 - Valores de temperaturas de usinagem (TU) e compactação (TC)

Amostra	TU (°C)	TC (°C)
LA Puro	160 - 166	147 - 150
LA+ 4% SBS	186 - 193	175 - 181
LA + 4% SBS + 1% LCC	181 - 186	168 - 174

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2010).

Segundo Singh *et al.*, (2019), o ligante quando modificado por SBS, limitado a uma adição de até 7% de SBS, e aditivo surfactante Zycotherm, apresentará um aumento da consistência. Em resultado a mudança na propriedade, se obteve uma medida de penetração inferior e uma temperatura de ponto de amolecimento maior. O efeito do surfactante atuou na moderação da mudança das características intrínsecas resultante da modificação, porém sem causar prejuízos quanto o desempenho.

Em suma, o momento de inserir o surfactante em função do teor, é intrínseco do asfalto observado (balanceamento do fracionamento) (CNT, 2019b). O comportamento tendencioso a separação de fase durante a etapa de estocagem do ligante asfáltico modificado por polímero SBS em valores, em porcentagem, a partir de 4% é frequente. O surfactante DINORAM®, em função de suas propriedades, é empregado para combater este efeito viabilizando a logística produtiva do ligante, como também, a fim de, mitigar o aumento da temperatura para manuseio e melhoria de propriedades como a adesão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será discriminado o processo metodológico de cunho experimental. Realizou-se modificações e ensaios de caráter avaliativo para averiguar as propriedades presentes no novo material, nesse caso, o ligante asfáltico modificado nos perfis: i) com acréscimo de SBS e ii) acréscimo de SBS e aditivo surfactante, Tabela 4.

Tabela 4 - Legenda das amostras utilizadas nos resultados

Amostras	Identificação
Ligante asfáltico puro (sem modificação)	LA PURO
Ligante asfáltico modificado com 4% de SBS	LA+4%SBS
Ligante asfáltico modificado com 4% de SBS e 1% de surfactante	LA+4%SBS+1%SURF.

Fonte: Autora (2020).

3.1 Materiais

Os materiais utilizados foram selecionados seguida a avaliação das características dos mesmos. Os teores adotados foram embasados em pesquisas experimentais já realizadas. Para o SBS temos as seguintes referências, com autores como: Leite (1999), Lucena (2005), Bringel (2007), Kanabar (2010), Rodrigues (2010), Sobreiro (2014), Joni (2017), Porto *et al.*, (2019). Os autores mencionados concordam que através do uso de valores que oscilam 3 a 7% do teor em massa/massa (m/m), de modo geral, podem proporcionar uma melhoria da eficiência do ligante, e em detrimento disto, foi adotado o valor de 4% m/m.

E, para o surfactante, o teor de 1% m/m foi empregado em analogia a trabalhos de Lima *et al.*, (2009) e Rodrigues (2010), como tentativa de verificar seus efeitos para o emprego de tal valor.

O ligante usado, foi o puro, escolhido em função ao usado na região (tráfego e clima) e a quantidade analisada diz respeito quanto a capacidade de suporte do equipamento. Foi definido a massa do CAP, e, respectivamente, em porcentagem, os demais valores de massa dos componentes para cada modificação. Na Figura 11 se visualiza os materiais empregados para modificação do ligante, o copolímero SBS e o aditivo surfactante Dinoram.

Figura 11 - Materiais utilizados na modificação do ligante: SBS e surfactante



Fonte: Autora (2020).

3.1.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70, sua classificação é de acordo com a penetração (100 g, 5s, 25°C) (DNIT, 2006b), apresentando sua produção advinda da Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor).

Dois tipos de modificações, foram realizados no ligante asfáltico puro (LA Puro), a primeira somente com o acréscimo de 4% m/m do copolímero SBS (LA+4%SBS) e a segunda, que além da incorporação do copolímero SBS em 4% m/m, foi adicionado o aditivo surfactante Dinoram em 1% m/m (LA+4%SBS+1%SURF.).

3.1.2 Copolímero SBS

O copolímero estireno butadieno estireno (SBS) utilizado foi disponibilizado pela KRATON, com o seguinte perfil: polímero KRATON® D1186 BT, sendo um copolímero tribloco claro e ramificado, à base de estireno e butadieno, com um teor de poliestireno de 30%. É fornecido como grânulos porosos polvilhados com talco, com densidade de 0,4kg/dm³ e ponto de fusão < 1 g/10 min a 200°C.

É um produto versátil, com uma combinação de alta resistência, ampla faixa de dureza e baixa viscosidade para facilitar o processamento por fusão termoplástica ou o processamento em solução. O uso se estende à diversas finalidades, como em adesivos sensíveis à pressão, adesivos para fraldas com spray de fusão a quente, adesivos para construção, revestimentos e selantes (PROSPECTOR, 2017).

3.1.3 *Surfactante*

O aditivo surfactante, da linha Dinoram®, faz parte dos emulsificantes que se relaciona a configurações rápidas de emulsões betuminosas. São constituídos por longas cadeias carbônicas, parte hidrofóbica, com um grupo hidrofílico em uma de suas extremidades. Na qual apresenta propriedades relativas a melhorias de aderência, dosagem baixa e eficiente, flexível para diversos tipos de ligantes.

3.2 **Métodos de ensaio**

Os ensaios de caracterização dos ligantes modificados foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC). A definição da temperatura empregada foi uma compatibilização das necessidades do ligante asfáltico, do copolímero SBS e do aditivo surfactante, respeitando seus limites empregáveis sem causar danos, superando o mínimo que viabilizasse a mistura dos componentes e limitando ao máximo para que não ocorra a degradação dos elementos constituintes.

3.2.1 *Ligantes modificados*

Para a produção dos ligantes asfálticos modificados foi utilizado o misturador Silverson L4R de alto cisalhamento conjugado com controlador e mantenedor de temperatura, Figura 12.

Figura 12 - Equipamento Silverson L4R de alto cisalhamento



Fonte: Autora (2020).

Para a primeira modificação, LA+4%SBS, foi adicionado o ligante asfáltico puro CAP 50/70 no equipamento supracitado, em um peso de 450g, o qual ficou em mistura até atingir a temperatura estipulada de aproximadamente 155°C. Alcançado e mantido tal temperatura, foi adicionado os 4% m/m de copolímero SBS, correspondido em 18,75g em massa, onde foi efetuado compassadamente para que não houvesse obstrução do misturador. Após concluída a adesão do SBS, a mistura ocorreu por mais 2 horas com temperaturas oscilando entre 155±5°C, com velocidade de 250 rotações por minuto (rpm).

E, para a produção do segundo ligante asfáltico modificado, LA+4%SBS+1%SURF., seguiu-se o mesmo procedimento do LA+4%SBS. O acréscimo do surfactante em 1% m/m, equivalente a 4,7g, complementou a modificação, permanecendo em mistura por mais meia hora, nas mesmas condições de temperaturas (155±5°C) e velocidades (250 rpm).

Concluído o processo de modificação dos ligantes asfálticos, para ambos os casos, foram confeccionadas uma (1) amostra de cada ligante modificado para a realização dos ensaios: de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade aparente com o viscosímetro Brookfield. Cada amostra corresponde a um ensaio.

3.2.2 *Ensaio de Penetração*

O método e equipamentos essenciais, subsidiados pela norma da ABNT NBR 6576 (2007), representados na Figura 13, deram base para a efetivação do ensaio de penetração que foi realizado duas vezes, a primeira para o LA+4%SBS e a segunda para LA+4%SBS+1%SURF.

Figura 13 - Representação do Ensaio de Penetração



Fonte: Autora (2020).

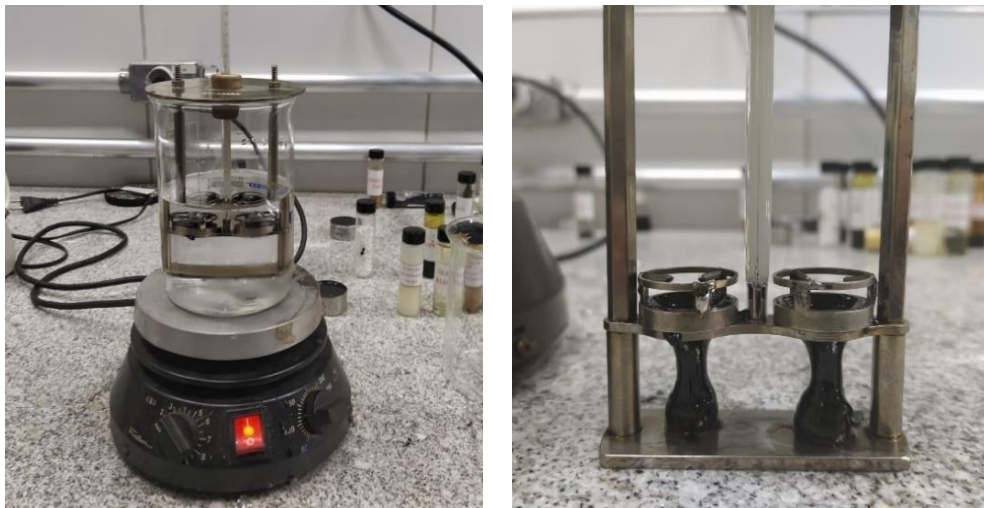
Cada ensaio de penetração, foi realizado com a confecção da amostra padronizada e colocado sob o penetrômetro. Foram registradas as medidas em profundidade, aferidas em décimos de milímetros, que uma agulha de massa padrão de 100g penetrou nas amostras de volume padronizado, durante o intervalo de tempo de 5 segundos, em temperatura controlada de 25°C, estabelecida após o resfriamento do ligante modificado e colocado em banho maria.

Para cada amostra foram realizadas, três medidas individuais de penetração com furos diferentes e distantes entre si. Em seguida, fez-se a média dos valores obtidos, resultando assim, no valor final da consistência. O ensaio é feito quando os valores se diferenciam muito entre si, o que não foi notado no ensaio.

3.2.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Referenciado pela norma da ABNT NBR 6560 (2000), os ensaios de ponto de amolecimento foram realizados duas vezes, uma para o LA+4%SBS e a outra para o LA+4%SBS+1%SURF. na aparelhagem visualizada na Figura 14.

Figura 14 - Representação do Ensaio de Ponto de Amolecimento



Fonte: Autora (2020).

Em cada ensaio foram colocados os ligantes modificados contidos em dois anéis. Sobre a superfície de cada ligante modificado contido no anel, posicionou-se de maneira centralizada, por meio de um centralizador, uma bola de aço com peso e dimensões padronizadas. Os anéis foram colocados em uma haste que apresenta uma certa distância da base. Esta haste foi inserida em um béquer com água que aquecia a uma taxa de 5°C/min, controlados com um termômetro e cronômetro.

Foram registrados os dois valores de temperaturas que ocorreram a queda das bolas até chegar ao fundo da haste e feito uma média para determinação da temperatura de ponto de amolecimento dos ligantes modificados. Como as medidas aferidas entre as quedas das bolas contidas nas amostras não diferiram em 2°C, não houve a necessidade de repetir o ensaio. Na Figura 14 se observa o início e o fim do ensaio, quando os anéis tocam a base, finalizando o ensaio.

3.2.4 *Índice de Suscetibilidade Térmica*

Conforme estabelece Pfeiffer e Van Doormaal, a hipótese da penetração (P) de qualquer CAP à temperatura correspondente ao ponto de amolecimento (PA) ser próxima de 800 (0,1mm), tem-se a Equação (1). Em função dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento foi utilizada a Equação (1) referenciada pelo DNIT (2006b) para obtenção do Índice de Suscetibilidade Térmica (IST):

$$IST = \frac{500.\log(P) + 20.PA - 1951}{120 - 50.\log(P) + PA} \quad (1)$$

Onde:

P corresponde ao índice de penetração (dmm); e

PA à temperatura de amolecimento (°C).

3.2.5 *Ensaio de Viscosidade Aparente por viscosímetro Brookfield*

Baseado na ABNT NBR 15184 (2004), o método foi executado duas vezes, um para LA+4%SBS e outro para o LA+4%SBS+1%SURF. nos equipamentos da Figura 15. A amostra foi preparada logo após a modificação do ligante ainda aquecida em torno de da temperatura 155°C. Seguiu-se na pesagem e limitação aos valores de massa da amostra modificada entre o intervalo de 8 a 11 gramas, nesse caso, 10,4g. Esperou-se pela estabilização das amostras modificadas para continuidade do ensaio e checkou-se a sua primeira temperatura de análise, 135°C para o início do procedimento para obtenção das viscosidades.

Figura 15 - Viscosímetro Brookfield



Fonte: Autora (2020).

A viscosidade foi determinada através do torque necessário para girar a haste (spindle 21) com dimensões e geometria padronizadas, imerso no ligante a uma certa velocidade constante, nesse caso de 20, 50 e 100 rpm para as temperaturas padrão de 135, 150 e 177°C, respectivamente, estabelecidas em norma, suficientes a geração do gráfico.

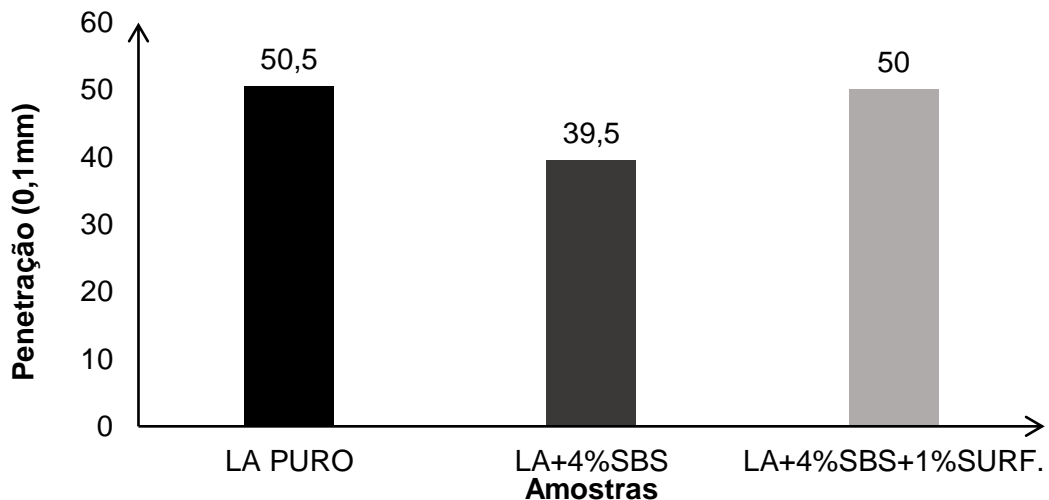
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão descritos os resultados pertinentes aos procedimentos realizados no capítulo anterior por meio dos ensaios, como também será discutido a representatividade destes, os efeitos da modificação do ligante e como pode influenciar em sua aplicação.

4.1 Ensaio de penetração

A consistência de um ligante asfáltico é uma propriedade necessária a classificação do mesmo. O índice de penetração, reflete a facilidade ou dificuldade do ligante ser deformável, podendo ser mais ou menos consistente. O Gráfico 1, é constituído com os valores obtidos para o ensaio de penetração para os ligantes modificados LA+4%SBS e LA+4%SBS+1%SURF., na qual é observado, os efeitos dos agentes modificadores na consistência destes.

Gráfico 1 - Resultados para o Ensaio de Penetração



Fonte: Autora (2020).

O SBS, por ser um copolímero relativamente rígido a temperatura ambiente, acaba resultando em um ligante asfáltico com SBS (LA+4%SBS) com valores de consistência maior que o ligante puro (LA PURO). Isso acontece, possivelmente, devido ao rearranjo químico proporcionado pela estrutura química do SBS ligadas aos componentes do asfalto, onde a parte elastomérica toma parte do volume através da absorção da fração oleosa do asfalto (parte maltênica), ocupando-o em um novo valor, em média 9 vezes maior que o volume inicial (LUCENA, 2005). O índice de penetração no valor de 50dmm passou para 39,5dmm, apresentando assim, uma elevação da consistência em mais de 20%.

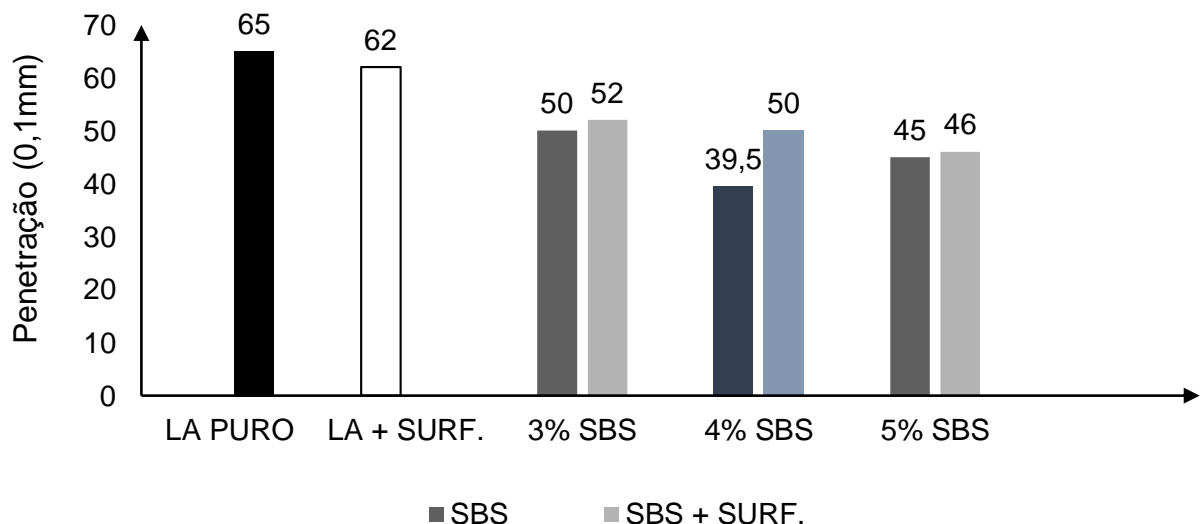
Uma consistência superior, geralmente, está relacionada com rigidez maiores, o que traz a provável associação com o aumento da resistência a deformação permanente. Este novo perfil do ligante pode torná-lo bem vantajoso para aplicações em rodovias onde apresentam maiores exigências mecânicas e temperaturas elevadas. O resultado para este caso reafirmou o que outros pesquisadores supracitados no segundo capítulo haviam constatado.

A adição do surfactante Dinoram, por meio de suas propriedades e em possuir textura sebo-pastosa, causou diminuição da consistência do ligante modificado por SBS, deixando-o semelhante ao ligante asfáltico puro, devido a tensão interna atuante na interface dos componentes que tende a dispersá-los. O surfactante foi capaz de reduzir a consistência do ligante modificado por SBS retornando a um valor padrão do ligante puro, ou seja, do valor de 39,5 passou para 50, diminuindo em torno de 20% da consistência.

Esse retorno de consistência conferido pelo surfactante é conveniente, pois permite a mesma aplicação sem alteração de práticas de produção como também permanece com os benefícios advindos do SBS, como o provável acréscimo de elasticidade e melhoria de adesão, visto que, tanto o SBS como o surfactante atuam na melhoria da adesividade.

Concordando com os dados de Singh *et al.*, (2019), observados no Gráfico 2, os valores de penetração dos ligantes também diminuiram a medida que o teor de SBS era acrescentado, ou seja, houve o aumento da consistência.

Gráfico 2 - Resultados de penetração para o ligante puro e modificado de Singh *et al.*, 2019



Fonte: Adaptado de Singh *et al.*, (2019).

A avaliação também permitiu acompanhar o efeito do surfactante empregado, é percebido que interferiu na consistência encontrada, porém não de forma significativa. No Gráfico 2 é notado a tendência das amostras modificadas nesta pesquisa, identificadas como as barras com teores de 4% de SBS, a se parecerem com os dados do autor supracitado, as demais barras.

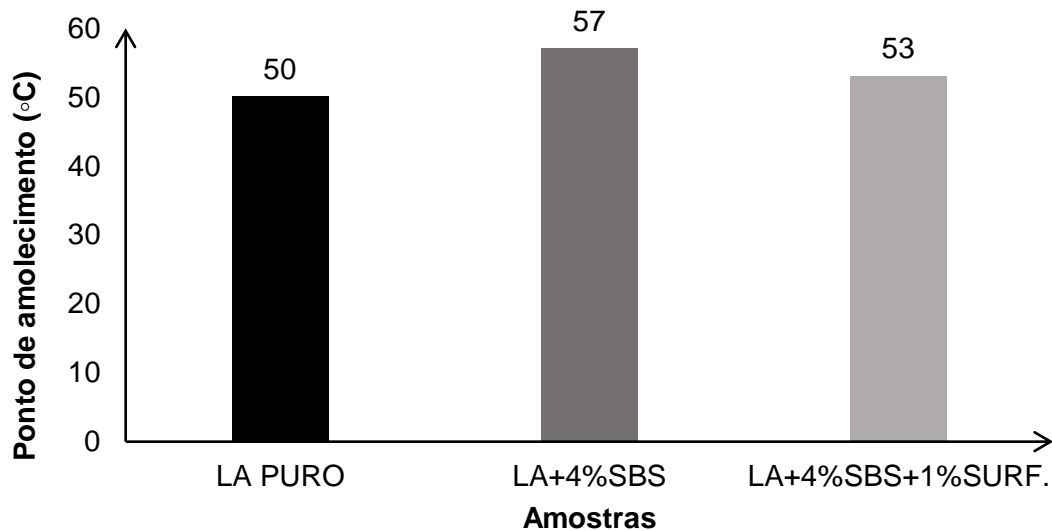
4.2 Ensaio de ponto de amolecimento

Os resultados deste tópico consistem em identificar a temperatura em que os ligantes asfálticos tornam-se fluidos, este parâmetro é bastante significativo para a análise, visto que, o ligante é um material termoviscoelástico que condicionado a altas temperaturas apresenta deformações plásticas, tornando-se moldável, e termoviscoelásticos a temperaturas ambiente, o que corresponde a capacidade de retornar às configurações iniciais mesmo quando aplicado e cessado o carregamento. A fluidez possibilita compreender a partir de qual temperatura o revestimento asfáltico estará mais suscetível aos efeitos combinados do tráfego e do clima, como sua disposição final frente a tais exigências.

No Gráfico 3 estão os valores obtidos no ensaio de ponto de amolecimento (PA). Sabendo que, o SBS é um material com ponto de fusão maior que o do ligante asfáltico puro, para o primeiro caso, LA+4%SBS, é notado o aumento esperado da temperatura de PA ocasionado pela combinação dos componentes, ou seja, uma provável menor suscetibilidade térmica. Esse resultado vai em encontro a consistência percebida no resultado anterior (Gráfico 1), possivelmente, ocasionado pelas ligações químicas mais longas o que aumenta a temperatura necessária ao escoamento.

Passando de 50 a 57°C a temperatura de amolecimento, com aumento de 14%, exige assim, um maior gasto de energia para atingir as temperaturas de trabalho, em decorrência deste parâmetro inicial. Asfaltos com PAs mais elevados são indicados para locais que sofrem o efeito de altas temperaturas, que podem ser agravados com tráfegos excessivos, fazendo ocasião a afundamentos do pavimento (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2019b).

Gráfico 3 - Resultados para o ensaio de Ponto de Amolecimento



Fonte: Autora (2020).

Como o surfactante é um elemento que a temperatura ambiente já apresenta uma viscosidade baixa, para LA+4%SBS+1%SURF., sua incorporação ocasionou a diminuição da temperatura de ponto de amolecimento, tornando o ligante mais sensível do que LA+4%SBS as variações de temperatura. Característica esperada quanto o emprego do surfactante, visto que, é capaz de tornar as ligações químicas menores através da ação dispersante e reajuste proporcionado nas cadeias químicas.

Mesmo com a diminuição da temperatura de ponto de amolecimento, passando de 57 a 53°C, uma redução de aproximadamente 7%, existe a possibilidade de aumento da resistência a tração e elasticidades proporcionada pelo SBS. Isto diz respeito sobre a manutenção da malha polimérica. Essa redução do ponto de amolecimento não compromete a resistência de forma a assegurar as temperaturas moderadas de serviço.

4.3 Índice de Suscetibilidade térmica

A partir dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento, foram obtidos Índices de Suscetibilidade Térmica (IST), presentes na Tabela 5, onde PEN é a penetração e PA corresponde a temperatura de amolecimento para a dada amostra. Os valores resultantes demonstram que o rearranjo químico advindo da incorporação do SBS no ligante e do ligante combinado com SBS e o surfactante sucederam em configurações de ligantes asfálticos mais estáveis quanto o gradiente térmico. Onde

tal característica é essencial frente a resposta da viscosidade do ligante às alterações conjuntas de temperatura, tempo e deformações.

Tabela 5 - Índice de Suscetibilidade Térmica a partir dos resultados de Penetração e Ponto de Amolecimento

Amostra	PEN (0,1mm)	PA (°C)	IST
LA PURO	50,5	46	-1,17
LA+ 4%SBS	39,5	57	-0,16
LA+ 4%SBS+ 1%SURF.	50	53	-0,47

Fonte: Autora (2020).

Com tais dados, dentro do intervalo de referência admissível de -1,5 e +0,7, é possível concluir que por não superarem o valor de +1, os ligantes asfálticos provavelmente não se apresentam oxidados, como também por não estarem em valores abaixo de -2, não são muito sensíveis às variações de temperaturas (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNIT, 2006b).

Estes valores confirmam a empregabilidade na pavimentação, pois corroboram para uma boa trabalhabilidade e recobrimento de grãos, que são fatores que propiciam uma vida de serviço maior por causa do desempenho que se obtém em ligantes que encontram dentro dos limites aceitáveis (-1,5 e +0,7).

Os ISTs resultantes também são favoráveis em baixas temperaturas no aumento de elasticidade, resistindo aos trincamentos, mesmo com o possível aumento da rigidez. A adição no ponto de amolecimento (Gráfico 3), admite maiores temperaturas associadas a oposição aos efeitos das deformações permanentes (ATR) e diminuição da tendência a exsudação, sendo os efeitos controlados.

O IST possibilita ainda prever o comportamento da viscosidade do ligante durante as submissões a variadas temperaturas, como sua confiabilidade ao longo dessas variações. Nesse caso, com o caráter mais consistente e mais estável, conclui-se que, elevadas temperaturas serão necessárias para que viscosidades trabalháveis sejam alcançadas e que temperaturas mais baixas não alteram o desempenho.

Zegarra (2011), por meio de análises experimentais, constata que o ligante modificado por polímero em comparação ao ligante puro, portou de resultados que fortalecem o uso do SBS, como um melhor desempenho de forma global. Dentre os benefícios, tem-se a baixa suscetibilidade térmica, que ajuda a compreender outras propriedades que mantem relação, como a elasticidade.

4.4 Ensaio de viscosidade aparente por viscosímetro Brookfield

Os resultados de viscosidade Brookfield encontrados na Tabela 6, estão em função de temperaturas pré-definidas em norma de 135, 150 e 177°C, na qual caracterizam-se como dados capazes de representar a viscosidade do ligante asfáltico nas temperaturas supracitadas, onde em consequência é notado essa variação brusca (ABNT, 2004).

Tabela 6 – Resultados do ensaio de viscosidades aparente à temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C para os ligantes puro e modificados

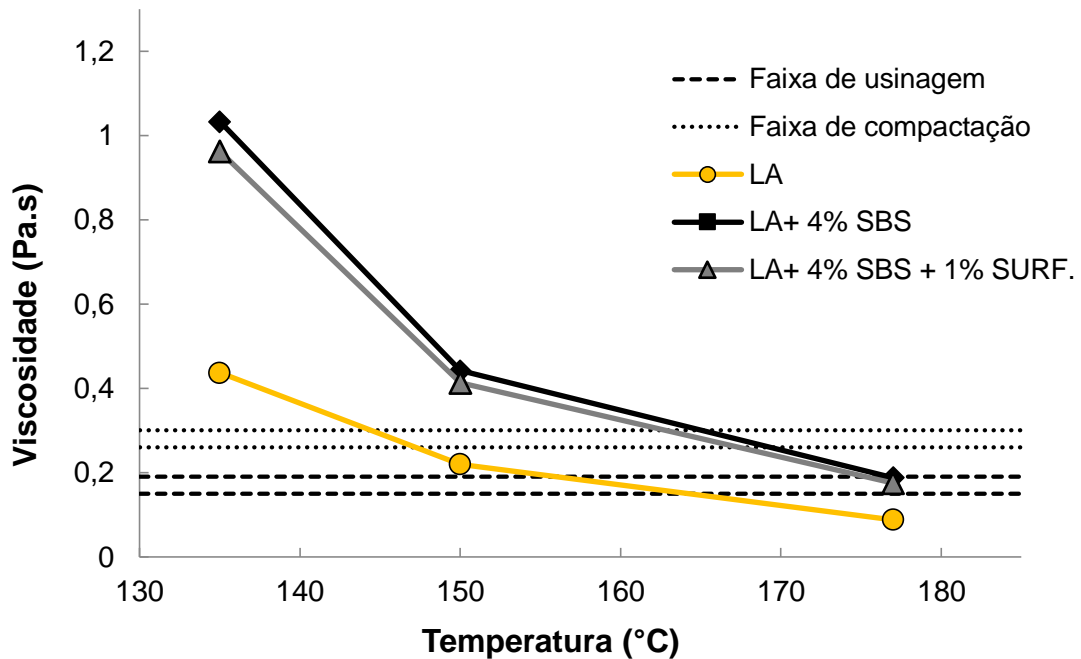
Amostra	Viscosidade (Pa.s) 20 rpm		
	135°C	150°C	177°C
LA PURO	0,437	0,22	0,88
LA+ 4%SBS	1,034	0,442	0,188
LA+ 4%SBS+ 1%SURF.	0,963	0,413	0,175

Fonte: Autora (2020).

O ensaio de viscosidade aparente apresentou, de modo geral, valores maiores para os ligantes asfálticos modificados quando comparados ao ligante puro. Essa característica mais viscosa foi acarretada pelo incremento de SBS (LA+4%SBS) e levemente suavizado com o acréscimo do surfactante (LA+4%SBS+1%SURF.), onde foi constatado no ensaio de penetração (Gráfico 1) com o aumento de consistência e no ensaio de ponto de amolecimento (Gráfico 3), com o aumento de temperaturas, reforçando tal propriedade, visto que estes têm uma tendência a portar tal relação.

É notado que as viscosidades, fixada às temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, foram elevadas em mais de 120%, 100% e 95%, respectivamente, para LA+4%SBS e LA+4%SBS+1%SURF., quando comparadas ao ligante puro. Isso permite dizer que as faixas de temperaturas de misturas e compactação também apresentarão temperaturas elevadas para tais etapas, como visualizado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Viscosidade *versus* temperatura obtido no ensaio de viscosidade aparente Brookfield



Fonte: Autora (2020).

A partir do Gráfico 4 foram apresentados os intervalos ideais de temperaturas para usinagem e compactação, limitados por faixas de viscosidades adequadas para cada processo, sendo para viscosímetros rotacionais $0,17 \pm 0,02$ Pa.s na mistura (usinagem) e $0,28 \pm 0,03$ Pa.s para compactação, Tabela 7. Nesta tabela foram apresentadas temperaturas dentro do intervalo de 107 e 177°C, baseado em norma (ABNT 2004).

Ainda no Gráfico 4, é visto a intensificação no intervalo de 135 a 150°C na mudança evidente da viscosidade de LA+4%SBS de 1,034 a 0,442 Pa.s, já no intervalo posterior, entre 150 e 177°C, a mudança é mais suave, ocorrendo de 0,442 para 0,188 Pa.s. De forma análoga ocorreu para LA+4%SBS+1%SURF., em uma reta bem semelhante e até característica do ensaio de viscosidade aparente para asfaltos modificados por SBS.

Na Tabela 7, se encontram os valores de viscosidade para LA+4%SBS e LA+4%SBS+1%SURF., indicando o mínimo e o máximo de temperaturas favoráveis. A aplicação dos ligantes modificados nas temperaturas indicadas colaboram para a produção de uma mistura asfáltica sem escorregamento, alcance do volume de vazios necessários, além de, proporcionar um adequado recobrimento dos grãos. Como é possível notar, as temperaturas de mistura para ambos os casos atingem o máximo

delineado (177°C), o que reforça a imprescindibilidade de controlar o gradiente das temperaturas encontradas, visto que, também as amplitudes das temperaturas obtidas são descritas em um intervalo restrito.

Tabela 7 - Faixas de Temperaturas (°C) para usinagem e compactação dos ligantes modificados limitados a 177°C

Amostra	Usinagem		Compactação	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
LA	156	164,3	144,5	147,2
LA+ 4%SBS	176	177	165,1	169,3
LA+ 4%SBS+ 1%SURF.	175,3	177	162,8	167,6

Fonte: Autora (2020).

Como visualizado na Tabela 7, as temperaturas suficientes para aquecimento dos ligantes asfálticos modificados são bastantes elevadas em comparação com o ligante asfáltico puro, conseqüente do alto enrijecimento produzido devido a incorporação do SBS, até mesmo no ligante modificado por SBS e surfactante, visto que, este último no teor que foi utilizado não foi capaz de mitigar os efeitos do aumento de viscosidade e apenas atenuou as temperaturas de usinagem e compactação.

Os valores de usinagem atingem o valor limite de 177°C, a partir de tal valor o envelhecimento do CAP é bem intenso, sendo então, parâmetro limite para embasamento e reconhecimento do risco em ultrapassá-lo. Caso não fossem precedidos de tal parâmetro, as temperaturas ultrapassariam o limite estabelecido, obtidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Faixas de Temperaturas (°C) para usinagem e compactação dos ligantes modificados

Amostra	Usinagem		Compactação	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
LA	156	164,3	144,5	147,2
LA+ 4%SBS	176	181	165,1	169,3
LA+ 4%SBS+ 1%SURF.	175,3	179,8	162,8	167,6

Fonte: Autora (2020).

Para atingir tais temperaturas, é válido ressaltar o gasto maior de energia como um tempo maior até atingi-la. O aumento da temperatura relaciona-se também

com a quantidade maior de poluentes voláteis lançados ao ambiente, o que seria um ponto negativo. Wahr *et al.*, (2011), afirma que, para os ligantes modificados é feito uma recomendação de admissão de temperaturas até um valor de 190°C, a partir desse valor os dois componentes se degradam, perdendo as propriedades essenciais.

5 CONCLUSÕES

A modificação do ligante asfáltico a partir das delineações aplicadas, com o acréscimo de SBS e SBS + Surfactante, apresentaram propriedades superiores ao ligante puro, o que reforça sua utilidade, tendo em vista a elevação do desempenho do ligante e, conseqüentemente, um revestimento asfáltico mais eficiente ao emprego a qual se destina.

Os ligantes asfálticos modificados, na perspectiva das análises efetuadas, através dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade aparente por viscosímetro Brookfield, reproduziram bem o comportamento esperado quanto ao emprego dos elementos. O SBS proporcionou o aumento da consistência e do ponto de fusão, além de, viscosidades mais elevadas nas temperaturas analisadas de 135, 150 e 177°C.

O surfactante, adicionado ao ligante modificado, atenuou os efeitos do SBS, suavizando a consistência do ligante, e como em consequência também diminuiu a temperatura de amolecimento. O teor utilizado não foi suficiente em diminuir as viscosidades encontradas, o que tornou as temperaturas de usinagem e compactação muito altas, onde, apesar de, não ter provocado desvantagens quanto as propriedades obtidas, este apresentou este aspecto negativo, devido a necessidade de maiores temperaturas para atingir as viscosidades ideais de manuseio, com um gasto energético maior, além do maior lançamento de voláteis.

De maneira geral, apesar da diferença entre os resultados serem bem sensíveis entre as duas modificações, os resultados obtidos em ligantes modificados com o polímero SBS e o aditivo surfactante Dinoram, amostra de referência, apresentou um bom desempenho, característico de materiais estáveis, apesar de não ter sido depreendido informações quanto a estocagem.

As propriedades finais obtidas tendem a proporcionar uma deformação permanente menor, essencial aos impactos do tráfego e do clima; uma propensão a apresentar uma exsudação menor, decorrente do aumento da viscosidade; e um índice suscetibilidade térmica estável, o que corresponde certa resistência a fluência do ligante, a qual se atingirá a temperatura maior, mas com previsibilidade, além da continuidade viscoelástica por mais tempo a um limite maior de temperaturas.

E, apesar da não concretização do ensaio de recuperação elástica, percebe-se também a tendência do ligante modificado a encontrar-se com a

propriedade de termoviscoelasticidade mais reforçada por causa do SBS que mantém relação com o aumento da viscosidade e seu ajuste no volume do asfalto modificado.

5.1 Recomendações para pesquisas futuras

- A análise, através de ensaio, da estabilidade a estocagem no ligante asfáltico modificado por SBS com intervenção do aditivo surfactante, em teores que iniciam o processo de segregação.
- Verificação do ligante asfáltico modificado por polímero SBS em diferentes teores de aditivo surfactante.
- Avaliação do desempenho das propriedades do ligante asfáltico modificado com polímero SBS e aditivo surfactante em misturas asfálticas, obtendo por meio de ensaios como, dano por umidade induzida, adesividade, módulo de resiliência.
- Comparação da mistura asfáltica com ligante modificado por SBS e aditivo surfactante antes e após envelhecimento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO ABEDA. **Asfaltos modificados por polímeros**. 1 ed. Curitiba: Workshop, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Estudo Laboratorial do Módulo Dinâmico de Concretos Asfálticos Convencionais e Modificados**. 2016. Relatório técnico final de pesquisa RDT CONCEPA. Porto Alegre, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

AURILIO, M.; MIKHAILENKO, P.; BAAJ, H; POULIKAKOS, L. D. **Properties of asphalt binders with increasing SBS polymer modification**. Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE), p.55-66. Waterloo, 2020.

BEHNOOD, A; GHAREHVERAN, M. M. **Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders**. European Polymer Journal. Lafayette, v. 112, p. 766-791, 2019.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS - ABEDA, 2010.

BLESIC, M.; DICHIARANTE, V.; MILANI, R.; LINDER, M.; METRANGOLO, P. **Evaluating the potential of natural surfactants in the petroleum industry: the case of hydrophobins**. Pure and Applied Chemistry, v. 90, 2 ed., p. 305-314, 2018.

BRASQUIMICA. **Asfalto modificado com polímero (AMP)**. Tecnologia para prolongar a vida dos pavimentos asfálticos. Candeias, 2003.

BRINGEL, R. M. **Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos**. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

BRINGEL, R. M.; ALENCAR, A. E. V.; COSTA, F. M. L. L.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. **Análise dos parâmetros reológicos através das curvas mestras**

do ligante asfáltico modificado por SBS e EVA. INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS - 19º Encontro de asfalto. Rio de Janeiro, 2008.

BRINGEL, R. M.; ALENCAR, A. E. V.; LUCENA, A. C. C.; SOARES, S. A. **Comportamento reológico do ligante asfáltico modificado por sbs e diluente aromático como compatibilizante.** INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. 18º Encontro de asfalto. Rio de Janeiro, 2006.

BULATOVIC, V. O.; REK, V.; MORKOVIC, K. J. **Polymer modified bitumen.**v.16, n.1, 2012.

CALEMMA, V. I.; IWANSKI, P.; NALI, M. P.; SCOTTI, R.; MONTANARI, L. **Structural Characterization of Asphaltenes of Different Origins.** Roma: Energy & Fuels. v. 9, n.2, 227, 2002.

CAVA, F. H. **Fracionando o Asfalto** – Por que ocorre a oxidação do ligante. 2020. Disponível em: <https://alemdainercia.wordpress.com/2020/02/24/6370/>. Acesso em: 22 mar. 2020.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação.** Rio de Janeiro: PETROBRAS - ABEDA, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do transporte.** Estatísticas consolidadas. Brasília: CNT, 2019a.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: Impactos da qualidade do asfalto sobre o transporte rodoviário.** Brasília: CNT, 2019b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação.** Rio de Janeiro, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **EM 095: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material.** Rio de Janeiro, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Diretrizes básicas para execução de misturas asfálticas mornas com o uso de aditivos surfactantes.** Rio de Janeiro, 2018.

FARIA, H. M. **Pavimentos Asfálticos Altamente Modificados.** Boletim técnico - SINICESP. 4 ed. São Paulo, 2012.

FC. **Cromatografia em camada fina (TLC)** – Laboratório Online. 2015. Disponível em: <https://www.fcencias.com/2015/03/12/cromatografia-em-camada-fina-tlc-laboratorio-online/>. Acesso em: 22 fev. 2020.

- FERNANDES, M. R. S. **Efeitos de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS**. 2009. 118 f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- GRECA ASFALTOS. **Fatos e asfaltos: Novos estudos sobre DOPE'S**. Ano 01, n. 1, 2004.
- GUSMÃO, M. **Restauração rodoviária usando asfalto modificado por polímero**. 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, J. **The Shell bitumen handbook**. 6. ed. Cambridge: SHELL, 2015.
- JONI, H. H; SHAKER, E. K. **Determination of the acceptable range of mixing and compaction temperatures for modified asphalt mixture with styrene butadiene styrene (SBS)**. Set. 2017. v. 7. n.5.
- KANABAR, N. **Comparison of ethylene terpolymer, styrene butadiene, and polyphosphoric acid type modifiers for asphalt cement**. 2010. 133 l. Thesis (Master of Science in the Department of Chemistry) – Queen's University, Canada, 2010.
- KING, G. N.; MUNCY, H. W.; PRUDHOMME, J. B. **Polymer Modification: Binder's Effect on Mix Properties**. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists A, v.68, p. 32-69, 1999.
- LAPAV. **Estudo laboratorial de redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. Projeto de Pesquisa CONCEPA – LAPAV. Porto Alegre, 2007.
- LAWALL, L. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas com diferentes tipos de ligante**. 2019. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2019.
- LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- LEITE, L. F. M. **Notas de aula do Curso de Pavimentação Urbana**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2003.
- LIMA, A. P. D.; RODRIGUES, F. O.; AMONI, B. C.; NOGUEIRA, R.B. M.; BRINGEL, R. M.; COSTA, F. M. L. L.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A.; RICARDO, N. M. P. S. **Efeito de aditivos naturais nas propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por SBS**. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros – CBPol. Foz do Iguaçu, 2016.

LOGARAJ, S.; ALMEIDA, A. **Surface-active bitumen additive for warm mix asphalt with adhesion promoting properties**. Akzo Nobel Surface Chemistry LLC Paper. United States of America - USA, 2009.

LUCENA, M. C. C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros**. 2005. Tese (Doutorado em química inorgânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Polímeros, produção e aplicação**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999.

MELLO, D. **Avaliação da adição de evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo**. 2012. 261 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MOTHÉ, M. G. **Estudo de comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica**. 2009. 182 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B.; FARIA, V. C. **Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidos com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes**. v. 4, n. 2. Brasília: Revista ANTT, 2012.

OMENA, W. **Temperatura de Manuseio dos Asfaltos**. Boletim técnico – SINICESP. 2 ed. São Paulo, 2012.

PORTO, M.; CAPUTO, P.; LOISE, V.; ESKANDARSEFAT, S.; TELTAYEV, B.; ROSSI, C. O. **Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances**. Applied Scienc. 7 ed., n. 742, 2019.

PROSPECTOR. **KRATON D1186 BT Polymer**. 2017. Disponível em: <https://www.ulprospector.com/pt/la/Coatings/Detail/21708/557393/KRATON-D1186-BT-Polymer>. Acesso em: 12 mar. 2020.

POLYMER SCIENC LEARNING CENTER. **SBS rubber**. Disponível em: <https://pslc.ws/macrog/sbs.htm>. Acesso em: 23 abr. 2020.

QUINTERO, C. F. Q. **Influência da temperatura e da consistência do ligante na fadiga e no módulo complexo de misturas asfálticas**. 2016. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

QUINTERO, L. C. N. **Fracionamento e análise de asfaltenos extraídos de petróleo brasileiros**. 2009. 186 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

RODRIGUES, F. O. **Efeito do líquido da castanha do caju (LCC) nas propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por SBS**. 2010. 112 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

RODRIGUES, J. M. **Benefícios da utilização de aditivos surfactantes em obras de manutenção pavimentos asfálticos**. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – 22º Encontro de asfalto. Rio de Janeiro, 2016.

ROSSI, C. O; TELTAYEV, B.; ANGELICO, R. **Adhesion Promoters in Bituminous Road Materials: A Review**. 7 ed., n.5, 2017.

SANTOS, C. R.; FERRI, S.; TUCHUMANTEL, O.; CUNHA, M. B.; SUZUKI, C. Y. **Estudo comparativo para avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas elaboradas com CAP TLA e convencionais**. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço. Fortaleza, 2009.

SILVA, A. L. B. B; SILVA, E. O. **Conhecendo materiais poliméricos**. Apostila - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2003.

SILVA, L. S; FORTE, M. M. C; SPECHT, L. P; CERATTI, J. A. **Polímeros como modificadores asfálticos**. v.10, n.1, 2002.

SILVA, S.C.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, S. A.; SOARES, J. B. **Avaliação da susceptibilidade térmica em ligantes asfálticos utilizando diferentes métodos de ensaio**. 20ª RPU – Reunião de Pavimentação Urbana. Florianópolis, 2017.

SILVA, S. S. V. **Avaliação da metodologia de classificação sara de óleos brutos e estudo da redução de escala**. 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

SIMIONATO, L. R; SILVA JUNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H.B. **O efeito da alteração do ligante asfáltico no desempenho de pavimentos flexíveis**. Revista de Engenharia Civil. 2018, n. 54, p.26-35.

SINGH, H.; CHOPRA, T.; KAMOTRA, S.; JAIN, S.; KAUR, A. **Performance Evaluation of Bituminous Concrete Mixes Modified with SBS Polymer and Warm mix Additive**. v. 8, n.3, 2019.

SINICESP. **Ligantes asfálticos**. Matérias, 2010, n.2. Disponível em: <http://sinicesp.org.br/materias/2010/bt05a.htm>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SOARES, J. B.; CAVALCANTE, V. T. F. **Dosagem Passo a Passo**. In: XXXVIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, COBENGE, 2000, Ouro Preto. Anais do XXXVIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, COBENGE, 2000.

SOBREIRO, F. P. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com polímero SBS**. 2014. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

VALIM, P. **O petróleo**. Química com o professor Paulo Valim – Ciência em ação. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=V-Z_-HeGE2I. Acesso em: 21 mar. 2016.

WAHR, C.; SILVA, J.; ARAYA, D.; BRAVO, C. **Variación del porcentaje de SBS y especificaciones del ligante**. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP. Rio de Janeiro, 2011.

WARGHA FILHO, N. **Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas**. 2013. 132 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ZEGARRA, J. E. **Evaluacion del comportamiento de ligantes asfálticos y mezclas asfálticas convencional y modificado con polímero SBS tomando em consideración las especificaciones superpave**. XVI CILA – Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Rio de Janeiro, 2011.