

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

MARIA IASMIM BARROSO DE SANTANA

**REVISÃO SISTEMÁTICA: RESÍDUOS POLIMÉRICOS COMO MODIFICADORES
DAS PROPRIEDADES DE LIGANTES ASFÁLTICOS**

Cajazeiras-PB

2021

MARIA IASMIM BARROSO DE SANTANA

**REVISÃO SISTEMÁTICA: RESÍDUOS POLIMÉRICOS COMO
MODIFICADORES DAS PROPRIEDADES DE LIGANTES ASFÁLTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Robson Arruda Dos Santos.

Cajazeiras-PB
2021

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Catalogação na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

S232r

Santana, Maria Iasmim Barroso de

Revisão sistemática: resíduos poliméricos como modificadores das propriedades de ligantes asfálticos / Maria Iasmim Barroso de Santana; orientador Robson Arruda dos Santos.- 2021.

78 f.: il.

Orientador: Robson Arruda dos Santos.

TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2021.

1. Pavimentação asfáltica modificada 2. Ligantes asfálticos 3. Asfalto modificado com polímeros 4. Misturas asfálticas 5. Resíduos poliméricos. I. Título

CDU 624-032.37(0.067)

MARIA IASMIM BARROSO DE SANTANA

**REVISÃO SISTEMÁTICA: RESÍDUOS POLIMÉRICOS COMO
MODIFICADORES DAS PROPRIEDADES DE LIGANTES ASFÁLTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 24 de Setembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Robson Arruda Dos Santos – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador



Cícero Joelson Vieira Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1



Amanda Jéssica Rodrigues Da Silva – UFCG-*Campus* Campina Grande
Examinador 2

Dedico este trabalho aos meus Pais,
e ao meu companheiro que todos os
dias estiveram ao meu lado,
apoiando-me e dando-me forças a
realizar mais esse sonho.

À meus irmãos e amigos que me
incentivaram e me ajudaram muito
durante toda a minha formação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, por ter me dado saúde, força e coragem para superar todas as dificuldades. Por sempre me iluminar com o discernimento em minhas decisões.

Aos meus amados pais, Francisca e Francisco, pela vida, amor, incentivo e apoio incondicional em todo o decorrer da minha vida.

Ao meu namorado, Maxuel, pela dedicação e apoio, e acima de tudo pela atenção que me dedicou durante todo esse tempo.

A meus tios, tias, primos e primas que me ampararam no dia a dia e incentivaram.

A meus companheiros de apartamento, Luan e Alda, que estiveram ao meu lado em momentos difíceis e me ajudaram a superar os desafios da vida.

Aos amigos de curso, que me ajudaram a chegar até aqui, que me auxiliaram nessa caminhada, sou grata por todo o aprendizado e ainda mais pela amizade de cada um.

A meu orientador, Robson Arruda dos Santos por ter aceito a me orientar e me ajudar nessa jornada, meu eterno obrigado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, pela oportunidade de ampliar meu conhecimento.

Aos professores e funcionários, que estiveram dia a dia comigo, me auxiliando e ajudando a conquistar esse objetivo.

E a todos que me apoiaram de alguma forma, direta ou indiretamente na minha formação, o meu eterno agradecimento a vocês.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a incorporação de um resíduo industrial polimérico ao cimento betuminoso de petróleo. O principal objetivo deste trabalho é obter um asfalto modificado com melhorias em suas propriedades físicas, tornando-o mais resistente ao tráfego. Polímeros têm sido amplamente utilizados para modificar asfalto, tanto para pavimentação quanto para aplicações industriais. Nesta pesquisa, foi discutido o estudo do asfalto modificado com polímero, que apresenta melhor comportamento do que o asfalto convencional, mostrando como o polímero se comporta quando misturado ao asfalto e as suas características. O asfalto polimérico modificado tem uma vida útil muito mais longa que o asfalto convencional, destacando-se os pavimentos drenantes, que, graças aos seus vazios por onde flui a água, oferecem maior segurança, durabilidade, conforto, menores custos de manutenção, economia de tempo com viagens mais rápidas, menos estresse e, com tudo isso, alertou autoridades governamentais e estudiosos da área que mais investimentos são necessários nesses materiais de melhor qualidade, visto que o asfalto modificado já é amplamente utilizado com polímeros em Europa e Estados Unidos. O ligante modificado foi avaliado quanto a sua viscosidade, retorno elástico, comportamento reológico e estabilidade à estocagem. Foram correlacionadas a estrutura química e as transições térmicas dos polímeros com as características do ligante modificado. Os polímeros do tipo SBS e borracha de pneu, foram os melhores modificadores de asfalto, quando comparado com os demais polímeros avaliados.

Palavras-Chave: pavimentação asfáltica modificada; ligantes asfálticos; asfalto modificado com polímeros; misturas asfálticas; resíduos poliméricos.

ABSTRACT

This paper presents a study on the incorporation of a polymeric industrial waste into petroleum bituminous cement. The main objective of this work is to obtain a modified asphalt with improvements in its physical properties, making it more resistant to traffic. Polymers have been widely used to modify asphalt for both paving and industrial applications. In this research, we discussed the study of modified asphalt with polymer, which presents better behavior than conventional asphalt, showing how the polymer behaves when mixed with asphalt and its characteristics. The modified polymeric asphalt has a much longer service life than conventional asphalt, especially the draining pavements, which, thanks to its voids through which the water flows, offer greater safety, durability, comfort, lower maintenance costs, time savings with faster travel, less stress and, with all this, warned government authorities and scholars in the area that more investments are needed in these better quality materials, modified asphalt is already widely used with polymers in Europe and the United States. The modified binder was evaluated for its viscosity, elastic return, rheological behavior and storage stability. The chemical structure and thermal transitions of the polymers were correlated with the characteristics of the modified binder. SBS polymers and tire rubber were the best asphalt modifiers when compared to the other polymers evaluated.

Keywords: modified asphalt paving; asphalt binders; modified asphalt with polymers; asphaltic mixtures; polymeric waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Estrada estadual com faixa de direção.	26
Figura 2 Propriedades dos ligantes asfálticos melhoradas com a adição de resíduos modificadores poliméricos.	49
Figura 3 Diferentes maneiras de se introduzir polímero no asfalto por Zenke.	51
Figura 4 Representação de misturas com partículas de borracha sólida.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição química do asfalto (depois da SHRP, 1993).....	30
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Composição do óleo.	23
Quadro 2 Especificação brasileira de cimento asfálticos.	24
Quadro 3 Tipos de forças que geram aglomeração de compostos no CAP.....	30
Quadro 4 Benefícios de diferentes tipos de modificadores de asfalto.....	33
Quadro 5 Resumo das características físicas realizadas em asfaltos.....	35
Quadro 6 Especificação para ligantes modificados por polímeros.....	37
Quadro 7 Materiais mais utilizados como modificadores de asfalto nos EUA.	38
Quadro 8 Limites para a caracterização dos ligantes asfálticos.	40
Quadro 9 Principais tipos de polímeros produzidos no Brasil.	42
Quadro 10 Elementos considerados para a produção de CAP's modificados.....	49
Quadro 11 Resultados obtidos da adesão de polímeros ao asfalto.	63
Quadro 12 Características da mistura de asfalto ideal.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AASHTO – Associação dos Oficiais de Rodovias e Transportes do Estado
- ABS – Acrilonitrila-butadieno- estireno
- AREBOP – Associação Nacional das Empresas de Reciclagem de Pneus e Artefatos de Borracha
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- BBR – *Bending Beam Rheometer*
- BN – Borracha natural
- CAP – Cimentos Asfálticos de Petróleo
- CAP4,5 EVAR 9 – CAP modificado por 4,5% EVAR com granulometria de 9 Mesh
- CAP4,5 EVAR 24 – CAP modificado por 4,5% EVAR com granulometria de 24 Mesh
- CAPSBS – CAP modificado por 4,5% SBS
- CBUQ – Concreto betuminoso trabalhado a quente
- CENAUREM – Centro Nordestino de Aplicação e Uso da Ressonância Magnética Nuclear
- CGS – Compactador Giratório *Superpave*
- CL – Cura Lenta
- CM – Cura Média
- CNT – Confederação Nacional de Transportes
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
- CR – Cura Rápida
- CRM – *Crumb Rubber Modified*
- DDT – *Direct Draw Press*
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DSC – Calorimetria diferencial de varredura
- DSR – Reômetro de cisalhamento dinâmico
- DOU – Diário Oficial da União
- EM – Especificação de material
- ES – Especificações de serviço
- EUA – Estados Unidos
- EVA – Etileno-acetato de vinila

FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*
GPC – Cromatografia de permeação em gel
IE – Instruções de teste
IPR – *Highway Research Institute*
ISTEA – Lei de Eficiência do Transporte Intermodal de Surfasse
LPC – Laboratoire des Ponts et Chaussées
ME – Métodos de teste
NCHRP – *National Research Program Cooperative of Roads*
PAC – Cimentos asfálticos de petróleo
PAV – Vaso de Envelhecimento por Pressão
PBD – Polibutadieno
PEBD – Polietileno de baixa densidade
PEHD – Polietileno de alta densidade
PELD – Polietileno linear de baixa densidade
PEUAPM – Polietileno de ultra alto peso molecular
PEUBD – Polietileno de ultra baixa densidade
PG – Grau de desempenho
PI – Poliisopreno
PPA – Ácido polifosfórico
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRO – Procedimentos
PVC – Poli (cloreto de vinila)
RET – Terpolímero elastomérico reativo
RMN – Ressonância magnética nuclear
RSU – Resíduo sólido urbano
RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*
RTV – Viscosímetro Rotacional
SAMI – *Tension Absorbing Membrane Interlayer*
SARA – Saturadas, aromáticas, resina e asfalto
SB – Estireno-butadieno
SBR – Estireno-butadieno aleatório
SBS – Estireno-butadieno-estireno
SEBS – Estireno-butileno-estireno

SHRP – *Strategic Highway Research Program*

SIS – Estireno-isopreno-estireno

Superpave – *Superior Performance Flooring*

S-VECD – Dano Viscoelástico Contínuo Simplificado

UV – Radiação ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

G^* – Módulo de cisalhamento complexo

S – Módulo de rigidez

m – Parâmetro de relaxamento

® – Marca registrada

λ_{\max} – Máxima Deformação

τ_{\max} – Máxima Tensão de Cisalhamento Aplicada

ω – Frequência angular

γ – Deformação

δ – Ângulo de fase

μ – Viscosidade Absoluta

$\theta_{\text{crít}}$ – Temperatura crítica

η – Viscosidade

σ – Tensão aplicada

τ – Tensão cisalhante

φ – Ângulo de fase ou defasagem

ε – Deformação resultante

dy/dt – Taxa de deformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	21
2.1	OBJETIVO GERAL	21
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
3	REVISÃO DE LITERATURA	22
3.1	ASFALTO	22
3.2	REVESTIMENTO	26
3.3	REOLOGIA	27
3.4	VISCOSIDADE	28
3.5	SUPERPAVE	29
3.6	CAP	30
3.7	RESÍDUOS POLIMÉRICOS	40
3.8	POLÍMEROS	41
3.9	RET	51
3.10	PET	52
3.11	EVA	53
3.12	BORRACHA DE PNEU	53
3.13	SBS (STYRENE BUTADIENE STYRENE)	56
4	METODOLOGIA	58
4.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	58
4.2	FONTE DE DADOS E ESTRATÉGIA DE BUSCA	58
4.3	CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	58
4.4	ANÁLISE DOS DADOS	59
5.	RESULTADOS E ANÁLISES	60

5.1	VISAO GERAL DOS ESTUDOS	60
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
6.1	TRABALHOS FUTUROS	66
6.2	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Em um mundo cada vez mais preocupado com sustentabilidade, diversos profissionais buscam utilizar de tecnologias para a reciclagem mesmo sendo uma alternativa bastante viável, a reciclagem possui também desvantagens se tomarmos como exemplo, a quantidade de água necessária para se obter o reaproveitamento desse material. Em uma região que convive com a escassez de água este é um problema cada vez mais preocupante (COELHO, 2019). Assim diversos pesquisadores vêm buscando maneiras inovadoras de destinar os resíduos, sabendo que os polímeros são um dos principais vilões da atualidade, quando se trata de qualidade do meio ambiente. Atualmente, uma grande parte dos resíduos descartados rotineiramente no Brasil é composta por material plástico.

Nos últimos anos, os polímeros têm aumentado sua participação na composição do resíduo sólido urbano, RSU. Na década de 60 eles não faziam parte significativa da sua composição, mas em 2005 eles contribuíram com cerca de 20 wt. (%) (porcentagem em massa) dos RSU coletados no Brasil. Os principais polímeros produzidos no Brasil e encontrados no RSU são: o polietileno de alta, baixa densidade e baixa densidade linear (PEAD, PEBD e PELBD), o polipropileno (PP), o poli (cloreto de vinila) (PVC), o poli (tereftalato de etileno) (PET) e o poliestireno (PS). [...] o PET é usado em produtos com curta vida útil como as embalagens.

Devido à grande quantidade e variedade das aplicações dos polímeros e o seu tempo de degradação relativamente longo, eles são considerados os grandes vilões ambientais por ocuparem uma boa parte do volume dos aterros. No entanto, os problemas ambientais não são causados pelos polímeros e sim pelo seu descarte de forma inadequada. A reciclagem sistemática dos polímeros é a solução para minimizar esse impacto ambiental. (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

Devido à complexidade de utilização e reciclagem desse material este tem a sua utilização aplicada nas obras de engenharia em particular na pavimentação asfáltica, por apresentar um bom desempenho. A adição de resíduos poliméricos em Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) pode ser uma alternativa técnica viável para aumentar as suas propriedades mecânicas em termos reológicos e no desenvolvimento sustentável, com benefícios de curto, médio e longo prazo para toda a comunidade.

Numa análise preliminar, considerando as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos produtos derivados de resíduos de garrafas plásticas (PET), é possível estabelecer a hipótese que estes podem servir como agente modificador do CAP contribuindo para o avanço tecnológico nos procedimentos utilizados na pavimentação asfáltica de rodovias do Brasil (SILVA, 2015).

Em 2010 no Brasil foi aprovada a Lei de nº 12.305/10 (BRASIL, 2010) que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Entretanto o aproveitamento de materiais poliméricos com betuminosos, com a finalidade de aumentar o desempenho asfáltico não é recente. Á registros que todas as modificações nos asfaltos, antes da Segunda Guerra Mundial foram feitas com borracha natural, pois este era o único material avaliado adequadamente na época. Em 1902 em Canna uma rodovia foi construída com asfalto modificado.

O notável aumento da concentração de automóveis no meio brasileiro nas últimas duas décadas ocasionou consigo duas grandes complicações a deterioração elevado das faixas de deslocamento dos carros e questões ambientais associados ao descarte de pneus. Logo se propõe o asfalto borracha como uma eficiente solução para destinação desses pneus, por aproveitar a borracha de pneus inaproveitáveis em sua produção, e resolver o problema de capeamento de vias.

Os pavimentos betuminosos, por sua natureza, são sensíveis às mudanças extremas de temperatura. Além disso, cargas aumentadas, altos níveis de tráfego, aumento da pressão dos pneus, atrito em alta temperatura e danos por umidade são outros problemas que as estruturas de piso enfrentam diariamente. Esses desafios de engenharia aumentam o custo de manutenção de estradas e, em última análise, limitam a durabilidade e a incorporam ao asfalto. Resumindo, modificar o asfalto envolve adicionar um aditivo com certas propriedades para melhorá-lo. Porém, a maioria dos asfaltos modificados com polímeros envolve eficiência em uma faixa limitada de temperaturas e propriedades, pois cada polímero cria um efeito específico no asfalto, ou seja, um tipo de polímero não pode melhorar uma ou algumas propriedades do asfalto resultante. Exemplo: minimizando a deformação permanente em alta temperatura ou fissuras em baixa temperatura em pavimentos, o que é ineficiente quando se trata de prever o desempenho em estradas colombianas; isso ocorre porque são necessárias melhorias na maioria das propriedades dos ligantes betuminosos.

O asfalto modificado utilizado para misturas asfálticas deve ter a viscosidade necessária em alta temperatura para reduzir a sensibilidade à pega permanente, sem aumentar a rigidez em baixa temperatura, para que ocorra fissuração. Portanto, tem-se proposto combinar polímeros compatíveis com diferentes propriedades químicas, físicas, mecânicas e reológicas como modificadores do asfalto convencional em diferentes percentagens.

Esta revisão apresenta o estado atual do conhecimento sobre o tipo e propriedades dos polímeros e estratégias para melhorar o desempenho do asfalto. Os artigos foram revisados e classificados em subcategorias de acordo com os tipos de polímeros utilizados. O artigo é baseado no efeito das misturas individuais e nas propriedades físicas e mecânicas.

2 OBJETIVOS

Nesse capítulo delineamos os objetivos do Trabalho de Conclusão do Curso.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar estudos que abordem a utilização de produtos derivados de resíduos poliméricos na pavimentação asfáltica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar dados equivalentes de pesquisas que tenham como tema similar, polímeros na pavimentação asfáltica, para comparação;
- Avaliar as informações apresentadas por trabalhos científicos no mesmo campo de pesquisa;
- Categorizar uma lista de resíduos poliméricos que tenham um desempenho apto para a aplicação na pavimentação asfáltica.

2.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 3 é apresentado o referencial teórico, que contém a revisão das teorias básicas do trabalho, primeiro é apresentada a ideia geral sobre modificadores de asfalto, em seguida é apresentada a metodologia de revisão sistemática da literatura, conceito fundamental para a realização de pesquisas.

O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada para a realização do estudo, as principais etapas da pesquisa e o processo de realização da revisão sistemática e, por fim, descreve-se a forma de análise e síntese dos dados extraídos.

Capítulo 5 apresenta os resultados desta revisão sistemática. Inicialmente, o capítulo apresenta uma análise geral da revisão sistemática conforme os estudos principais, entre outras análises, e por fim foi desenvolvida uma discussão do trabalho.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, onde foi realizada uma análise dos limites e ameaças à validade da pesquisa, propostas de trabalhos futuros com base nos resultados, bem como uma análise final de o trabalho.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, apresentamos a base teórica necessária para a realização da pesquisa e o entendimento do assunto.

3.1 ASFALTO

Para Bernucci et al. (2006) o asfalto é um ligante betuminoso proveniente da destilação do petróleo, com propriedades termoplásticas, impermeável à água e com baixa reatividade. Enquanto o aglutinante está em uso, devido às suas propriedades reativas, ele continua a sofrer alterações devido aos efeitos do envelhecimento lento.

Segundo o IBP - Instituto Brasileiro do Petróleo (1999), os asfaltos são ligantes de diferentes consistências, marrom escuro ou preto, em que o componente ligante ativo predominante é o betume, que ocorre naturalmente em depósitos ou pode ser obtido através do refino de petróleo. por destilação em instalações industriais especialmente concebidas.

Bernucci et al (2008), conceitua betume, asfalto e alcatrão da seguinte forma:

- Betume: é uma mistura de hidrocarbonetos pesados completamente solúvel em dissulfeto de carbono (CS₂);
- Asfalto: mistura de hidrocarbonetos de petróleo, natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, que pode conter pequenas quantidades de outras substâncias como oxigênio, nitrogênio e enxofre.
- Alcatrão: Nome genérico de um produto que contém hidrocarbonetos e é obtido pela queima ou destilação destrutiva de carvão, madeira, etc.

O asfalto pode ser extraído de duas formas: diretamente da natureza (asfalto natural) ou extraído do petróleo por processos físicos ou químicos (óleo asfáltico) (Pinto, 2003).

O asfalto natural, surge do óleo na superfície e, a natureza da terra é responsável pela destilação através de vento e luz solar, gases e óleos leves evaporam e deixam um resíduo, isso é asfalto. Os maiores depósitos estão na ilha de Trinidad e Venezuela. Além dos lagos, o asfalto natural é encontrado em rochas como arenitos, ardósia e calcário asfáltico, que são rochas altamente porosas que são naturalmente preenchidas com asfalto.

Devido ao grande número de componentes químicos presentes no asfalto, uma metodologia que possa promover a separação individual de cada um desses compostos

não parece viável. Vários estudos têm sido desenvolvidos em métodos de fracionamento químico baseados no princípio da solubilidade, relatividade química e adsorção para obter grupos separados de substâncias com propriedades semelhantes.

Segundo Souza et al., Apud Magalhães (2004), a composição do óleo é composta pelas frações:

Quadro 1 Composição do óleo.

Carbono	Composição do óleo
C1 e C2	Gás natural
C3 e C4	Gás liquefeito de petróleo (GLP)
C4 a C10	Nafta (solvente e gasolina)
C11 a C12	Querosene
C13 a C18	Diesel
C18 a C25	Gasóleo e gasóleo para aquecimento
C25 a C38	Óleos lubrificantes
> C38	Asfalto

Fonte: MAGALHÃES (2004).

Onde C representa o elemento carbono e o índice n representa o número de carbonos presentes na cadeia de carbono.

O asfalto é obtido industrialmente através do processo de destilação do petróleo bruto. Existem mais de 1000 tipos de petróleo bruto no mercado, mas apenas cerca de 10% podem produzir ligantes asfálticos, pois para a produção de ligantes o petróleo bruto é bastante pesado, ou seja, sua densidade é próxima a um (LAMONTAGNE, 2002).

A produção de asfalto é um dos produtos finais da destilação do petróleo bruto, em que as frações mais leves (gasolina, querosene, diesel) são separadas do asfalto por evaporação, fracionamento e condensação (IBP, 1999).

Segundo GUARÇONI (DNER, 1998), a maioria das refinarias no Brasil trabalha com os mais diversos tipos de petróleo bruto disponíveis, e para isso devem ser utilizados diferentes processos nas refinarias:

- Se o rendimento do asfalto for alto (óleo bruto na base naftênica), a destilação a vácuo no processo de refino é suficiente;
- O rendimento médio de asfalto (óleo bruto de base intermediária) é uma destilação de dois estágios: pressão atmosférica e vácuo;
- Se o rendimento do asfalto (óleos leves) for baixo, a desasfaltagem do propano também é incluída, além da destilação em dois estágios.

Nos dois últimos processos, obtém-se asfalto muito duro, o que requer a adição de outras frações do próprio refino para transformá-lo em um produto que atenda às especificações brasileiras em termos de propriedades físicas, o que não ocorre com a variação de sua composição química, devido ao delicado desequilíbrio na estabilidade coloidal do asfalto.

A classificação ou especificação de um asfalto envolve a análise das propriedades reológicas, físicas e químicas. No Brasil, os cimentos asfálticos de petróleo possuem o símbolo CAP (Petroleum Asphalt Cement), que deve ser colocado antes das informações dos diversos tipos de acordo com sua classificação de penetração de conformidade com a norma DNIT - EM 095 (2006). A Quadro 2 mostra as especificações atuais dos cimentos asfálticos brasileiros classificados por penetração.

Quadro 2 Especificação brasileira de cimento asfálticos.

Características	Unidades	Especificações				Métodos		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	DNER (ME)	ABNT (NBR)	ASTM
Penetração (100g; 5s; 25 °C)	0,1 mm	30 45	50 70	85 100	150 200	003/99	6576	D 5
Ponto de amolecimento (min.)	°C	52	46	43	37		6560	D 36
Viscosidade <i>Saybolt Furol</i>	s					004/94	14950	E 102
135 °C, min.		192	141	110	80			
150 °C, min.		90	50	43	36			
177 °C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60			
OU								
Viscosidade Brookfield								
135 °C, sp ⁽ⁱ⁾ 21, 20 rpm ⁽ⁱⁱ⁾ , min.	cP	374	274	214	155		15184	D 4422
150 °C, sp ⁽ⁱ⁾ 21, min.	cP	203	112	97	81			
177 °C, sp ⁽ⁱ⁾ 21	cP	76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114			
Índice de Susceptibilidade Térmica		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (-0,7)			
Ponto de Fulgor, min.	°C	235	235	235	235	149/94	11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, min.	% em massa	99,5	99,5	99,5	99,5	153/94	14855	D 2042
Ductilidade a 25 °C, min.	cm	60	60	100	100	163/98	6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min.								D 2878
Variação em massa, máx.	% em massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25 °C, min.	cm	10	20	50	50	163/98	6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8		6560	D 36

Penetração retida, min.	%	60	55	55	50	003/99	6576	D 5
----------------------------	---	----	----	----	----	--------	------	-----

Fonte: DNIT (2010).

Asfalto refinado a óleo com propriedades específicas para uso na construção de estradas é um adesivo termoplástico, viscoelástico, impermeável e pouco reativo, torna-se líquido ao ser aquecido e retorna ao seu estado original após o resfriamento.

O asfalto para construção de estradas pode ser modificado por vários meios: cargas (fuligem, cinza volante, cimento Portland), diluentes (enxofre e lignina), agentes oxidantes (compostos de manganês), antioxidantes (sais de cálcio, fenóis e aminas) e polímeros (elastômeros, plastômeros e borracha de pneu moído), (WORLD ROAD, 1998).

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é responsável pela classificação, fiscalização e garantia da qualidade do asfalto. A ANP publica resoluções que contêm especificações técnicas, condições de armazenamento, qualidade e preservação dos ligantes asfálticos.

O termo pavimento asfáltico é geralmente usado para qualquer pavimento com superfície asfáltica. Normalmente consiste em uma camada superficial de agregados minerais, revestida com asfalto e cimentada, e uma ou mais camadas de suporte (base e subestrutura), que pode ou não ser tratada com asfalto.

Via de regra, a base e a subestrutura são feitos com materiais granulares compactados (como brita, escória, cascalho, areia e uma combinação dos mesmos) e solo estabilizado, pois esses materiais estão disponíveis no canteiro de obras e, portanto, tornam-se mais econômicos.

A “via é uma construção que foi pensada e construída para suportar o tráfego de veículos motorizados em diferentes condições climáticas e também para melhorar as condições de rolamento em termos de conforto e segurança”, segundo CNT (2009). A manutenção da estrada é crítica para manter ou aumentar o nível desejado de desempenho da estrada. Desta forma, defeitos na superfície da estrada como furos, afundamentos e desníveis podem prejudicar a segurança do usuário e também aumentar o tempo e os custos necessários para as viagens. A falta de manutenção e preservação do pavimento da estrada afeta diretamente os custos de transporte, pois em muitos casos causam danos à carga transportada e, aumentam os custos de manutenção dos veículos.

Segundo a CNT (2009), a avaliação é feita com base na observação do estado da estrada em cada quilômetro examinado em relação à falha apresentada ou grupo de falhas. Em cada trecho de até 10 quilômetros de extensão, o pesquisador avalia o extrato de acordo com sua prevalência. Os patches são classificados principalmente como:

- Totalmente perfeito: quando existe uma uniformidade perfeita da superfície da estrada e não são percebidas vibrações no interior do veículo durante o movimento;
- Desgastado: quando o fundo mostra sinais de desgaste; se pode notar irregularidades na superfície; e ainda não há lacunas; Grades / Rachaduras: Observa-se a presença de grelhas ou manchas na superfície da via, o que gera vibrações no veículo, mas não há buracos;
- Afundamento, ondulação ou buracos: a estrada apresenta dobras e / ou ondas por infiltração de água, deflexão do tráfego de veículos e / ou mesmo buracos, conforme mostrado na Figura 1;

Figura 1 Estrada estadual com faixa de direção.



[Esta Foto](#) de Autor Desconhecido está licenciado em [CC BY-NC-ND](#)

- Totalmente destruída: se houver grande incidência de buracos ou destruição total do piso que possa obrigar o veículo a reduzir a velocidade.

3.2 REVESTIMENTO

O principal objetivo da construção de um pavimento asfáltico é proteger a infraestrutura do pavimento por meio de impermeabilização, além de proporcionar conforto ao usuário com uma superfície lisa e resistente ao escorregamento, deformação e deterioração por clima e produtos - produtos químicos.

Segundo o IBP (Asphalt, 2001) os principais tipos de revestimentos asfálticos são:

- CBUQ (concreto betuminoso trabalhado a quente) - é uma mistura asfáltica produzida em uma usina central denominada moinho. Cimento Asfáltico e Mistura de Cimento Asfáltico (CAP). Asfalto e agregado são aquecidos separadamente de 121 a 163 ° C, cuidadosamente medidos e

dosados, e então misturados até que os agregados sejam cobertos com asfalto, da estrada até o canteiro de obras, onde é distribuída pela pavimentadora antes de esfriar e compactada até uma densidade adequada pelos rolos de pressão.

- Tratamento superficial simples, duplo ou triplo: é um revestimento de material betuminoso (CAP 7, CAP 150/200, CR250 ou RR 2C) e agregado mineral, no qual o agregado é aplicado uniformemente ao material asfáltico, aplicado em uma, duas ou três camadas.
- Pré-mistura a frio - é o produto que surge quando agregados minerais e emulsão asfáltica ou asfalto diluído são misturados em equipamentos adequados, que devem ser distribuídos a frio e compactados.
- Asfalto areia quente - é o produto resultante da mistura a quente de agregados finos e cimento asfáltico com ou sem filler em planta própria, que deve ser distribuído e compactado a quente.
- Lodo Asfáltico - é o composto em consistência líquida de agregados ou misturas de agregados finos, filler, emulsão asfáltica e água, devidamente distribuído e nivelado.
- Microrrevestimento: é a combinação em uma consistência líquida de agregado mineral, material de enchimento (filler), emulsão asfáltica modificada com polímero, água e aditivos, que são uniformemente distribuídos em uma superfície de revestimento preparada.

3.3 REOLOGIA

Segundo BAHIA, HANSON (2000) a reologia é um ramo da física que examina o fluxo e a deformação da matéria. O termo reologia vem do grego "*rheos*", que significa "fluxo, deslocamento". Este nome foi originalmente usado por E.C.Bingham e M.Reiner, para denotar a disciplina oficialmente introduzida em abril de 1929 para descrever o estudo do fluxo e deformação de todas as formas da matéria. A citação de Heráclito ("Tudo flui") foi adotada como lema na época.

A reologia também se tornou uma ferramenta fundamental na pavimentação asfáltica, e o principal objetivo do estudo do comportamento reológico dos materiais asfálticos é encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de carregamento e temperatura. Desde a década de 1920, pesquisadores vêm estudando as propriedades reológicas desses materiais e tentando estabelecer um sistema de comparação de seus

diferentes tipos com base nas propriedades reológicas de materiais termoreologicamente simples, desde que a validade do princípio de superposição tempo-temperatura foi confirmada para esses materiais.

Compreender a reologia dos ligantes asfálticos é importante por três razões:

- Permite distinguir entre ligantes asfálticos obtidos de diferentes óleos e por diferentes processos de refino;
- Direciona a seleção de temperatura para a construção da camada de asfalto e operações de usinagem; e
- Determina como as propriedades reológicas estão relacionadas aos defeitos da superfície da estrada.

Pinto (1991) definiu a reologia dos materiais como o estudo da deformabilidade dos materiais sob a ação de qualquer carga, levando em consideração o momento da carga. No caso especial dos materiais asfálticos, o efeito temperatura-tempo é muito relevante, pois são materiais termos sensíveis, ou seja, sua consistência varia com a mudança de temperatura. A partir disso, pode-se concluir que o comportamento elástico, viscoelástico e viscoso do betume depende diretamente da temperatura e do tempo de processamento.

3.4 VISCOSIDADE

O conceito de fluido viscoso ou newtoniano originou-se em 1687 com a definição de Isaac Newton da resistência interna de um fluido ideal, hoje conhecida como viscosidade, que é causada pelo atrito entre camadas paralelas de fluido quando cisalhado. Os conceitos de comportamento elástico e comportamento viscoso referem-se ao tempo de observação da deformação. O número de Deborah é a razão entre o tempo de relaxamento do material (λ) e o intervalo de tempo em que a deformação ou tensão correspondente foi aplicada, a duração do experimento reológico (T) dada pela equação 1:

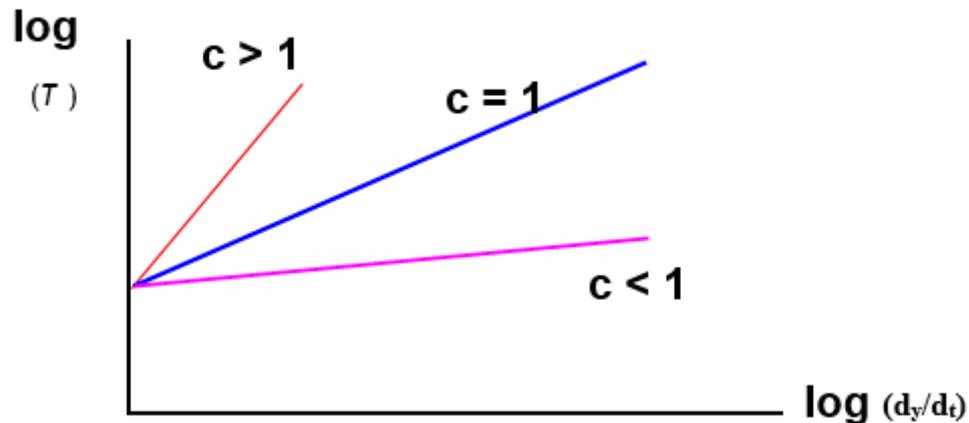
$$De = \frac{\text{Tempo de resposta do material}}{\text{Tempo de observação}} \quad (1)$$

De acordo com BAHIA et al. (1998), o CAP exhibe uma temperatura de operação não newtoniano, e em uma certa faixa de temperatura (25 ° C, uma temperatura frequentemente usada em testes de CAP), o Log (τ) versus o log (dy/dt), tem curva que

representa uma região aproximadamente linear em que pode ser considerada válida a lei de potência proposta por Ostwald de Waele, cuja tensão de cisalhamento varia linearmente com a taxa de deformação exponencial.

$$\tau = m (d_y/d_t)^c \quad (2)$$

Gráfico 1 Ilustrativo da lei da potência.



Fonte: BAHIA E COLABORADORES (1998).

Se $c = 1$,

$m = \mu$ líquido newtoniano.

$C < 1$ fluido pseudoplástico.

$C > 1$, fluido dilatador.

Segundo CHEUNG e CEBON (1997) o CAP é pseudoplástico na faixa de 25 °C a 60 °C, a tensão de cisalhamento neste tipo de fluido destrói as associações moleculares existentes e cria uma nova associação que é orientada para o cisalhamento e, redução da viscosidade.

3.5 SUPERPAVE

O Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária SHRP (Strategic Highway Research Program) foi criado nos Estados Unidos em 1987 com o objetivo principal de propor um novo sistema de especificação para materiais asfálticos. O programa SHRP foi desenvolvido para auxiliar na seleção de materiais e projeto de compostos.

As especificações do Superpave foram desenvolvidas com base em testes reológicos para controlar ou eliminar três tipos de falha do pavimento: endurecimento

permanente, trinca por fadiga e trinca térmica. As especificações resultantes foram chamadas de Superpave (Superior Performance Flooring).

O modelo estrutural do SHRP classifica os componentes do CAP em polares e apolares; sugere que forças intra e intermoleculares são responsáveis pela formação de redes tridimensionais que levam a propriedades elásticas e viscosas, como mostrado na Quadro 3, resultando em uma diminuição na elasticidade e um aumento nas propriedades de viscosidade.

Quadro 3 Tipos de forças que geram aglomeração de compostos no CAP.

Forças Intra e intermoleculares	Compostos que se aglomeram
Van der Waals	Longas cadeias alifáticas
Ligações de hidrogênio	Polares/heteroátomos
Atrações $\pi - \pi$	Aromáticos

Fonte: JONES (1993).

3.6 CAP

O CAP consiste em hidrocarbonetos com pequena proporção de heteroátomos (enxofre, nitrogênio e oxigênio), cuja presença pode ter influência significativa nas propriedades do asfalto, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 Composição química do asfalto (depois da SHRP, 1993).

Constituinte químico	Percentagem de composição
Carbono	70-85%
Hidrogênio	7-12%
Enxofre	0-1%
Oxigênio	0-5%
<i>Pequenas quantidades de metais dispersos como: óxidos, sais ou em componentes orgânicos que contenham metal.</i>	

Fonte: REUBUSH (1999).

WHITEOAK (apud LEITE, 1999) menciona que os componentes do CAP possuem as seguintes propriedades:

- Substâncias saturadas têm um efeito negativo na sensibilidade ao calor, em concentrações mais altas, amolecem o produto.
- Os aromáticos têm anéis de carbono estáveis e ajudam a melhorar as propriedades físicas.

- As resinas são moléculas polares com peso molecular médio formadas por anéis aromáticos que atuam como peptizadores para evitar a coagulação das moléculas de asfalto e, assim, melhorar a ductilidade e dispersão dos asfaltos.
- Os asfaltos são formados a partir de anéis aromáticos com poucas cadeias laterais, que apresentam alta polaridade e alto peso molecular e contribuem para o aumento da viscosidade, tornando os asfaltos menos suscetíveis às oscilações de temperatura.

CAP é obtido em diferentes viscosidades, medidas por testes de penetração ou viscosidade dinâmica, e forma o produto básico a partir do qual, diferentes tipos de materiais de gesso são feitos:

- Cimentos asfálticos;
- Asfalto desbastado;
- Emulsões asfálticas;
- Asfalto modificado por: estireno-butadieno-estireno (SBS), terpolímero elastomérico reativo (RET), ácido polifosfórico (PPA) e cal hidratada.
- Asfaltos: ajudam a melhorar a sensibilidade ao calor e aumentar a viscosidade.

As especificações oficiais atuais classificam o CAP de acordo com sua consistência, tanto quanto à viscosidade a 60 °C (ABNT NBR 15.184, 2004) e quanto à penetração a 25 °C (ABNT NBR 6.576, 1998).

O sistema de classificação da viscosidade é medido como o valor da viscosidade dos cimentos asfálticos a uma temperatura de 60 °C (temperatura máxima na superfície da estrada). A unidade de medida no sistema CGS é o equilíbrio, P (1P = 0,1 Pa. S), dividido nas classes CAP7, CAP20 (agente de ligação mais comumente usados) e CAP 40 (ROBERTS et al., 1998).

A classificação da penetração baseia-se principalmente na consistência do cimento asfáltico à temperatura de 25 °C, que é considerada a temperatura média do pavimento durante a operação. Quanto à penetração podem ser divididos em quatro tipos: CAP 30/45, CAP 50/60, CAP 85/100 e CAP 150/200 e indicam as áreas de penetração dos tipos individuais em milímetros decímetros.

De acordo com DNIT 095/2006 - especificação do material, CAP é caracterizado pelos seguintes testes:

- Método de teste de penetração ASTM D5
- Ponto de amolecimento - método de teste ASTM D36
- Viscosidade Saybolt Furol - método ASTM teste E 102
- Viscosidade Brookfield a 135 ° C - método de teste ASTM D4402
- Viscosidade Brookfield a 150 ° C - método de teste ASTM D4402
- Viscosidade Brookfield a 177 ° C - método de teste ASTM D4402
- Índice de sensibilidade térmica
- Método de teste de ponto de inflamação ASTM D92
- Método de teste de solubilidade em tricloroetileno ASTM D2042
- Ductilidade a 25 método de teste GC ASTM D113
- RTFOT - variação de massa - método de teste ASTM D 2872

Os materiais betuminosos comumente usados na construção de estradas são.

I. Cimentos asfálticos de petróleo (CAP);

Segundo Castro (2003), o CAP é um material complexo que apresenta um comportamento viscoso, caracterizado por uma diminuição da rigidez devido aos longos tempos de exposição e uma susceptibilidade térmica, caracterizada por uma alteração das propriedades em função da temperatura.

II. Asfalto diluído;

Asfalto diluído são diluições de cimentos asfálticos em solventes à base de petróleo com volatilidade suficiente.

Diluentes fornecem produtos menos viscosos e devem evaporar completamente, deixando o CAP como um resíduo que desenvolve propriedades semelhantes às do cimento. O fenômeno de evaporação do diluente é conhecido como endurecimento.:

Cura Rápida (CR): Asfalto diluído que consiste em cimento asfáltico e um solvente altamente volátil, como nafta ou gasolina. Reverse, pré-misturado a frio e asfalto de areia fria (CR-250 e CR-800).

Cura Média (CM): Asfalto diluído consistindo em cimento asfáltico e um solvente de volatilidade média como querosene. O asfalto diluído de cura média é usado em primers, asfalto de areia fria e misturas urbanas (misturas urbanas, CM250 e CM800).

Cura Lenta (CL): Asfalto diluído constituído de cimento asfáltico e óleos não voláteis.

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) divide o asfalto diluído em quatro classes: CR-70, CR-250, CM-30 e CM-70.

III. Asfaltos emulsionados;

São dispersões de cimento asfáltico divididas em pequenas esferas ($1 \mu\text{m} \leq \phi \leq 10 \mu\text{m}$) suspensas em meio aquoso, com fratura variável, obtidas pela mistura de asfalto quente com água e emulsificantes que têm a função de dispersar o asfalto. Partículas e embrulhe-as em papel alumínio para mantê-las suspensas.

IV. Asfalto oxidado ou pulverizado;

Asfaltos oxidados ou soprados são aqueles que são expostos ao aquecimento e à ação de uma corrente de ar para alterar suas propriedades originais e adaptá-los a usos específicos. Em geral, a destilação é interrompida e o resíduo é agitado em tubos cilíndricos de aço, onde é deixado resfriar até atingir uma temperatura que permita seu acondicionamento sem risco de queimaduras (Leite, 1999). O asfalto enferrujado é menos dúctil e menos sujeito a flutuações de temperatura. Por outro lado, sofrem uma diminuição da ductilidade, sendo geralmente utilizados para impermeabilização para fins industriais e também para a construção de pisos industriais, cujas condições de trabalho não permitem a utilização de cimentos asfálticos convencionais.

V. Rejuvenescedores;

O aglutinante asfáltico leva à perda gradual de seus elementos sob a influência das condições climáticas como temperatura, ar, luz solar, chuva e intempéries nos pavimentos asfálticos, o que provoca envelhecimento e conseqüente endurecimento da mistura betuminosa. O envelhecimento leva à diminuição das cadeias aromáticas e ao aumento do teor de asfaleno.

Rejuvenescedores são usados em processos de reciclagem de pavimentos, uma técnica de restauração que visa a reutilização de agregados e ligantes de pavimentação. Nessa técnica, os rejuvenescedores atuam reduzindo a viscosidade e substituindo a porção maltesa, restaurando assim a natureza do ligante virgem.

VI. Asfalto modificado.

Melhorar o desempenho do ligante asfáltico para que possa ser adicionado em situações adversas (condições ambientais, tráfego intenso, etc.), fibras (vidro, amianto, fibras celulósicas e fibras poliméricas) ou por enxofre elementar. No entanto, a modificação mais difundida hoje é o uso de polímeros, mostrados no Quadro 4.

Quadro 4 Benefícios de diferentes tipos de modificadores de asfalto.

Modificador	Deformação Permanente	Trincas Térmicas	Trincas de Fadiga	Dano por Umidade	Envelhecimento
Elastômeros	*	*	*		*

Plastômeros	*				
Borracha de Pneu	*	*	*		*
Negro de Fumo	*				*
Cal				*	*
Enxofre	*				
Modificadores químicos	*				
Antioxidante					*
Melhorador de adesividade				*	*
Cal hidratada				*	*

Fonte: BERNUCCI ET AL (2008).

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os cimentos de asfalto de petróleo convencionais (PACs) funcionam bem e atendem aos requisitos necessários para que as misturas de asfalto tenham um desempenho adequado em condições de tráfego e clima. As relações de volume dos veículos comerciais e pesos dos eixos aumentam ano após ano, em estradas especiais ou em aeroportos, em corredores com muito tráfego e condições climáticas adversas, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, a instalação de modificadores em CAPs convencionais tornou-se cada vez mais necessário.

A sua modificação permite um aumento da temperatura de amolecimento, a resistência à deformação permanente, a resistência ao calor e fissuras por fadiga, um aumento da resistência ao envelhecimento e uma melhoria das propriedades adesivas e coesivas em relação às temperaturas.

Para Yildirim (2007), polímeros de vários tipos e categorias são usados para modificar CAPs, esses produtos têm sido usados para modificar ligantes asfálticos desde 1970 na Europa e nos EUA. Seu uso se destina a novos tipos de aplicações, como: Por exemplo: drenagem de misturas asfálticas, concreto asfáltico com alto módulo, micro revestimentos, membranas anti-trinca, etc.

Os ensaios de avaliação de cimentos asfálticos também são utilizados para o asfalto modificado. Eles são divididos em análises químicas, testes tradicionais, testes específicos e testes reológicos.

As análises químicas são: infravermelho, cromatografia de permeação em gel (GPC), calorimetria diferencial de varredura (DSC), ressonância magnética nuclear (RMN). O teor de polímero é determinado por espectrometria de infravermelho. A

separação de compostos de diferentes pesos moleculares é realizada por GPC. O DSC determina a temperatura de transição vítrea e a entalpia das frações cristalizáveis, e o RMN identifica o polímero por quantificação.

Os testes tradicionais utilizados são: penetração, ponto de amolecimento, índice de susceptibilidade térmica, são testes empíricos padronizados pela ASTM (American Society for Testing and Materials).

Testes reológicos e os testes e especificações são projetados para controlar ou eliminar três tipos de falha do pavimento: deformação permanente, trinca por fadiga e trinca térmica.

O Quadro 5 mostra alguns dados comparativos dos testes físicos. Observa-se que a adição de SBS e EVAR diminui o valor de penetração e aumenta o ponto de amolecimento e recuperação elástica em relação ao CAP não modificado. O ponto de amolecimento e recuperação elástica com a adição de SBS mostraram um efeito mais pronunciado, oferecendo maior resistência à deformação permanente e elasticidade.

Quadro 5 Resumo das características físicas realizadas em asfaltos.

Amostra	Penetração (100g, 5 s, 25°C) 0,1 mm	Ponto de amolecimento (°C)	Retorno elástico, %
CAP	51	50,4	6,0
CAP4,5 EVAR 9	26	66	13,5
CAP4,5 EVAR 24	34	63,2	12,0
CAPSBS	37	72	63,0

Fonte: BERNUCCI ET AL. (2008).

O aglutinante de asfalto é a parte nobre dos pavimentos flexíveis utilizados na construção de estradas. É um composto de hidrocarboneto dividido em quatro classes químicas chamadas frações SARA (saturadas, aromáticas, resina e asfalteno). A matriz do malte (parte volátil do ligante asfáltico) é composta por saturados, aromáticos e resinas.

Uma das propriedades mais importantes é a ligação com o granulado, a formação de uma massa asfáltica. Se a pegajosidade no aglutinante adicionado for insuficiente, a mistura nos preenchedores de campo pode levar a uma camada que é sensível à desagregação.

Um polímero é uma macromolécula formada pela repetição de pequenas e simples unidades químicas chamadas monômeros.

- Termorrígidos: Não podem ser derretidos, decompõem-se a uma temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende da sua estrutura química. Possuem cadeias moleculares que formam uma rede tridimensional que resiste a qualquer mobilidade térmica, por exemplo: resina epóxi, poliéster e poliuretano.
- Termoplásticos: São aqueles que derretem ao serem aquecidos e se tornam reversivelmente deformáveis, geralmente são constituídos por correntes lineares, mas também podem ser ramificados, são incorporados ao asfalto de alta temperatura.
- Elastômeros: São aqueles que se decompõem ao serem aquecidos antes do amolecimento, com propriedades elásticas, por exemplo: estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-butadieno aleatório (SBR) e etileno-acetato de vinila (EVA).
- Elastômeros termoplásticos (plastômeros): são aqueles que apresentam comportamento elástico em baixas temperaturas, mas apresentam comportamento termoplástico quando a temperatura sobe. Por exemplo: alguns tipos de SBS e EVA.

Historicamente, os primeiros países a utilizar misturas asfálticas modificadas foram os países da Europa e América do Norte, com destaque para França, Espanha, Alemanha e Estados Unidos (EUA). No Brasil, as primeiras experiências remontam à década de 1970. Os mais famosos mundialmente em ligantes modificados com polímeros são o US American Strategic Highways Research Program (SHRP), dividido nas quatro normas ASTM D 5840 (2000), ASTM D 5841 (2000), ASTM D 5892 (2000) e ASTM D 5976 (2000) e o Méthode d'essai del Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC). Especialmente para o polímero EVA, os franceses publicaram o Identification et dosing for infravermelho espectrometria para Fourier des copolymères SBS e EVA dans les liants bitumineux.

No Brasil existe uma coleção de asfaltos modificados com polímeros publicada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Esses padrões estão disponíveis no site do Highway Research Institute (IPR / DNIT) e incluem quatorze padrões listados abaixo:

- DNER-ES 385/99 - Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero
- DNER-ES 386/99 - Pavimentação - pré- misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito
- DNER-ES 387/99 - Pavimentação - areia asfalto a quente com asfalto polímero
- DNER-ES 388/99 - Pavimentação - micro pré-misturado a quente com asfalto polímero
- DNER-ES 390/99 - Pavimentação - pré-misturado a frio com emulsão modificada por polímero
- DNER-ES 391/99 - Pavimentação - tratamento superficial simples com asfalto polímero
- DNER-ES 392/99 - Pavimentação - tratamento superficial duplo com asfalto polímero
- DNER-ES 393/99 - Pavimentação - tratamento superficial triplo com asfalto polímero
- DNER-ES 394/99 - Pavimentação - macadame por penetração com asfalto polímero
- DNER-ES 395/99 - Pavimentação - Pavimentação - pintura de ligação com asfalto polímero
- DNIT-ME 128/2010 - Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos
- DNIT-ME 129/2011 - Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico
- DNER-ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cântabro
- DNER-ME 384/99 - Estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero.

Além das normas citadas acima, existem também as normas brasileiras NBR 14896 (2002) e NBR 14948 (2003) específicas para ligantes modificados com polímeros, que foram aprovadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) pela resolução nº 32 de 21/09/2010 e no Regulamento Técnico nº 04/2010, publicado no Diário Oficial da União (DOU) em 22/09/2010.

Quadro 6 Especificação para ligantes modificados por polímeros.

Tipos de Modificador	Classe	Aplicação				
		DP ^(a)	TF ^(b)	TBT ^(c)	DU ^(d)	EO ^(e)

Polímeros Elastômeros	eStireno-Butadieno (SB)	X		X	X	
	eStireno-Butadieno-eStireno (SBS)	X	X	X		
	eStireno-Butadieno-Rubber (SBR)	X		X		
Polímeros Plastômeros	Etileno-Acetato de Vinila (EVA)	X	X			
Borracha moída de Pneus	Diferentes tamanhos, tratamentos e processos	X	X	X		
Agentes Antidescolantes	Amidoaminas				X	
	Poliamidas				X	
	Cal Hidratada				X	
Hidrocarbonetos	Asfalto Natural	X	X	X	X	
Fibras	Celulose	X				
	Popipropileno	X	X	X		
	Poliéster	X		X		
	Mineral	X				
Filer Mineral	Cal Hidratada	X	X	X	X	X
Antioxidantes	Cal Hidratada				X	X
Extensores	Enxofre	X	X	X		
(a) Deformação Permanente						
(b) Trincamento por Fadiga						
(c) Trincamento em Baixas Temperaturas						
(d) Danos por Umidade						
(e) Envelhecimento Oxidativo						

Fonte: ANP (2010)

A avaliação da aplicabilidade da especificação da norma da AASHTO para aglutinantes de asfalto de alto desempenho fez parte de um estudo conduzido por Bahia et al. (2001) para ligantes de asfalto modificados, conforme mostrado no Quadro 7. O estudo é baseado em uma coleta de dados e revisão de literatura listando os materiais mais comuns usados como modificadores de asfalto nos Estados Unidos (EUA) e foi publicado no National Research Program Cooperative of Roads (NCHRP).

Quadro 7 Materiais mais utilizados como modificadores de asfalto nos EUA.

GRAU (ponto de amolecimento min. / Recuperação Elástica min.)		FLEXPAVE		
		55/75	60/85	65/90
ENSAIOS NA AMOSTRA VIRGEM	MÉTODO ABNT	LIMITE DE ESPECIFICAÇÃO		
Penetração 25 °C, 100g; 5s; dmm	NBR - 6576	45 a 70	40 a 70	40 a 70
Ponto de Amolecimento min., °C	NBR – 6560	55	60	65
Ponto de Fulgor, min.	NBR – 11341	235	235	235
Viscosidade Brookfield a 135 °C, spindle 21, 20 rpm, máx., cP	NBR – 15184	3000	3000	3000
Viscosidade Brookfield a 150 °C, spindle 21, 50 rpm, máx., cP	NBR – 15184	2000	2000	2000
Viscosidade Brookfield a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx., cP	NBR – 15184	1000	1000	1000
Ensaio de Separação de Fase, máx., °C	NBR – 15166	5	5	5
Recuperação Elástica a 25 °C, 20 cm, min., %	NBR – 15086	75	85	90
ENSAIO NO RESÍDUO DO RTFOT				
Varição de massa, máx., %	NBR – 15235	1	1	1
Varição do PA, °C máx.	NBR – 6560	-5 a +7	-5 a +7	-5 a +7
Porcentagem de Penetração Original, min.	NBR - 6576	60	60	60

Percentagem de Recuperação Elástica Original a 25 °C, min.	NBR – 15086	80	80	80
--	-------------	----	----	----

Fonte: BAHIA *ET AL.* (2001) APUD CEZARO (2008)

Os dados referem-se à catalogação da aplicação com materiais dos EUA. Dentre esses modificadores, destaca-se a importância dos polímeros, principalmente para soluções de fadiga e deformação permanente, problemas resolvidos por, ou devido ao aumento da elasticidade a reduzida susceptibilidade térmica.

A redução da sensibilidade térmica está associada ao aumento da prevenção do envelhecimento, em que a superfície da estrada, parte mais exposta à radiação, mantém as propriedades originais do material. O asfalto tem uma vida útil associada à degradação na presença de radiação ultravioleta (UV), oxigênio e mudanças de temperatura, um fenômeno conhecido como envelhecimento do aglutinante. A parte mais leve do aglutinante se transforma em asfaltenos quando é oxidado. Este aumento de massa molecular com a perda de viscoelasticidade provoca o aparecimento das primeiras fissuras e contribui para o aparecimento de fissuras por fadiga.

Uma das primeiras conclusões positivas sobre antioxidantes em aglutinantes de asfalto foi feita por Vonk et al. (1994) e recentemente puxado no Brasil por Oliveira (2015), Vonk et al. (1994) realizaram os estudos de cromatografia (GPC), observando a melhor adesividade nos ramos dos polímeros que ligam o ligante asfáltico. Oliveira (2015) utilizou a espectroscopia de infravermelho (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR) para inferir o possível atraso no envelhecimento do asfalto modificado.

Outros testes de envelhecimento foram realizados por Silva (2005), Naskar et al (2013) e Melo (2014) que utilizaram o Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) (ASTM D 287288), um simulador de envelhecimento através de uma fina camada de aglutinante exposto a altas temperaturas mostraram que os polímeros elastoméricos oferecem maior proteção ao ligante do que os ligantes modificados por plastômero ou modificados por nanofiltro.

Além dos ensaios de caracterização de agregados, os ensaios de caracterização de ligantes asfálticos são bastante conhecidos na ciência, sendo apenas citados neste capítulo e não explicados passo a passo.

A seguir, são apresentados os testes de ligantes convencionais e modificados para a investigação de diferentes teores de polímero com os padrões correspondentes.

- NBR 6293 (2015): Ligantes asfálticos - Determinação da ductilidade.

- NBR 6296 (2012):Produtos betuminosos semissólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa.
- NBR 6576 (2007):Materiais asfálticos - Determinação da penetração.
- NBR 6560 (2008): Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola.
- NBR 11341 (2014): Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.
- NBR 15086 (2006): Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro.
- NBR 14855 (2015): Ligantes asfálticos - Determinação da solubilidade em tricloroetileno.
- NBR 15184 (2004): Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional (Brookfield).

O Quadro 8 mostra os valores limites recomendados para os testes de caracterização para o ligante convencional CAP 50/70 (DNIT 095 EM, 2006) e ligantes modificados (DNIT 129 EM, 2011).

Quadro 8 Limites para a caracterização dos ligantes asfálticos.

CARACTERIZAÇÃO	DNIT 095-EM(2006)	DNIT 129-EM(2011)
Ductilidade (cm)	60	75
Pto Amolecimento (°C)	46	55
Penetração (0,1mm)	50-70	45-70
Pto Fulgor (°C)	235	235
Solub. Tricloroetileno (%)	99,5	-
Recup. Elástica (%)	-	80
135°C	274	3000
Viscos Brookf. 150°C	112	2000
177°C	57-285	1000

Fonte: DNIT 095-EM (2006) e DNIT 129-EM (2011).

3.7 RESÍDUOS POLIMÉRICOS

Entre os resíduos sólidos urbanos (RSR), destaca-se o resíduo polimérico pós-consumo - embalagens plásticas, que nas últimas décadas vem apresentando aumento de

participação na composição dos resíduos urbanos. A importância do seu estudo fundamenta-se em características importantes como a lenta degradação, comprometendo a vida útil dos aterros sanitários, por apresentarem diferentes tipos com diferentes propriedades físicas e químicas, o que dificulta a identificação e seleção desses resíduos, e também porque possuem alto potencial econômico para reutilização e reciclagem.

Os polímeros termoplásticos sintéticos, ou simplesmente plásticos, como são mais conhecidos, representam a maioria dos resíduos poliméricos presentes nos resíduos sólidos urbanos. Os resíduos poliméricos, pós-consumo, são compostos principalmente por PET (politereftalato de etileno), PEAD (polietileno de alta densidade), PEBD (polietileno de baixa densidade), PVC (policloreto de vinila), PP (polipropileno) e PS (poliestireno).

A destinação de resíduos de polímeros para finalidades distintas de aterros sanitários, como utilização em pavimentos, caracteriza-se como uma importante medida para a recuperação de resíduos de polímeros e redução de resíduos de matérias-primas viabilidade técnica do aproveitamento de resíduos irrecuperáveis de polímeros de indústrias de plásticos indústria na produção de modificadores de asfalto.

3.8 POLÍMEROS

A busca constante por novos materiais que melhorem o desempenho de pavimentos flexíveis tem levado ao desenvolvimento e utilização do asfalto modificado, que visa ampliar o leque de aplicações dos ligantes asfálticos.

Neste contexto, inclui-se a utilização de asfaltos modificados com polímeros, que conferem à mistura elevada flexibilidade, coesão e durabilidade e aumentam a resistência dos agregados ao embaciamento sob a ação de forças tangenciais geradas pelas cargas de tráfego ao longo da sua vida útil (Oda e Fernandes Júnior, 2001).

González et al. (2004) mostraram que a adição de polímeros ao CAP melhora suas propriedades viscoelásticas e confere maior estabilidade à rodovia ao comparar o asfalto puro e modificado, concluí-se que os PACs modificados com polímero reduzem a susceptibilidade térmica e a deformação permanente devido ao grande número de requisitos de carga induzida pelo tráfego e, assim, aumentam a vida útil dos pavimentos.

As propriedades físicas mais importantes do asfalto modificado, observadas por meio de seu desempenho em campo, referem-se ao aumento da coesão, adesão, elasticidade e redução da sensibilidade ao calor. Essas propriedades são refletidas principalmente no aumento da vida à fadiga, redução na

deformação e redução nas trincas térmicas. Essas melhorias diferem dependendo do tipo de polímero utilizado, sua concentração e compatibilidade com o cimento asfáltico (JAIN et al., 1992).

Como o asfalto tem comportamento reológico viscoelástico, a adição de um polímero aumenta seu componente elástico de forma que alguns testes típicos de avaliação de cimento asfáltico não são aplicados de forma adequada aos ligantes modificados, como acontece com asfalto puro, com algumas exceções.

Existem especificações empíricas e especificações superpave. As especificações para cimentos asfálticos padronizados foram adotadas pela AASHTO e pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM).

As propriedades mecânicas são influenciadas pelo peso molecular, a estrutura química, a distribuição de cristalinidade e a temperatura.

O principal objetivo da modificação de matrizes asfálticas com polímeros sintéticos é a obtenção de misturas que, comparadas ao asfalto não modificado, ofereçam maior resistência às condições de rolagem, melhor tração, maior impermeabilidade à água e menor sensibilidade às oscilações de temperatura. A adição de polímeros sintéticos tem como objetivo produzir blends com uma temperatura de amolecimento mais alta e uma temperatura de quebra a frio mais baixa. SBS (copolímero de estireno-butadieno) e RET (terpolímero de elastômero reativo) são amplamente utilizados na fabricação de asfalto modificado.

Os tipos de polímeros mais comuns usados na indústria de pisos são: copolímeros em bloco, termoplásticos e borrachas naturais ou sintéticas. Os copolímeros em bloco contêm estireno no final do bloco e butadieno no meio do bloco. Este grupo inclui: estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno- isopreno-estireno (SIS), estireno-butileno-estireno (SEBS) e acrilonitrila-butadieno- estireno (ABS). O grupo de termoplásticos inclui polietileno de baixa densidade (PEBD), bem como etileno e acetato de vinila (EVA). Homopolímeros como borracha natural (BN) formam outro grupo, ao lado de polibutadieno (PBD), poliisopreno (PI) e poli (2-cloro- 1,3-butadieno).

Quadro 9 Principais tipos de polímeros produzidos no Brasil.

Empresa	Produto
Shell, Petroflex	SBS
Politeno, Poliolefinas	EVA
Polibrasil, Polipropileno	PP
Petroflex	SBR

Brasilvil, Eletrocloro	PVC
Vulcan	Poliuret ano
Nitriflex	EPDM
Union Carbide, Polialden, Eletrocloro, Polisul	LPDE
Du pont*	RET

Fonte: LEITE (1999), * NEGRÃO (2006).

Leite et al. (2004) comentam que alguns modificadores de ácido, particularmente o ácido polifosfórico, melhoram a susceptibilidade térmica dos CAPs e têm sido usados com sucesso nos EUA. Recentemente, um polímero reativo foi desenvolvido para modificar quimicamente o asfalto, denominado terpolímero de etileno, acrilato de butila e glicidila metacrilato, vendido como Elvaloy®.

Os critérios para incorporação de polímeros no asfalto baseiam-se na investigação da compatibilidade dos dois materiais, que pode ser verificada por meio de parâmetros de solubilidade, peso molecular e técnicas como ressonância magnética nuclear.

Alguns autores (ZENKE, 1979; DONY, 1989; KRAUS, 1981) usam os parâmetros de solubilidade de Hildebrand. O valor de Malten CAP varia de 8 (cal/cm³)^{0,5} para asfaltos parafínicos a 9 (cal/cm³)^{0,5} para compostos aromáticos. Polímeros com parâmetros de solubilidade próximos a 8-9 (cal/cm³)^{0,5} seriam modificados para a produção de polímeros CAPS adequados como SBR e poliisopreno têm parâmetros de solubilidade na faixa declarada, mas o PVC com um parâmetro de solubilidade de 9,5 (cal / cm³)^{0,5} acabou sendo muito pobre para ser incorporado ao asfalto.

De acordo com BERNUCCI et al.(2006) devido à sua capacidade de se deformar sem quebrar em baixas temperaturas, eles não podem trincar, então a especificação permite que o ligante seja mais rígido, desde que um ensaio de tração direta (DDT) demonstre que é suficiente em baixas temperaturas Possui ductilidade. O DDT fornece a resistência à tração, que é medida esticando um corpo de prova em forma de borboleta em baixa temperatura (+ 6 ° C a 36 ° C).

O SHRP especifica que os ligantes são classificados em uma ampla faixa de temperatura, cobrindo todas as fases do processo de mistura, espalhamento e compactação, e relacionados às temperaturas do pavimento ao longo da vida útil da seção em que estão localizados utilizam este material. Novos testes são realizados em baixas, médias e altas temperaturas de operação.

Os ligantes são divididos em graus de temperatura máxima e mínima em que possuem determinadas propriedades, definidas como "Grau de desempenho" (PG - Grau de desempenho em inglês) e são por exemplo: PG 64 - 22, PG 70 - 22, PG 76 - 22 entre outros

As temperaturas usadas para especificar o aglutinante para uma determinada planta são formuladas, utilizados os seguintes dispositivos, que são descritos resumidamente na ordem:

- Reômetro de cisalhamento dinâmico - DSR (ASTM D 7175);
- Viscosímetro Rotacional - RV (ASTM D 4402);
- Reômetro Jet Creep - BBR (ASTM D 6648);
- Direct Draw Press - DDT (ASTM D 6723);
- Estufa Rotativa de Filme Fino - RTFOT (ASTM 2872);
- Vaso de pressão envelhecido - PAV (ASTM 6521).

3.8.1 DSR - Reômetro de cisalhamento dinâmico

O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) é usado para caracterizar o cisalhamento G^* e o ângulo de fase d , expondo uma pequena quantidade de ligante entre duas placas paralelas a tensões de cisalhamento oscilantes. Totalmente elástico, d (ângulo de fase) é zero e com materiais totalmente viscosos d é 90° e em baixas temperaturas d se aproxima de zero. A especificação do ligante usa os parâmetros $G^* / \text{sin}d$ para altas temperaturas ($> 46^\circ\text{C}$) e $G^* \text{sin}d$ para temperaturas médias (entre 7 e 34°C) para controlar a rigidez do asfalto. Ao controlar a rigidez em altas temperaturas, a especificação do aglutinante garante que o asfalto forneça a resistência ao cisalhamento geral da mistura em termos de elasticidade de alta temperatura. A especificação também garante que o ligante não contribua para fissuras por fadiga e controla sua rigidez em temperaturas médias. (Bernucci et al., 2008).

Reômetro de cisalhamento dinâmico, SHRP - (DSR), mede as propriedades físicas do ligante através do módulo de cisalhamento complexo (G^*) e o ângulo de fase (d), com uma pequena quantidade do ligante oscilando entre duas tensões de cisalhamento. placas paralelas são expostas.

O módulo complexo e o ângulo de fase são expressos na Equação 3:

$$G^* = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} \quad \delta = \omega(\Delta T) \quad (3)$$

A caracterização da rigidez estática (S) do ligante em baixas temperaturas é analisada com o Bending Beam Rheometer - BBR. Este teste mede a rigidez estática (S) e mede o logaritmo do módulo de relaxamento, calculado (m). Essas propriedades são determinadas a partir da reação à carga estática (fluência) de uma viga treliça em baixas temperaturas ($36^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$). Conhecendo a carga na viga e medindo a deflexão (deslocamento vertical) ao longo do teste, a rigidez estática pode ser determinada com base nos fundamentos da mecânica. Em climas frios os ligantes com baixa rigidez estática S e com altos valores de m não se rompem, pois dissipam as tensões geradas pela contração do ligante de forma mais eficiente quando a temperatura do pavimento cai abruptamente, minimizando a formação de trincas e rachaduras. As expressões 4 e 5 determinam o módulo de rigidez (S) e o parâmetro de relaxamento (m) em baixa temperatura:

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$m = \text{coeficiente angular a } 60s (S \times T) \quad (5)$$

3.8.2 Viscosímetro Rotacional (RTV ou Brookfield)

Caracteriza a rigidez do asfalto a 135°C , onde atua quase inteiramente como um líquido viscoso. A especificação do aglutinante requer uma viscosidade inferior a 3 Pa.s (3000 cP) a 135°C . Isso garante que o aglutinante possa ser facilmente bombeado e processado (Bernucci, et al., 2008).

3.8.3 Bending Bar Rheometer (BBR Bending Bar Rheometer)

Usado para caracterizar a rigidez do aglutinante em baixa temperatura. Ele mede a rigidez estática (S) e o logaritmo do módulo de relaxamento (m). Essas propriedades são determinadas a partir da resposta a cargas estáticas (fluência) em uma viga treliça em baixas temperaturas.

3.8.4 *Prensa de tração direta (DDT - Direct Tension Tester)*

Desta forma, a especificação permite que o ligante tenha uma rigidez superior, desde que comprovada pelo ensaio de tração direta., Até a quebra. Semelhante ao BBR, o DDT garante que a resistência à ruptura do ligante em baixa temperatura seja maximizada (Bernucci et al., 2008).

3.8.5 *RTFOT - Teste de forno de filme fino de laminação*

Este é um teste mais eficaz, pois permite a formação de camadas mais finas de ligante asfáltico.

De acordo com Whiteoak (2003), o processo RTFOT garante que todo o agente de ligação seja exposto ao calor e ao ar e o movimento contínuo garante que a película protetora do agente de ligação não se desenvolva. A experiência tem mostrado que a proporção de endurecimento do RTFOT se correlaciona muito bem com a observada em usinas gravimétricas convencionais.

3.8.6 *PAV - Vaso de Envelhecimento por Pressão*

Este ensaio tem como objetivo simular o tipo de oxidação por envelhecimento em serviço que ocorre nos ligantes asfálticos durante uma obra de pavimentação. Os resíduos dessa prática de condicionamento podem ser usados para estimar as propriedades físicas e químicas dos aglutinantes de asfalto após muitos anos de envelhecimento em serviço.

O envelhecimento dos ligantes asfálticos é um processo natural durante o armazenamento, manuseio e uso durante a operação e contribui significativamente para a deterioração do asfalto. Esse envelhecimento é responsável pela mudança em suas propriedades físicas, químicas e reológicas (TONIAL, 2001), outros fatores como luz, água e reações químicas com agregados contribuem para esse processo.

Os principais defeitos das superfícies flexíveis são: recalque dos trilhos das rodas; Rachaduras por fadiga; encolhimento térmico e perda de adesividade. A folga na pista da roda e as fissuras por fadiga estão mais relacionadas ao tráfego envolvido e à estrutura da superfície da estrada, enquanto a contração térmica e a perda de aderência estão relacionadas às propriedades dos materiais utilizados e às condições climáticas (Specht, 2004).

Um dos fatores que, influenciam o envelhecimento do ligante é a sua composição inicial (Mirza et al., 1995). No passado, por causa da medição mais fácil das propriedades físicas em comparação com as propriedades químicas, os cimentos asfálticos eram classificados de acordo com especificações baseadas em valores de consistência em uma ou mais temperaturas.

Quatro mecanismos principais são responsáveis pelo envelhecimento do ligante asfáltico:

- Oxidação - como outras substâncias orgânicas, o ligante asfáltico oxida lentamente na presença de oxigênio. a grande superfície específica dos agregados e as altas temperaturas favorecem a oxidação;
- Perdas voláteis - diretamente relacionadas à temperatura e às condições de exposição, as perdas são menores com os ligantes asfálticos puros por apresentarem baixo teor de voláteis;
- Endurecimento físico - atribuído ao rearranjo das moléculas e à cristalização das parafinas; ocorre à temperatura ambiente e é um fenômeno reversível;
- Endurecimento exsudativo - é consequência da migração de componentes oleosos que vazam do ligante asfáltico para o agregado mineral e depende da tendência de exsudação do ligante e da porosidade do agregado.

Os pesquisadores Pinto (1993); Isacson e Lu (1999); Anguas et al. (2004); Bringel (2007) concordam que leva a uma melhoria nas propriedades físicas, adicionar um modificador polimérico ao CAP, como:

- Redução da sensibilidade térmica;
- Maior coesão interna;
- Maior elasticidade e flexibilidade em baixas temperaturas;
- Melhorar o comportamento contra a fadiga;
- Maior resistência ao envelhecimento;
- Redução de deformações permanentes.

A introdução de polímeros de qualquer tipo promove uma alteração no equilíbrio coloidal do ligante asfáltico, o que tem efeitos importantes nas propriedades mecânicas, químicas e de compatibilidade do sistema.

As principais vantagens da utilização do asfalto modificado, segundo Reis e Santo (1999), são as seguintes:

Em misturas asfálticas densas:

- Maior resistência à ocorrência de deformações permanentes (marcas de roda);
- Maior resistência à fadiga;
- Reduzir a espessura da camada de revestimento; e
- Melhorar a aderência e coesão aos efeitos da água e do trânsito.

Nas camadas de drenagem:

- Melhor resistência à exposição à água e remoção de agregados pelo tráfego;
- Aumento da capacidade de drenagem superficial da rodovia, evitando profundidades de água, evitando aquaplanagem;
- Reduz o ruído, melhora o conforto do usuário e as condições de segurança;
- Maior espessura do filme asfáltico ao redor do agregado, o que reduz o envelhecimento do ligante;
- Resistência ao aumento da densidade através do tráfego, retenção da permeabilidade.

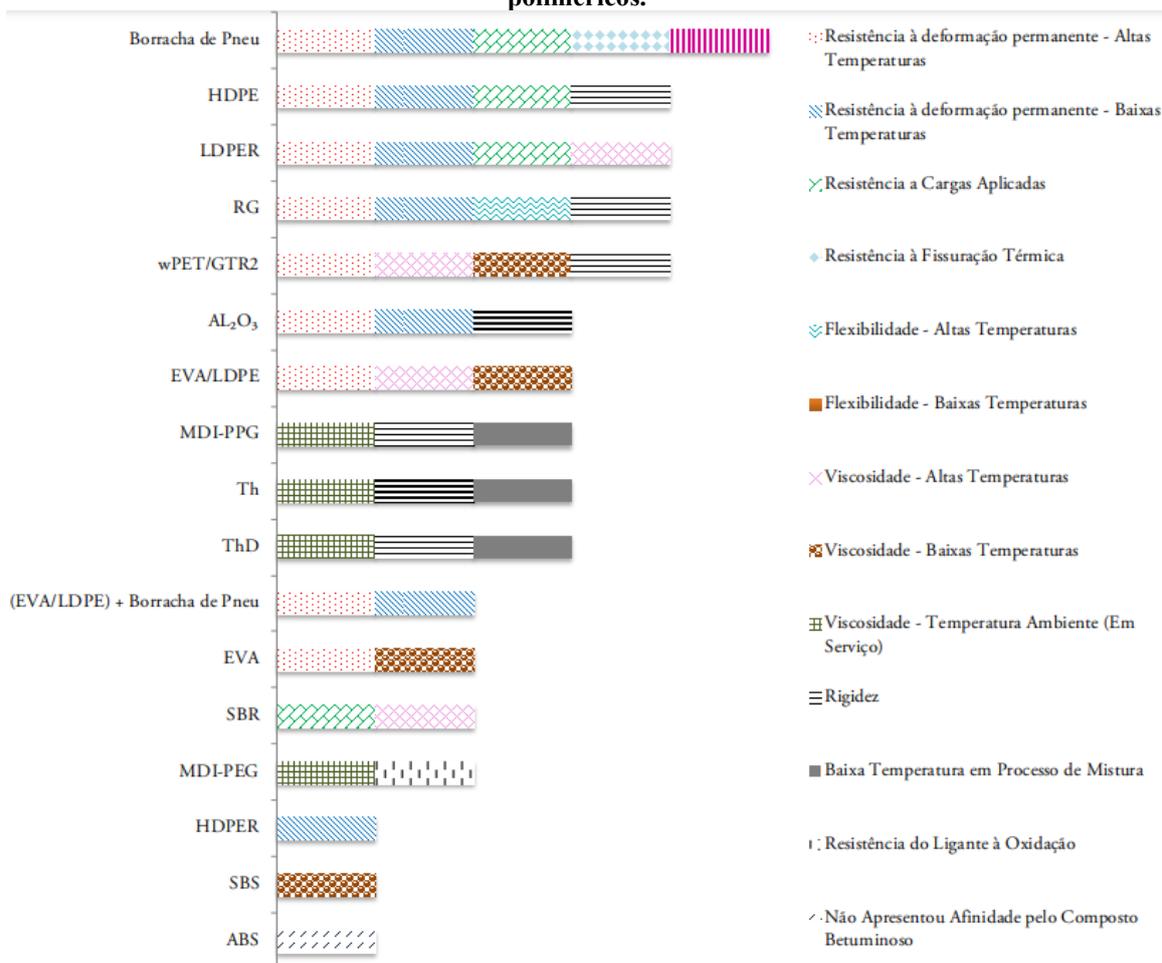
Nas camadas de absorção de tensões:

- Preservação das propriedades elásticas em uma faixa de temperatura superior ao CAP convencional;
- Minimização do reflexo de fissuras do revestimento antigo para o novo;
- Absorve tensões, o que permite ao projetista reduzir a espessura das camadas asfálticas; e
- Aumentar a aderência entre as camadas de asfalto.

O comportamento dos polímeros depende das matérias-primas (monômeros), do tipo de reação para sua produção e da tecnologia de sua produção.

- Poliadição: Borracha Estireno-Butadieno (SBR) e acetato de etileno vinil (EVA);
- Policondensação: tereftalato de polietileno (PET);
- Modificação química de outro polímero: estireno-butadieno-estireno (SBS).

Figura 2 Propriedades dos ligantes asfálticos melhoradas com a adição de resíduos modificadores poliméricos.



Fonte: GUIMARÃES e SOUZA, (2018).

Em princípio, essa mudança nas propriedades físicas e reológicas pode ser o resultado de possíveis ligações químicas ou interações entre as moléculas do ligante com o polímero modificador, resultando em melhor desempenho do que os ligantes convencionais em termos de flecha, trincas, trincas térmicas e por fadiga (SILVA, 2005).

O Quadro 10 abaixo mostra os estudos e elementos considerados para a preparação de PACs modificados com polímero.

Quadro 10 Elementos considerados para a produção de CAP's modificados.

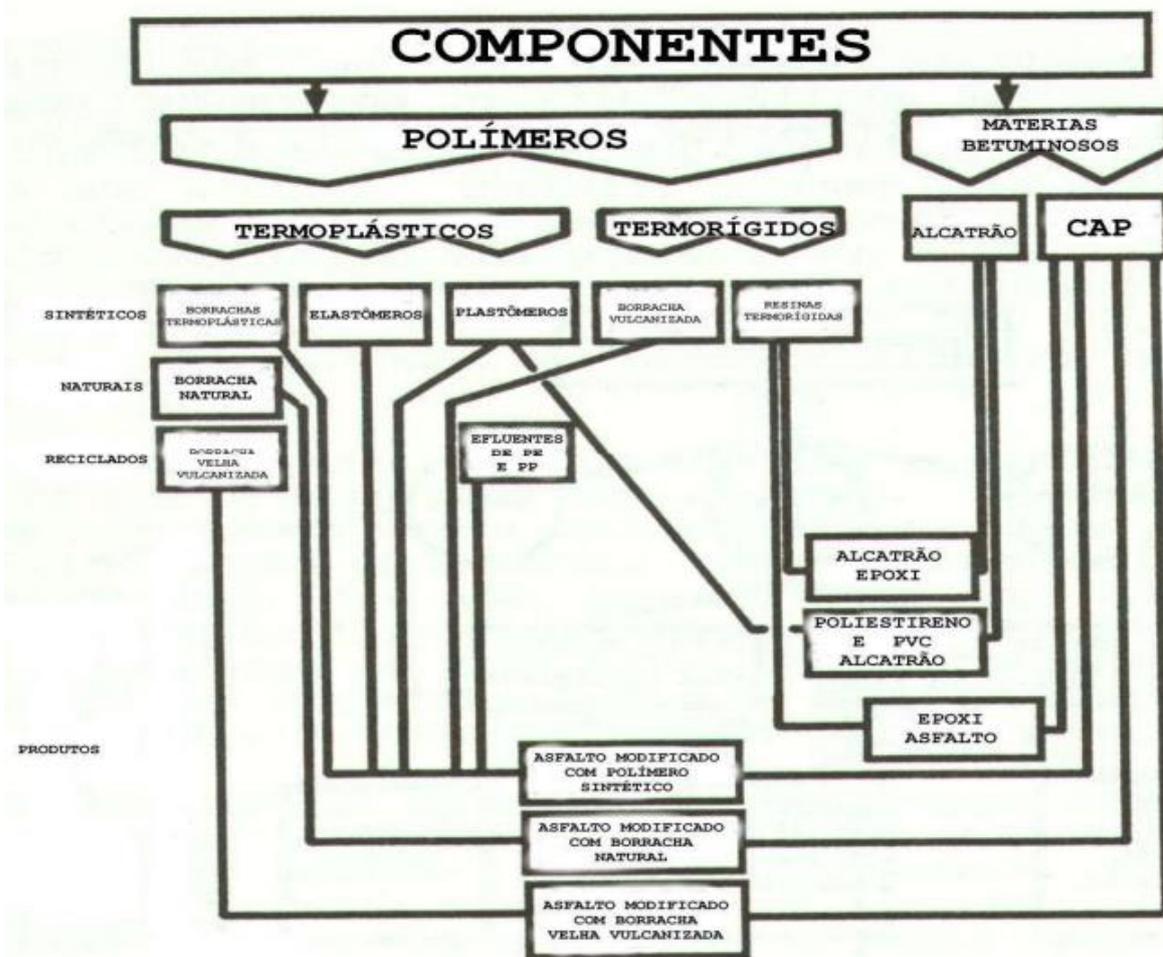
Autores	Resíduo Modificador	Tempo de mistura (minutos)	Temperatura °C	Adição do modificador em peso (%)	CAP base	Velocidade de rotação durante a mistura (rpm)
Navarro et al. (2004)	Borracha de pneu	90	180	9	60/70	1200
García – Morales et al. (2006)	EVA; EVA + LDPE; ABS; Borracha de pneu	360	180	EVA – 5 e 9 EVA/LDPE – 5 e 9 ABS – 9 Borracha de pneu – 9	60/70	1200

				EVA/LDPE + borracha de pneu – 5; 7 e 9		
Navarro et al. (2009)	EVA; EVA/LDPE; SBS; Borracha de pneu e MDI-PEG	50, 90, 120	180 e 90	EVA – 5 EVA/LDPE – 5 SBS – 3 Borracha de pneu – 9 MDI-PEG – 0.5, 1 e 1.5	60/70	1200
Cuadri et al. (2014)	ThD; Th e MDI-PPG	60	130, 180 e 90	ThD – 3 e 9 Th – 3 e 9 MDI-PPG – 4	150/200	1200
Cuadri et al. (2016)	LDPER	60	170	2, 3, 4 e 5	160/220 E 70/100	5000
Ge et al. (2016)	Borracha de pneu + RPE	20+90+30	180	Borracha de pneu – 5 e 10 RPE – 2 e 4	AH - 70	2000; 5000; 100
Karahrodi et al (2016)	PET + Borracha de pneu	15 + 45	150	3, 5 e 7	60/70	350; 3000
Yaacob et al. (2016)	SBR	60	130 á 140	1, 2, 3, 4 e 5	60/70	800 á 1000
Ahmedzade et al. (2017)	HDPE	15 + 90	170	1,3,5,7 e 9	160/220	500; 1300
Gibreil; Feng; (2017)	HDPE + Borracha de pneu	15 + 90 + 15	185	HDPE – 4, 5 e 6 Borracha de pneu – 5, 10 e 15	60/70	1200;4000;200

Fonte: GUIMARÃES e SOUZA (2018).

De acordo com DNER (1998), ou seja, tendo em vista os inúmeros tipos de polímeros e a fim de alcançar um melhor desempenho com ligantes de asfalto, uma série de estudos são listados, incluindo o Alcatrão. Esses resultados satisfatórios foram encontrados e alguns deles tornaram-se produtos comerciais. A Figura 3 mostra as várias possibilidades de combinação de polímeros e materiais betuminosos descritas por ZENKE (1979).

Figura 3 Diferentes maneiras de se introduzir polímero no asfalto por Zenke.



Fonte: LEITE (1999).

Whiteoak (2003) divide o ligante asfáltico em dois grupos químicos: Asfaltenos (insolúvel em heptano) e Malteno (solúvel em heptano). Os maltenos são divididos em saturados, aromáticos e resinosos. Micelas de asfalto de alto peso molecular, dispersas ou dissolvidas em meio oleoso de baixo peso molecular (Malteno).

3.9 RET

O polímero RET, sigla em inglês de Reactive Elastomeric Terpolymer, é um modificador de asfalto recentemente utilizado no Brasil, desenvolvido exclusivamente para uso em beneficiamento de asfalto e possui as seguintes propriedades (Negrão et al, 2007):

- A adição de o asfalto é simples e não requer equipamentos sofisticados ou técnicos altamente especializados.

- O ligante é incorporado em tanques com pequenas modificações em relação aos tanques de armazenamento asfáltico e ocorre no canteiro de obras;
- O asfalto modificado com este polímero é estável e não requer agitação constante durante o armazenamento;
- Propriedades viscoelásticas semelhantes a outros polímeros usados na modificação do asfalto.

3.10 PET

Descoberto na Grã-Bretanha por volta de 1933 e colocado no mercado em meados de 1939, o polietileno é um dos plásticos reciclados mais vendidos da atualidade (CANDIN, 2007).

O polietileno consiste em um polímero flexível parcialmente cristalino cujas propriedades são fortemente influenciadas pela proporção relativa das fases amorfa e cristalina (DOAK, 1986; RESTREPOFLÓREZ, et al., 2014). Grande versatilidade na variedade de transformação e aplicação.

Segundo Coutinho (2003), o polietileno é dividido em cinco grupos:

- Polietileno de baixa densidade (PEBD);
- polietileno de alta densidade (HDPE);
- Polietileno linear de baixa densidade (LDPE);
- Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM);
- Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD).

O polietileno pode ser aplicado em diversos materiais, tais como: filmes para embalagens industriais e agrícolas, filmes para embalagens de alimentos, revestimento de fios e cabos, tubos e mangueiras, baldes e baldes, tampas para garrafas e latas, recipientes para detergentes, embalagens de frutas Redes, Fitas decorativas, sacos de lixo e sacolas de compras, fraldas descartáveis, lonas em geral, brinquedos, plástico bolha, artigos flexíveis e peças polivalentes, tubos, bombas, válvulas, filtros, tampas de caixas de sucção, réguas e perfis (COUTINHO, 2003) ainda pode ser usado para modificar CAPs para oferecer uma maior resistência à deformação permanente em altas temperaturas (GIBREIL; FENG, 2017).

Em o efeito do teor de polímero RET no desempenho da mistura de asfalto na restauração de estradas, o teor de polímero de 1,0 foi considerado o melhor resultado geral

e superou todos os níveis na redução da deflexão; na vida em fadiga teve um desempenho melhor do que os níveis de 0,5%, com o nível de 1,5% sendo substituído apenas por diferenças de tensão maiores que 0,95 MPa. O único conteúdo com vida em fadiga maior que 1,0% em todo o espectro analisado é 2,0%, mas tende a ser menor do que uma diferença de tensão maior que 1,6 MPa. Teores de polímeros de mais de 1,0% não levam necessariamente a aumentos no desempenho.

3.11 EVA

O copolímero de etileno-acetato de vinila (EVA) é conhecido como termoplástico ou plastômero e vazará irreversivelmente no caso de tensão de cisalhamento. Devido à sua natureza alifática e à existência de sequências etilênicas de alto peso molecular nas frações saturadas do asfalto, o EVA é solubilizado e melhora as propriedades mecânicas do ligante por meio da modificação da reologia do material (CONSTANTINO, 1998).

A análise de misturas asfálticas modificadas com três teores de polímero EVA (5%, 7,5 e 10%) em relação às misturas asfálticas de referência utilizando o CAP 50/70 convencional é realizada a partir dos testes da metodologia de formulação francesa para PCG. Ensaio de deformação permanente, módulo complexo e fadiga, além dos ensaios de caracterização de agregados, caracterização do ligante e ensaio de Lottman modificado. A susceptibilidade à temperatura e a frequência de aplicação, bem como a viscosidade do material, são variáveis que alteram o comportamento da massa asfáltica e conseqüentemente fornecem parâmetros viscoelásticos

3.12 BORRACHA DE PNEU

O problema dos pneus usados gerou a necessidade de promulgar legislação específica, a resolução CONAMA nº 258/1999, que estabeleceu metas e procedimentos para a gestão ambientalmente correta desses pneus inservíveis, complementada pela instrução normativa nº 08/02 do IBAMA, com alguns dispositivos modificados pela Resolução CONAMA nº 301/02.

Muitos países aprovaram leis para instruir seus departamentos de transporte a investigar a possibilidade de usar materiais recicláveis em trabalhos de pavimentação. O governo dos Estados Unidos, em particular, encorajou a incorporação de borracha modificada (vulcanizada) em misturas de asfalto. A seção 1038 da Lei de Eficiência do Transporte de Superfície Intermodal de 1991 (Lei de Eficiência do Transporte Intermodal

de Surfasse - ISTEIA), que trata do uso de material reciclado em pavimentos rodoviários com o objetivo de proteger o meio ambiente, especifica o uso de uma quantidade mínima de borracha reciclada em misturas asfálticas. A lei garante que os estados que usam pneus de borracha em compostos asfálticos gozem de incentivos fiscais e penalidades para os estados que não cumpram as regras. A reciclagem de pneus de estradas já é uma realidade em alguns estados, como Flórida, Califórnia e Arizona (Carlson e Zhu, 1999).

Para se ter uma ideia da quantidade de pneus utilizados para a instalação, os dados a seguir mostram as dimensões dos valores. Na restauração de 100 km de estrada, considerar 3,6 m por pista e reforço com 5 cm de CBUQ com ligante modificado com borracha (massa específica aparente da massa asfáltica igual a 22 kN / m³ e quantidade de ligante 5% com 20 CRM), 792 kg de farelo todos os 100 m ou 79,2 t deste material seriam consumidos por 100 km. Assumindo 7,5 kg por 2 pneus (dos quais 85% de borracha) 124 pneus e 124 m a cada 100 m nos 100 km 124.235 pneus velhos seriam usados.

As primeiras tentativas de usar sucata de borracha de pneu no asfalto datam da década de 1950, mas o desempenho do material resultante não incentivou os pesquisadores a seguir em frente. Não foi até 1960 quando o engenheiro de materiais Charles H. McDonald (funcionário dos EUA) O Bureau of Public Roads, agora FHWA dirigiu um trailer por todo o país para inspecionar as estradas, usando uma mistura de pó de pneu e asfalto para selar as rachaduras (Carlson e Zhu, 1999).

O asfalto borracho é considerado uma das melhores alternativas à sucata de pneus e está em ascensão no cenário mundial desde 1963, quando Charles H. McDonald, considerado o pai do sistema de asfalto borracha nos Estados Unidos, veio a Sahuaro em busca do petróleo indústria. funcionou, iniciou-se uma investigação com o objetivo de desenvolver um material "altamente elástico" para a manutenção da superfície asfáltica com incorporação de borracha moída.

Suas pesquisas levaram ao desenvolvimento de um produto feito de aglutinante asfáltico e borracha para pneus, moído a 25 ° C, misturado a uma temperatura de 190 ° C por 20 minutos, para uso em reparos rodoviários. Também tem sido utilizado como selante de trincas e como camada de reforço (por meio do processo denominado Tension Absorbing Membrane Interlayer, SAMI) (HICKS, 2002).

a primeira aplicação foi feita em uma rua da cidade de Phoenix, e foi constatado que a superfície não apresentava fissura devido à reflexão após seis anos. trabalho na

cidade de Phoenix com a Atlos Rubber Inc., onde seções foram construídas no Aeroporto Internacional Phoenix Sky Harbor em 1966.

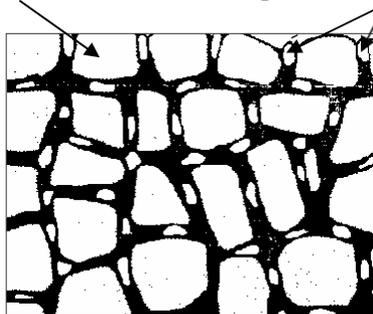
As propriedades do material eram tão favoráveis que, em 1968, o Departamento de Transporte do Arizona iniciou uma série de estudos usando borracha asfáltica principalmente como selante de rachaduras. Em 1975 foi incorporado ao concreto betuminoso trabalhado a quente e obteve excelentes resultados. Nos anos que se seguiram, outros estados como Califórnia e Texas começaram a usar selantes na década de 1970 e CBUQ na década de 1980. A adição de borracha a pneus usados em misturas de asfalto também foi vista como uma excelente alternativa para resolver os problemas ambientais a serem reduzidos por meio de disposição de resíduos sólidos. No início da década de 1990, cerca de 16.000 quilômetros de estradas haviam sido construídos com asfalto borracha. Em 1991, foi formulada a Lei da Eficiência do Transporte Terrestre Intermodal (Artigo 1038 da Lei 102240 sobre a Eficiência Pública do Transporte Terrestre Intermodal). Transporte e proteção ambiental para desenvolver estudos sobre o uso de borracha de pneus usados em materiais de pavimentação (ODA e FERNANDES JUNIOR, 2001).

Paralelamente às descobertas do McDonald's no Arizona, um processo chamado Rubit foi desenvolvido na Suécia. Esse processo foi trazido para os EUA pelas empresas Pavetech e Bellevue, sediadas em Washington, onde foi denominado PlusRide. Tecnologias para aplicação da borracha no ligante (processo úmido) e diretamente na massa asfáltica (processo seco) têm sido desenvolvidas.

O processo úmido cria a borracha asfáltica aglutinante, definida de acordo com ASTM D 611497 como "uma mistura de cimento asfáltico, borracha de pneu reciclada e certos aditivos, cujo teor de borracha deve ser de pelo menos 15% em massa. Toda a mistura reage com o aglutinante de asfalto aquecido para fazer com que as partículas de borracha inchem para causar ".

O processo de aproveitamento de pó reciclado de pneu em concreto asfáltico seco é caracterizado pelo fato de o resíduo ser utilizado como aditivo ao agregado, no qual se adicionam pedaços sólidos de borracha do processo para substituir no máximo 5% do agregado. Existe alguma ambigüidade na literatura quanto à nomenclatura do produto final do processo de secagem, alguns autores referem-se a ele como agregado de borracha (Heitzman 1992) e outros como mistura asfáltica a quente modificada com borracha (Epps, 1994).

Figura 4 Representação de misturas com partículas de borracha sólida.



Fonte: TAKALLOU E HICKS (1988)

3.13 SBS (STYRENE BUTADIENE STYRENE)

Um aglutinante de asfalto é considerado modificado se sua estrutura química ou física e propriedades mecânicas forem alteradas. Neste trabalho, destaca-se a modificação por polímeros elásticos, também chamados de elastômeros. Os principais elastômeros usados como modificadores de asfalto incluem copolímeros tribloco de SBS (Styrene Butadiene Styrene) e borracha de pneu triturada (WORLD ROAD, 1998).

Elastômeros, neste caso especial os copolímeros de estireno-butadieno- estireno (Styrene Butadiene Styrene), vêm de sínteses orgânicas. Atualmente a forma mais comum de modificação asfáltica para construção de rodovias no Brasil é a incorporação do polímero SBS ao asfalto: CAP 50/70 Petroleum Asphalt Cement e com realização do ensaio de penetração entre 50 - 70 mm / 10 (DNIT EM 095, 2006).

No Brasil a composição mais comum de pedras de pavimentação é: CAP 95%, Óleo 1,5% e SBS 3,5%. Esta composição está de acordo com a especificação (60/85) segundo ou grau (ponto de amolecimento e recuperação elástica), propriedades do cimento asfáltico, modificadas pela SBS, especificação atualmente do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, antigo DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

A comparação das vantagens e desvantagens do uso de asfalto modificado com SBS não deve se limitar ao produto em si, mas ao contexto, ao clima, ao tipo de construção da estrada, ao tipo de tráfego, à drenagem, além dos custos associados, a disponibilidade de tampas compatíveis. e equipamentos adequados para a preparação.

De acordo com REIS (1999), o polímero incha quando o polímero é adicionado ao asfalto nos maltes CAP. O inchaço aumenta a viscosidade e caracteriza o ligante, tornando-o mais elástico e resistente ao alongamento. até uma certa temperatura que o polímero não se degrada.

A observação da estrutura do asfalto modificado com SBS ao microscópio de reflexão de fluorescência revelou os seguintes fatos:

- Teor abaixo de 5% SBS mostra a fase asfáltica contínua com polímero disperso.
- Teor de 5% de SBS observa duas fases contínuas entrelaçadas.
- Um teor de mais de 5% SBS representa uma fase contínua de polímero com uma fase dispersa rica em asfaltenos.

Existem vários tipos de modificadores de aglutinante de asfalto, como plastômeros, elastômeros, aditivos antiderrapantes e compostos ácidos. Elastômeros como o estireno-butadieno-estireno (SBS) reduzem as rachaduras por fadiga e as flutuações térmicas no asfalto. O asfalteno e o ácido polifosfórico são catalisadores para essa reação. Além disso, o ácido polifosfórico aumenta a rigidez do aglutinante em altas temperaturas. A cal hidratada reduz a sensibilidade à umidade do asfalto e é antiderrapante, o que melhora a adesão (Sengul, et al., 2012).

A adição de SBS ao ligante convencional aumentou o módulo complexo do ligante convencional antes do envelhecimento, resultando em maior resistência ao rastreamento.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo descrevemos a classificação e o ciclo da pesquisa, assim como os procedimentos da revisão sistemática.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Essa pesquisa caracteriza-se por ser uma revisão sistemática da literatura é um estudo que tem como objetivo reunir materiais semelhantes de vários autores. Ela é considerada uma pesquisa secundária, porque utiliza estudos primários para fazer a análise.

A ênfase principal está na integração e generalização do resultado da pesquisa, conhecendo a pesquisa anterior em torno do ponto central das questões de pesquisa e integrando todo o conhecimento prévio já registrado na literatura.

Do ponto de vista prospectivo, seguiu-se uma linha neutra em relação ao assunto, evitando revelar um viés pré-existente por parte do pesquisador, a pesquisa se limitará apenas a pesquisas publicadas.

A organização será metodológica, seguindo a ordem das questões de pesquisa para apresentação dos resultados.

O público-alvo relevante são os profissionais de pavimentação asfáltica interessados nas práticas de incorporação de polímeros ao asfalto.

4.2 FONTE DE DADOS E ESTRATÉGIA DE BUSCA

Foram definidas duas fontes para realizar a busca levando em consideração: (a) a disponibilidade de consulta dos estudos primários na web; (b) presença de motores de busca usando palavras-chave; e finalmente (c) livre acesso aos documentos. Bibliotecas digitais selecionadas estão listadas abaixo:

- BDTD – Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações;
- CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

4.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

A inclusão de um artigo foi determinada pela sua relevância para as questões de pesquisa, por meio da análise do título do estudo, resumo e conclusão na terceira fase de extração de dados. Foram definidos:

[i1] estudos que tratam ou tratam secundariamente da incorporação de polímeros em asfalto; e

[i2] estudos principalmente ou secundários sobre os critérios de incorporação de polímeros ao asfalto; e

[i3] estudos mostrando principalmente ou secundariamente estruturas e características de quadrados de asfalto modificados por polímero.

Semelhante aos critérios de inclusão, foi elaborada uma lista de critérios de exclusão, incluindo a partir da análise do título, resumo e conclusão. Os estudos que se enquadram em alguns dos seguintes foram excluídos: questões de pesquisa;

[e2] repetir estudos: se um determinado estudo estiver disponível em mais de uma fonte de pesquisa, a primeira pesquisa será considerada; e

[e3] estudos duplicados: se dois estudos possuírem estudos semelhantes, apenas o mais recente e / ou o mais completo serão incluídos, a menos que tenham informações adicionais;

[e4] não serão aceitos estudos com texto, conteúdo e resultados incompletos, ou estudos com resultados incompletos;

4.4 ANÁLISE DOS DADOS

Após a extração de dados, todos os 23 artigos foram lidos na íntegra e seus dados extraídos. Para facilitar a análise dos dados, a coleta de dados foi realizada com ênfase nas questões de pesquisa desta revisão.

Após a extração e análise dos dados, foi realizada uma síntese mais detalhada dos dados a fim de esclarecer os resultados gerados pela pesquisa. A síntese diz respeito ao asfalto modificado com polímero, seus tipos, características e vantagens. Realizada para cada questão de pesquisa.

O processo de análise foi realizado marcando os textos de obras que fornecem informações relevantes para responder às questões de pesquisa, cada texto foi associado a uma categoria ou assunto que o próprio texto apresenta.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo fornece uma visão geral dos estudos primários e detalha os resultados obtidos na extração dos dados.

5.1 VISAO GERAL DOS ESTUDOS

O asfalto é um dos materiais de construção mais antigos usados pelo homem (THE ASPHALT INSTITUTE, 1947): Escavações arqueológica de 3200-540 a.C. já demonstraram o uso extensivo do asfalto na Mesopotâmia e no Vale do Indus, por exemplo, cimento para alvenaria e impermeabilizante para banheiros e tanques d'água. A primeira pavimentação asfáltica conhecida data de 1876 e foi feita em Washington D.C.

Segundo LUCENA (2001), o uso do asfalto nas mais diversas aplicações é antigo. É usado pelo homem de várias maneiras, desde a Colúmbia Britânica, onde existem mais de 100 aplicações que vão desde a agricultura à indústria, tais como:

- Utilizado como ligante em alvenaria e obras rodoviárias, mesmo rústicas (Mesopotâmia);
- Usado como agente de impregnação na Arca de Noé (citado na Bíblia);
- Usado em obras de mumificação (Antigo Egito).

O uso na pavimentação é um dos mais importantes de todos os listados acima. Para pavimentação pioneira, o asfalto natural de depósitos foi usado, na França em 1802, nos Estados Unidos em 1938 e na Inglaterra em 1869. Somente em 1909 foi utilizado o asfalto derivado do petróleo. O uso intensivo deste tipo de asfalto deve-se à sua flexibilidade controlada, aglutinação e forte ligação de agregados e, como impermeabilizante, boa resistência a ácidos, bases e sais.

A utilização do asfalto obtido do petróleo bruto, que por suas propriedades é a principal fonte de abastecimento hoje, teve início em 1909. No Brasil a Companhia Ipiranga Asfaltos S.A. iniciou o refino do petróleo em 1944.

Asfalto, matéria aglutinante de cor escura, é feito de petróleo, sendo o betume o elemento predominante (99,5%). O betume, frequentemente usado como sinônimo de asfalto, é um ligante escuro que consiste principalmente de hidrocarbonetos de alto peso molecular e é completamente solúvel em dissulfeto de carbono (ODA, 2000).

A mistura asfáltica usada na construção de estradas geralmente consiste em três componentes principais: o agregado (areia, pedra, cascalho, escória); Filler (materiais não plásticos finamente divididos como: cimento, cal, calcário) e cimento asfáltico, obtido do petróleo, como aglutinante de agregados minerais, conhecido como CAP.

Responsável pela matriz de tráfego de carga 61% e predominantemente no tráfego de passageiros, o tráfego rodoviário é um dos principais motores do crescimento econômico brasileiro (CNT, 2018). Devido aos altos custos de manutenção, encontram-se em um estado muito precário, o que gera incertezas e prejuízos econômicos.

O modal rodoviário é de grande importância para o Brasil, pois promove a integração com outros modais de transporte e contribui de forma estratégica para o país. Uma mistura de agregados minerais de diferentes tamanhos e origens mineralógicas é utilizada como revestimento na maioria das rodovias brasileiras. Com ligantes asfálticos que garantem de forma adequada o desempenho atendendo aos requisitos de estanqueidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência ao deslizamento, resistência à fadiga e ainda oferecem aos usuários condições confortáveis, econômicas e de rolagem.

A principal causa da atual degradação da malha rodoviária brasileira é, sem dúvida, a redução drástica do investimento público na manutenção da rede. Estradas nacionais sem estações de pesagem de veículos (Cortizo et al., 2004).

O uso de CAPS modificado é necessário para que as rodovias possam suportar as demandas crescentes de tráfego e eventuais danos. Diversos estudos têm demonstrado que a incorporação de polímeros ao asfalto tem melhorado as propriedades físicas, químicas e mecânicas. Propriedades desses materiais. Os polímeros mais bem estudados incluem: SBS (copolímero de estireno-butadieno), polietileno, SBR (borracha de estireno-butadieno) e EVA (copolímero de etileno-acetato de vinila). Além disso, os materiais poliméricos descartados pela indústria, como borracha para pneus e, possivelmente, o aproveitamento de resíduos (EVA) da indústria calçadista, são obtidos a partir do corte mecânico de solados ou palmilhas. Estudos indicam que a incorporação destes resíduos ao cimento asfáltico utilizado na construção de estradas melhora o desempenho do asfalto ao mesmo tempo que resolve um problema ambiental problemático, nomeadamente a acumulação de resíduos gerados pela indústria.

No Brasil, o asfalto modificado com polímero começou a ser utilizado na década de 1950 com o Departamento Nacional de Estradas e Rodovias - DNER cobrindo um trecho de 300 metros da Rua Leopoldo Bulhões no Rio de Janeiro - RJ, com asfalto

modificado, Butadieno-Estireno-Polímero (SBS). A empresa Ipiranga Asfaltos trabalha com essa tecnologia há cerca de 15 anos e comercializa esse tipo de produto desde 1997.

Segundo REIS (1999), a Shell foi a primeira a fabricar polímeros SBS no Brasil. Em meados de 2001 a Petroflex também iniciou a comercialização do polímero e, junto com a Kraton, disponibilizou essa matéria-prima independente das necessidades de importação.

Os asfaltos modificados com polímero são obtidos pela incorporação do polímero ao cimento asfáltico em uma unidade adequada que pode ou não envolver uma reação química.

Numerosos estudos confirmaram os benefícios da adição de materiais poliméricos aos aglutinantes de asfalto. As propriedades esperadas com a adição de polímeros são a redução da susceptibilidade térmica e o aumento da ductilidade, a estabilidade em altas temperaturas e a redução do risco de quebra em baixas temperaturas. Também contribuem para maior resistência às intempéries e melhor ligação / adesão de agregados. Vários estudos foram publicados na literatura internacional nos últimos anos, incluindo Bonemazzi et al. (1996) Jacobs et al. (1996) e Shin et al. (1996). No Brasil, os estudos de Ceratti et al. (1996), DNER (1998), Gonçalves et al. (2000), Leite (1999), Silva (2000) e Silva et al. (2002) se destacam.

Algumas técnicas de modificação de esqueleto mineral (Bailey e Faixa de Agregados Dominantes) e modificadores usuais em ligantes asfálticos têm sido usados no Brasil para melhorar as propriedades do concreto asfáltico, principalmente em relação à fissuração por fadiga e pega permanente.

Um novo tipo de ensaio para prever a vida à fadiga em misturas asfálticas foi recentemente desenvolvido pelo professor Y. Richard Kim, da North Carolina State University, nos Estados Unidos, que considera propriedades fundamentais para a efetiva caracterização do comportamento de misturas asfálticas.

Um dos principais problemas que impactam o meio ambiente são os chamados resíduos sólidos, que, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT (2004), ocorrem nos estados sólido e semissólido e são oriundos de atividades industriais e domésticas, hospital, comercial, agrícola -, origem dos serviços e rejeitos. Nesse contexto, é importante destacar os pneus inúteis que, além de um passivo ambiental, abandonados ou descartados de maneira inadequada, causam graves problemas ao meio ambiente e à saúde humana, por serem reservatórios de água da chuva e propagação de doenças. De acordo com a Associação Nacional das Empresas de Reciclagem de Pneus e

Artefatos de Borracha - AREBOP (2010), pneu inservível é qualquer pneu que não seja adequado para o processo de reforma que possibilita uma condição de reformado.

De acordo com Holleran e Reed (2000) e Lopresti et al. (2012) devido ao fato da produção de borracha para pneus com mistura de diferentes componentes como borracha de estireno-butadieno de alto peso molecular, borracha natural, borracha sintética, negro de fumo e as propriedades dos ligantes asfálticos por meio de sua incorporação.

Os compostos de asfalto e borracha são normalmente feitos de resíduos ou resíduos de borracha e usando uma variedade de técnicas, incluindo os processos secos e úmidos. As últimas normas para definição de materiais poliméricos (EM) são o DNIT 128 / 2010-EM e o DNIT 129 / 2011-EM que se referem a emulsões e cimentos asfálticos.

Ambos se referem apenas a polímeros elastoméricos com um déficit nas especificações plastômero-polímero. Especificações de serviço (ES), procedimentos (PRO), instruções de teste (IE) e métodos de teste também devem ser atualizados (ME), que seguem os regulamentos de especificação de material (EM). A proposta de estudos de misturas asfálticas modificadas com polímeros, como é o caso deste trabalho, pode ajudar a abrir essas discussões.

O Quadro 11 montras os resultados obtidos após o uso de ligantes asfálticos ao CAP.

Quadro 11 Resultados obtidos da adesão de polímeros ao asfalto.

Polímero	Resultados da aplicação
SBS	A incorporação de 4% polímero ao asfalto resultou na melhoria de suas propriedades, principalmente a resistência ao envelhecimento, aumento no ponto de amolecimento e ganho de recuperação elástica.
PET	Resultou em uma preservação das propriedades elásticas em uma faixa de temperatura superior ao CAP convencional.
RET	O polímero apresentar facilidade de manuseio na incorporação ao ligante betuminoso, resultando em um aumento da vida de fadiga e na redução da deflexão do pavimento.
Borracha de pneu	A adição de 12 a 18% de borracha ao ligante, produz misturas com maior resistência à fadiga e a deformações permanentes e maior durabilidade. A incorporação de borracha, melhora as características de resistência à fadiga e ao trincamento térmico, ocasionada por variações de temperatura e menor sensibilidade.

EVA	Os resultados indicaram maior estabilidade em atmosfera oxidativa do que em atmosfera inerte. Os CAPS modificados mostraram-se mais resistentes à trincas térmicas, também se tornaram mais resistentes à decomposição oxidativa. A viscosidade do ligante modificado por adição do polímero foi aumentada em relação ao ligante puro. Diferentemente do CAP convencional, o CAP modificado por EVAR apresentou comportamento não Newtoniano. Os ensaios empíricos, mostraram que os CAPS modificados com EVAR, tiveram uma melhoria nas suas propriedades físicas, em relação aos CAPS não modificados.
------------	--

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Cada uma das modificações apresentadas neste trabalho tem como objetivo final o aprimoramento total e simultâneo das características da massa asfáltica ideal indicada no Quadro 12. Além de atender a esses requisitos, deve atender aos requisitos mínimos de estabilidade de armazenamento, viscosidade em alta temperatura compatível com outros processos, ser usado com equipamentos tradicionais de construção de estradas e tudo a um custo razoável.

Quadro 12 Características da mistura de asfalto ideal.

CARACTERÍSTICAS	
1	Baixa rigidez ou viscosidade em altas temperaturas, normal para manuseio da planta e colocação no local.
2	Alta rigidez em altas temperaturas de serviço para reduzir o acasalamento.
3	Baixa rigidez e boas características elásticas em baixas temperaturas de serviço para reduzir o risco de rachaduras devido a mudanças de temperatura.
4	Boas características de aderência na presença de umidade, de forma a reduzir o desgaste abrasivo.

Fonte: Z. ZHANG (2010).

De acordo com os resultados apresentados durante a preparação do documento, as modificações feitas na mistura com polímeros do tipo plastômero teriam o efeito de enrijecer a mistura, o que satisfaria a segunda diretriz de mistura ideal. Polímeros do tipo plastômero podem ser incorporados em áreas com temperaturas médias anuais acima de 24 ° C, com algumas limitações em baixas temperaturas do plastômero, com base nas

investigações apresentadas neste artigo. Ou seja, ao incorporar polímeros elastoméricos individualmente no asfalto, permite baixa rigidez e boas características elásticas em baixas temperaturas de serviço, mudanças de temperatura e a terceira característica é satisfeita. Os polímeros, que são incorporados individualmente ao asfalto, possuem limitações de temperatura significativas para atender às características ideais das misturas asfálticas, essas limitações de temperatura são maiores para a modificação de alguns polímeros.

Modificações no asfalto convencional a partir de polímeros reciclados ou virgens têm influência decisiva nas características do asfalto obtido. Entretanto, há uma limitação das faixas de temperatura em que o asfalto funciona, estradas em áreas tropicais, como no caso do Brasil, onde existem deltas de altas temperaturas, que afetam as características do asfalto, levando à diminuição da durabilidade das corridas de rua.

As diferenças de reologia de polímeros e asfaltos convencionais são problemas que desempenham um papel importante na modificação dos asfaltos, pois, por terem a capacidade de se alterar elasticamente e plasticamente, variando as propriedades viscoelásticas nas faixas de temperatura, também podem gerar desvantagens de incompatibilidade.

A Confederação Nacional de Transportes - CNT realiza anualmente um levantamento para avaliar o estado da malha rodoviária nacional. Em 2007, foram fiscalizados 87.592 km, sendo 58.812 federais e 28.780 estaduais, sendo 76.756 km da administração pública e 10.836 km da administração da concessão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo procuramos identificar e discutir algumas considerações finais sobre este trabalho, citando algumas possíveis limitações, influências e ameaças. Antes de finalizar, exploramos trabalhos futuros que podem ser realizados como continuação desta revisão.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Com base nas observações feitas durante este trabalho, sugere-se:

- Desenvolvimento de um polímero específico a um preço competitivo, para uso rodoviário por produtores de polímeros no mercado brasileiro.
- Construção e monitoramento de seções experimentais com asfaltos modificados com polímero.
- Desenvolvimento da modificação de asfaltos com polímeros reciclados.
- Caracterizar e avaliar a reologia ligada ao dano por fadiga em ligantes betuminosos em misturas para verificar as correlações entre o desempenho do ligante e o desempenho da mistura.
- Realizar estudos sobre a influência da cal hidratada na atenuação do envelhecimento de ligantes betuminosos em misturas de asfalto com diferentes tipos de agregados e ligantes.

6.2 CONCLUSÃO

Os pavimentos asfálticos brasileiros veem apresentando desempenho insatisfatório devido a alguns fatores como o aumento do tráfego pesado, o aumento das cargas e o aumento da pressão de ar dos pneus e a obsolescência da metodologia de projeto, os erros permanentes de deformação nos rastros, e trincas por fadiga (além de outros defeitos não estruturais). Por isso, a pesquisa de novas tecnologias de revestimento asfáltico, tanto dos componentes individuais - ligantes e agregados - quanto da mistura, é de extrema importância para atender às crescentes demandas de durabilidade em função da escassez de recursos em setor rodoviário, bem como prever o desempenho antes de aplicá-lo para reduzir os custos de renovação.

Esta pesquisa teve como foco a utilização de resíduos de polímeros como aditivo em misturas asfálticas. A revisão da literatura apontou para a importância do assunto em nível global. A pesquisa sobre o uso de polímeros como material para pavimentação está presente nos cinco continentes. O asfalto está ligado à melhoria das propriedades mecânicas e funcionais dos materiais para asfalto.

O uso de asfalto modificado é lucrativo. Os ligantes modificados têm custos iniciais mais elevados, tornando seu uso não recomendado em certas circunstâncias. A superfície se agrega, na face de contato entre o pneu e a estrada, e com isso a camada de asfalto permanece mais longa em condições de reduzida aderência entre o pneu e a estrada.

As vantagens decorrentes da utilização de ligantes modificados são a possibilidade de possuir uma película ligante espessa que garante durabilidade ao longo do tempo, bem como uma alta capacidade de retenção de partículas em todas as condições. O alto teor de ligante produz corridas durante a fase de construção, bem como os agregados não se soltam devido à fragilidade da mistura.

Misturas drenantes com ligantes modificados são mais resistentes à ação da água do que aquelas com ligantes convencionais, porém a variação relativa em suas propriedades devido ao efeito da água é da mesma ordem ou até mesmo maior do que as misturas com ligantes convencionais, porém, tem uma capacidade igual ou maior de se recuperar de danos.

Vantagens:

- Maior resistência ao fendilhamento;
- Melhor resistência ao envelhecimento e oxidação;
- Melhoria da resistência à fadiga e propagação de fendas;
- Maior resistência à deformação permanente;
- Redução dos custos de conservação considerando o melhor desempenho do pavimento;
- Economia de energia e de recursos naturais através da utilização de materiais reaproveitados;
- Redução da suscetibilidade térmica;
- Aumento da flexibilidade
- Aumento da vida útil do pavimento;
- Melhor adesividade aos agregados;
- Redução da espessura do pavimento.

Desvantagens:

- Custo superior ao do asfalto convencional

O asfalto modificado é uma boa solução, pois embora aumente os custos iniciais do produto, resulta em um ótimo custo benefício, reduzindo a necessidade de manutenção das rodovias ou vias urbanas ao longo dos anos.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 7208 – **Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais Betuminosos para Pavimentação**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, novembro 2004.

AREBOP - Associação Nacional das Empresas de Reciclagem de Pneus e Artefatos de Borrachas. Disponível em: <http://www.arebop.org.br/inservivel.asp>. Acesso em: 03 set. 2021.

_____. **NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

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

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **ANP Resolução nº32: FLEXPAVE - Asfalto Modificado por Polímero Elastoméricos**. Rio de Janeiro: ANP, 2010.

ASPHALT HANDBOOK (1947) – **Asphalt Institute Building**, University of Maryland.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave Mix design**. SP-2. 3thed. 2001. 97 p.

_____. **ASTM D 5976-00: Specification for Type I Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction**. 2000.

_____. **ASTM D 5840-00: Specification for Type II Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction**. 2000.

_____. **ASTM D 5841-00: Specification for Type III Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction**. USA, 2000.

_____. **ASTM D 5892-00: Specification for Type IV Polymer- Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction**. USA, 2000.

_____. **ASTM D2872 (2004) - Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**. American Society for Testing and Materials.

_____. **ASTM D36 (2000) - Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring and Ball Apparatus)**. American Society for Testing and Materials.

_____. **ASTM D4402 (2002) – Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using Brookfield Thermosel Apparatus**. American Society for Testing and Materials.

_____. **ASTM D5** (2005) - Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. American Society for Testing and Materials.

_____. **ASTM D6521** (2003) – *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressured g Vessel (PAV)*. American Society for Testing and Materials.

ANGUAS, P.G.; ALAMILLA, H.D.; LÓPEZ, J.A.G.; MADRIGAL, A.G.; **Comportamiento de Mezclas Asfálticas Modificadas con SBR**. Publicación Técnica n° 254, Sanfandila, Qro Secretaria de comunicaciones y transportes – Instituto Mexicano Del Transporte, 2004.

BAHIA H. U., HISLOP W. P, ZHAI H. E RANGEL A., **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 67, p. 1 (1998).

BAHIA H. U., HANSON, D. I. Project NCHRP 9 – 10 – **Superpave Protocols for Modified Asphalt Binders**, TRB (2000).

BAHIA, H. U. et al. **Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design. National Cooperative Highway Research Program - NCHRP**. Report 459. Washington National Academic Press, 2001. 95p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 3º reimpressão. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BERNUCCI L. B., MOTTA L. M. G., CERATTI J. A. P. E SOARES J. B.; **Pavimentação Asfáltica Formação Básica para Engenheiros**, Rio de Janeiro, 2008.

BONEMAZZI, F.; BRAGA, V.; CORRIERI, C.; GIAVARINI, C.; SARTORI, F. Characteristics of polymer and polymer-modified binders. **Transportation Research Record**. Washington, n.1535, p.36-47. 1996.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a lei n.9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília DF.

BRINGEL, R. M. **Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE. 2007.

CARLSON, D. D.; ZHU, H. An anchor to crumb rubber markets. In: INTERNATIONAL RUBBER FORUM, San Diego. **Proceedings...** v.1. 1999.

CANDIN, L. M. **Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais**. Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CASTRO, LUCIANA NOGUEIRA; **Reciclagem à Frio "in situ" com Espuma de Asfalto**; Dissertação de Mestrado; 171 p. - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. 2003.

CERATTI, J. A.; RUWER, P. M.; OLIVEIRA, J. A. Estudo do comportamento mecânico de concreto asfáltico com ligante modificado com polímeros. In: 13º ENCONTRO DE ASFALTO DO INSTITUTO BRASILEIRO DO PETRÓLEO. Rio de Janeiro. **Anais...** p. 290- 303. 1996.

CEZARO, T. C. **Estudo das propriedades mecânicas asfálticas convencionais e modificadas**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CHEUNG C. Y. E CEBON D., **Journal of Rheology**, p. 45 (1997c).

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES – **Pesquisa Rodoviária**. Disponível em www.cnt.org.br, (2009)

COELHO, HEBERT ALVES; REZENDE, ELCIO NACUR. **A responsabilidade civil pela degradação do meio ambiente artificial: possibilidade?**. Ciências Sociais Aplicadas em Revista, v. 15, n. 29, p. 32-48, 2019.

CONAMA - **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução CONAMA no. 258, de 26 de agosto de 1999. *Resoluções*.

CONAMA - **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução CONAMA no. 301, de 21 de março de 2002. *Resoluções*..

CONAMA - **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução CONAMA no. 416, de 01 de outubro de 2009. *Resoluções*.

CONSTANTINO, R.S., LEITE, C.F.M., GONÇALVES, M.L.A (1998)- **Avaliação da Faixa de Plasticidade e da Viscoelasticidade de Asfaltos Modificados com Polímero**. *14º Encontro do Asfalto*, pp60-70.

CORTIZO, M. S., et al. 2004. **Polymer Degradation and Stability**. 2004, Vol. 86, pp. 275-282.

COUTINHO, M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. **Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações**. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1- 13, 2003.

DOITYTEAM. **Revisão sistemática: Aprenda de uma vez sobre esse processo**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://doity.com.br/blog/revisao-sistemica-aprenda-de-uma-vez-sobre-esse-processo/>. Acesso em: 1 set. 2021.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM; **Pesquisas de Asfaltos Modificados por Polímeros. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico**, tomo II, 1ª ed., Rio de Janeiro, junho de 1998.

DNER (1975); **Reabilitação de Pavimentos** – Materiais e Técnicas; Instituto de Pesquisas Rodoviárias; Rio de Janeiro – RJ, 1975.

_____. **DNER PRO 006/2003**; Avaliação objetiva de pavimentos flexíveis e semi-rígidos, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 2003.

_____. **DNER PRO 007/2003**; Levantamento para avaliação da condição de superfície de sub- trecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 2003.

_____. **DNER PRO 008/2003**; Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 2003.

_____. **DNER PRO 269/94**; Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

_____. **DNER PRO 273/96**; Determinação das deflexões utilizando o deflectômetro de impacto tipo “fling weight deflectometer – FWD”; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1996.

DNER, Curso GP-7, **Geotecnia e Pavimentação Rodoviária**, Manual do Aluno, vol. 1 e 2; Instituto de Pesquisas Rodoviárias; Rio de Janeiro – RJ, 1995.

DNER, Curso RR-1, **Restauração Rodoviária**, Manual do Aluno, vol. 1 e 2; Instituto de Pesquisas Rodoviárias; Rio de Janeiro – RJ, 1995.

DNER, Curso SR-6, **Supervisão de Obras Rodoviárias**, Manual do Aluno; Instituto de Pesquisas Rodoviárias; Rio de Janeiro – RJ, 1995.

DNER; **Especificações Gerais para Obras Rodoviárias do DNER**; volume III/IV, Pavimentos Flexíveis; 1997.

DNER; **Manual de Pavimentação**, 2º Edição; Rio de Janeiro - RJ, 1996.

_____. **DNER-EM 396/99**; Cimento asfáltico modificado por polímero; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1999.

_____. **DNER-ES 385/99**; Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1999.

_____. **DNER-ME 024/94**; Pavimento - determinação das deflexões pela Viga Benkelman; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

_____. **DNER-ME 003/99**; Material Betuminoso – determinação da penetração, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1999.

_____. **DNER-ME 04/94**; Material Betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

_____. **DNER-ME 043/95**; Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1995.

_____. **DNER-ME 054/97**; Equivalente de areia; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.

_____. **DNER-ME 057/97**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.

_____. **DNER-ME 083/98**; Agregados – análise granulométrica; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.

_____. **DNER-ME 086/97**; Agregado – determinação do índice de forma; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.

_____. **DNER-ME 089/94**; Agregado – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

_____. **DNER-ME 148/94**; Material betuminoso – avaliação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland); Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

_____. **DNER-ME 163/98**; Materiais betuminosos – determinação da ductilidade; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.

_____. **DNER-ME 193/96**; Produtos betuminosos líquidos e semi-sólidos, determinação da densidade 20°C / 4°C; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1996.

_____. **DNER-ME 247/94**; Material termoplástico para demarcação viária – determinação do ponto de amolecimento (método do anel e bola); Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

_____. **DNER-ME 35/98**; Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.

_____. **DNER-ME 382/99**; Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos modificados por polímeros, pelo método do ductilômetro; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1999.

_____. **DNER-ME 384/99**; Estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero; Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1999.

_____. **DNIT: Normas e Manuais**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. Acesso em 01/08/2021 <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/coletanea-de-normas>.

_____. **DNIT 095-EM**. Cimentos asfálticos de petróleo. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 129-EM**. Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011.

DONY, A. (1989) - **Tese Doutorado**. Université de Paris.

DOAK, K. W. **Ethylene Polymers**. IN: Mark, H. M.; Bikales, N. M.; Overberg, C. G.; Menges, G. – Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, John-Wiley & Sons, New York, Volume 6 (1986).

EPPS, J. A. Uses of recycled rubber tires in highways. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 198, **Transportation Research Board**, Washington, 1994. 161p.

GIBREIL, H. A.; FENG, C. P. **Efeitos do polietileno de alta densidade e pó de borracha fragmentada como modificadores nas propriedades do asfalto misturado a quente**. Material Economics. Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry, 2017.

GONÇALVES, F. P.; CERATTI, J. A.; SOMACAL, L; **Investigação do desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas com polímeros**: proposição de um estudo envolvendo ensaios acelerados de pavimentos com um simulador linear de tráfego. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MANUTENÇÃO E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS E CONTROLE TECNOLÓGICO. São Paulo. Anais... 2000.

GONZÁLES, O.; MUÑOZ M.E.; SANTAMARÍA, A.; GARCIA-MORALEZ, M.; NAVARRO, F.J.; PARTAL, P.; **Rheology and Stability of Bitumen / EVA blends**; European Polymer Journal; p.2365-2372; 2004.

GUARÇONI, DILMA DOS SANTOS; **Petróleo – Refino e Fracionamento Químico do Asfalto**; DNER – Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico; Rio de Janeiro – RJ, 1996.

GUARÇONI, DILMA DOS SANTOS; SANTANA, HUMBERTO; **Asfalto Modificado com Polímero**. V.1; Pesquisa IPR / DNER; Rio de Janeiro – RJ, 1990.

GUIMARÃES, M. E.; SOUZA, R. O. **Ligantes asfálticos modificados com resíduos: uma revisão de literatura**. IN: Simpósio de Transportes do Paraná, 2º Seminário em Aeroportos e Transporte Aéreo e 2º Urbanidade Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2018.

HEITZMAN, M. Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. **Transportation Research Record**. Washington, n.1339, p.1-8. 1992.

HICKS, R.G., 2002. **Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines, Volume I – Design Guidelines**. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRCTC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA.

HOLLERAN, G., REED, J. **Emulsification of asphalt rubber blends, Asphalt Rubber**, pp. 383- 409, 2000.

IBP, **Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos**; 6 ed. rev.; Rio de Janeiro; IBP/Comissão de Asfalto; 1999.

ISACSSON, U. L. F. e LU, X. **Characterization of Bitumens Modified with SEBS, EVA and EBA Polymers**, Journal of Materials Science, Vol. 34, No. 15, 1999, pp. Disponível em: <3737-3745. doi:10.1023/A:1004636329521>. Acesso em: 05 de Maio de 2019.

JACOBS, M. M. J.; HOPMAN, P. C.; MOLENAAR, A. A. Characterization of fracture in asphaltic mixes based on a molecular approach. **Transportation Research Record**. Washington, n.1535, p.22-28. 1996.

JAIN, P.K., SANGITA, S. B., ARYA, I.R. (1992) - *Characterization of Polymer Modified Asphalt Binders for Roads and Airfields*. In: **Polymer Modified Asphalt Binders**. American Society for Testing and Materials – ASTM, Philadelphia, USA

JONES, D.R., et al. 1993. **Strategic Highway Research Program Materials**. s.l.: US/Mountain, 1993.

KRAUS, G. (1981) - **Modification of Bitumen by Butadiene-styrene Block Copolymers**, 2nd International Symposium on Roofs and Roofings.

LAMONTAGNE, J. **Vieillessement des bitumes modifiés polymers a usage routier par simulations et techniques spectroscopiques**. Marseille, 2002. Tese (Doutor em Ciências) – Faculté des Sciences et Techniques de Marseille Saint-Jérôme – Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix- Marseille III.

LEITE, L. F. M., **Estudos de Preparo e Caracterização de Mistura Asfálticas Modificados por Polímero**, Tese de. Doutorado, Instituto de Macromoléculas (IMA), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), p.09, (1999).

LEITE, LENI FIGUEIREDO MATHIAS; BITTENCOURT, CRISTINA PONTES; NASCIMENTO, LUIS ALBERTO HERMANN DO; **Efeito do Ácido Polifosfórico no Desempenho dos Ligantes Rodoviários**; XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes; Florianópolis - SC, 2004

LOPRESTI, D.; AIREY, G.; PARTAL, P. **Manufacturing Terminal and Field Bitumen-Tyre Rubber Blends: The Importance of Processing Conditions**. Procedia – Social And Behavioral Sciences, [s.l.], v. 53, p.485-494, out. 2012.

LUCENA M. C. C., **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal do Ceará (2001).

MAGALHÃES, S. T. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho**. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**.

2014. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2014.

MIRZA, M.W. E WITCZAK, M.W. 1995. **Development of a Global Aging System for Short and Long Term of Asphalts Cements.** *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.* 1995, Vol. 64.

NASKAR, M.; REDDY, K. S.; CHAKI, T. K.; DIVYA, M. K.; DESHPANDE, A. P. Effect of ageing on different modified bituminous binders: comparison between RTFOT and radiation ageing. **Materials and Structures**, v. 46, p.1227-1241, 2013.

NEGRÃO, DOUGLAS POLCARO; **Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do Ripo RET para Aplicação em Pavimentos**; Dissertação de Mestrado; USP; São Paulo – SP, 2006.

NEGRÃO, DOUGLAS POLCARO; PREUSSLER, ERNESTO SIMÕES; BERNUCCI, LIEDI BARIANI; ROPPA, JULIO C. R.; **Polímero RET – Estudo de Caso da Via Anhanguera**; Congresso de Infra- estrutura de Transportes; São Paulo – SP, 2007.

ODA, S.; FERNANDES JUNIOR, J. L. Resultados da avaliação de asfalto-borracha através de ensaios tradicionais e de ensaios da especificação Superpave. In: XIV CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. Gramado. **Anais...** p.577-589. 2000.

ODA, S.; FERNANDES JÚNIOR, J.L.; **Borracha de Pneus como Modificador de Cimentos Asfálticos para Uso em Obras de Pavimentação**; Acta Scientiarum, V.23, nº. 6, 2001.

OLIVEIRA, A. H. **Avaliação do potencial anti oxidante do líquido da castanha de caju (LCC) para materiais asfálticos através de diferentes métodos de envelhecimento.** 2015. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.** 1991. 478 f. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PINTO, J. A. V. **O que são asfaltos modificados por polímeros?** In: Reunião anual de pavimentação urbana, 4ª, Maceió - AL, Associação Brasileira de Pavimentação-ABPV, Anais. v.1, p. 278-288. 1993.

PINTO, SALOMÃO; **Materiais Betuminosos – Conceituação, especificação e utilização**; Instituto Militar de Engenharia; Rio de Janeiro – RJ, 2003.

REIS, R.M.M. E SANTO, N.R.E. 1999. **Tecnologia de Ponta para prolongar a vida dos pavimentos asfálticos.** São Paulo: Ipiranga Asfaltos, 1999.

REUBUSH, S.D. (1999)- **Effects of Storage on the Linear Viscoelastic Response of Polymer-Modified Asphalt at Intermediate to High Temperatures.** Dissertação de mestrado. Virginia.

RESTREPO-FLÓREZ, J. M.; BASSI, A.; THOMPSON, M. R. **Degradação microbiana e deterioração do polietileno - uma revisão**. Int Biodegradation Biodeterior 88: 83 - 90. Crossref CASWeb of Science® Google Acadêmico. 2014.

ROBERTS, F.L., KANDHAL, P.S., BROWN, E.R., LEE, D-Y, KENNEDY, T.W. (1998) - **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction**. NAPA Educational Foundation – Lanham, Maryland.

ROMÃO, Wanderson; SPINACÉ, Márcia A. S.; PAOLI, Marco-A. de. **Poli (Tereftalato de Etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Curso de Instituto de Química, Unicamp, Campinas, 2009.

SENGUL, C.E., ET AL. 2012. **Hydrated Lime Treatment of Asphalt Concrete to Increase Permanent Deformation Resistance**. *Construction and Building Materials*. 2012, pp. 139-148.

SHIN, E. E.; BHURKE, E. S.; ROSVELD, S.; LAWRENCE, T. D. Microstructure, morphology, and failure modes of polymer-modified asphalts. **Transportation Research Record**. Washington, n.1535, p.61-73. 1996.

SHRP - STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM A-410 (1994) - **Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of SHRP Asphalt Research Program**, National Research Council, Washington, DC.

SILVA, L. S. **Preparação e caracterização de ligantes asfálticos modificados com polímeros**. Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 107p.

SILVA L. S.; SPECHT L. P.; CERATTI J. A. P.; FORTE M. C.; ROSSINI, G. Utilização do ensaio de inchamento na seleção de polímeros como modificadores asfálticos. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS / IX INTERNATIONAL MACROMOLECULAR COLLOQUIUM. **Anais**. 2001. p. 979- 981.

SILVA L. S.; FORTE M. C.; SPECHT L. P.; CERATTI J. A. P. Polímeros modificadores asfálticos. **Transportes**. Rio de Janeiro, v.10, n.1, 2002. p. 84-106.

SILVA, L. S. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV**. 2005. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILVA, José de Arimatéia Almeida e. **Utilização do Politereftalato de Etileno (PET) em misturas asfálticas**. 2015. 159 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SOUZA, A. M., RAMOS, C. R., MOTTA, L. M. G., *et al.*, **Curso de técnicas de laboratório em ligantes e misturas asfálticas**. IBP, Rio de Janeiro, 1995.

SPECHT, LUCIANO PIVOTO; **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**, Tese de Doutorado; UFRS; Porto Alegre - RS, 2004.

SPECHT, LUCIANO PIVOTO; CERATTI, JORGE AUGUSTO PEREIRA; PALUDO, ILDA; **Estudo Laboratorial da Adesividade e do Desgaste de Misturas Asfálticas com Borracha**; XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes; Florianópolis - SC, 2004.

TAKALLOU, B. H.; HICKS, R. G. Development of improvement mix and construction guidelines for rubber-modified asphalt pavements. **Transportation Research Record**. Washington, n.1171, p.113-120. 1988.

TONIAL, I.A. 2001. **Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na vida de Fadiga de Pavimentos**. *Tese de M. Sc.* Rio de Janeiro: Coppe / RJ, 2001.

VONK, W. C., PHILLIPS, M. C., ROELE, M. **Ageing resistance of bituminous road binders: Benefits of SBS modification**. Shell Chemicals Paper. TPE 6.3.8, 1994. TRB.

WACHSMUTH, D.; COHEN, D. A.; ANGELO, H. **Expand the frontiers of urban sustainability**. *Nature*, v. 536, p. 7617 - 2016.

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

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

WORLD ROAD ASSOCIATION (PIARC) – TECHNICAL COMMITTEE FLEXIBLE ROADS (C8). **Use of Modified Bitumes Binders Special Bitumes and Bitumes With Aditives in Pavement Applications**. International Workshop Modified Bitumes. Roma, 1998.

YILDIRIM, Y. **Polymer modified asphalt binders**. *Revista Internacional Construction and Building Materials*. v, 21, n. 1, p.66-72, Jan. 2007.

ZENKE, G. **Zur theorie der polymer modifizierten bitumen**. *Das Stationare Mischwerk*, n°5, may of 1979, p. 7-20.

Z. ZHANG E J. YU, "A pesquisa para asfalto modificado com composto SBR de alto desempenho", *Construção e materiais de construção*, vol. 24, No. 3, pp. 410-418, 2010.