



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E
BORRACHA DE PNEUS EM LIGANTE ASFÁLTICO 50/70**

MARCIO EVANDRO GUIMARÃES

Foz do Iguaçu
2019



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO Em
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E
BORRACHA DE PNEUS EM LIGANTE ASFÁLTICO 50/70**

MARCIO EVANDRO GUIMARÃES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Oliveira de Souza

Foz do Iguaçu
2019

MARCIO EVANDRO GUIMARÃES

**EFEITO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E
BORRACHA DE PNEUS EM LIGANTE ASFÁLTICO 50/70**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Oliveira de Souza
UNILA

Prof. Dra. Edna Possan
(UNILA)

Prof. Dra. Lilian Ribeiro de Rezende
(UFG)

Foz do Iguaçu, 09 de agosto de 2019.

Catálogo elaborado pela Divisão de Apoio ao Usuário da Biblioteca Latino-Americana
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA

G963

Guimarães, Marcio Evandro.

Efeito da adição de resíduos de polietileno de alta densidade e borracha de pneus em ligante asfáltico 50/70 /
Marcio Evandro Guimarães. - Foz do Iguaçu, PR, 2019.
93 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano
de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu-PR,
2019.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Oliveira de Souza.

1. Polietileno. 2. Pavimentos de asfalto. 3. Ligantes modificados. 4. Borracha. I. Souza, Ricardo Oliveira de.
II. Universidade Federal da Integração Latino-Americana. III. Título.

CDU 693.7

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

À minha irmã e à minha nona que mesmo não estando mais entre nós, estiveram comigo todos os dias, em meu coração.

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, Odete e José Edo, pela vida, amor, incentivo e apoio incondicional em todo o decorrer da minha vida.

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

A meus amigos que estiveram ao meu lado em momentos difíceis e me ajudaram a superar os desafios da vida.

A meu orientador, Ricardo Oliveira de Souza por ter aceito a me orientar e me ajudar nessa jornada, meu eterno obrigado.

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

A Universidade Federal da Integração Latino Americana pela a oportunidade de ampliar meu conhecimento.

Aos técnicos de laboratório 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.

...Seja forte e corajoso... Josué 1:9

RESUMO

No Brasil a pavimentação de ruas, avenidas e estradas são executadas maiormente com misturas asfálticas, em que o ligante asfáltico tem papel fundamental na coesão, resistência ao afundamento de trilha de roda, resistência à fadiga e resistência ao trincamento térmico. O desempenho desses ligantes pode ser melhorado com a adição de modificadores como estireno-butadieno-estireno (SBS), etileno acetato de vinilo (EVA), resíduo de polietileno e/ou de borracha de pneus reciclados. Neste sentido, este estudo avaliou o efeito da adição de resíduo de polietileno de alta densidade (PEAD) em teores de 1, 2, 3% e de borracha de pneus reciclados em teores de 13 e 15% ao ligante asfáltico convencional 50/70. A avaliação envolveu ligantes não envelhecidos e envelhecidos em curto prazo, de modo que todos os ligantes foram submetidos a ensaios de ponto de amolecimento, ponto de fulgor, viscosidade Brookfield, cisalhamento dinâmico, fluência em viga, termogravimetria, calorimetria exploratória diferencial e espectroscopia de infravermelho, e para todos os resultados foram realizadas análises de regressão linear múltipla. Constatou-se a adição de PEAD e borracha de pneus agem como agentes redutores de perda de massa, de modo a diminuir a volatilização do CAP modificado. Para os maiores teores de adição de PEAD e menores teores de borracha, houve um aumento da consistência e da resistência ao afundamento de trilha de roda. A adição de 13% de borracha + 3% de PEAD apresentou o melhor desempenho dentre os ligantes modificados avaliados.

Palavras-chave: Polietileno de alta densidade. PEAD. Pavimentação. Ligantes modificados. Asfalto-borracha.

ABSTRACT

In Brazil, asphalt mixtures are used for almost streets, avenues and highways paving works. In this case, asphalt binder has a key role considering the cohesion, resistance do rut depth, resistance to fatigue and to thermal cracking. Binder modifiers such styrene-butadiene-styrene (SBS), ethylene-vinyl-acetate (EVA), Polyethylene and ground rubber have been used to enhance the performance of unmodified asphalt binders. This study evaluated the addition of High Density Polyethylene (HDPE) residue (1, 2, 3%) and ground rubber from scrap tires (13 and 15%) to 50/70 (grade of penetration) asphalt binder. The evaluation comprised unaged and short-term aged modified and unmodified asphalt binders. Laboratory tests such the softening point, flash point, Brookfield viscosity, dynamic shearing, creep stiffness, thermogravimetry and differential calorimetry were carried out for all binders. Regression analyses were accomplished considering the laboratory data results. It was found that modified binders using higher HDP addition rates allied to lower ground rubber rates improved consistency and resistance to rut depth. The addition of 13% ground rubber plus 3% HDPE proved the best performance amongst modified binders evaluated.

Palavras-chave: High Density Polyethylene. HDPE. Pavement. Modified asphalt binders. Asphalt-rubber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cálculo do módulo complexo de cisalhamento ($ G^* $) e do ângulo de fase (δ).....	18
Figura 2 – Propriedades dos ligantes asfálticos melhoradas com a adição de	21
Figura 3 – Dimensões das partículas de borracha de pneus estudadas por Dantas Neto (2004).	25
Figura 4 – Viscosidade rotacional Brookfield à 170°C.	25
Figura 5 – Ponto de amolecimento para ligantes asfalto-borracha.....	26
Figura 6 – Consumo de materiais plásticos no Brasil no ano de 2016.	28
Figura 7 – Principais setores consumidores de materiais plásticos.....	29
Figura 8 – Curva granulométrica do resíduo de borracha de pneus.....	32
Figura 9 – Processamento do resíduo de PEAD.	33
Figura 10 – Fluxograma do projeto experimental.	34
Figura 11 – Misturador mecânico empregado no estudo.....	35
Figura 12 – Sistema de ensaio do ponto de amolecimento (anel e bola).	37
Figura 13 – Equipamento para o ensaio do ponto de fulgor.	38
Figura 14 – Equipamento para o ensaio de viscosidade rotacional Brookfield.....	39
Figura 15 – Detalhamento do ensaio utilizando o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).	39
Figura 16 – Detalhamento do ensaio utilizando o Reômetro de Fluência em Viga (BBR).	40
Figura 17 – Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT).	41
Figura 18 – Analisador termogravimétrico.	42
Figura 19 – Estudo da viscosidade do CAP 50/70 convencional + teores de borracha.	44
Figura 20 – Estudo da viscosidade entre CAP 50/70 + 13% borracha + teores de PEAD e	45
Figura 21 – Avaliação da perda de massa dos CAP's.	46
Figura 22 – Ensaio do ponto de amolecimento para os CAP's modificados e não modificado.	48
Figura 23 – Variação do ponto de amolecimento.	49
Figura 24 – Temperatura de inflação para os CAP's modificados no ensaio do ponto de fulgor.....	50
Figura 25 – Viscosidade rotacional Brookfield para o CAP 50/70 convencional.....	51
Figura 26 – Viscosidade rotacional Brookfield para os CAP's modificados.	52
Figura 27 – Quocientes $ G^* /\text{Sen}(\delta)$ antes do envelhecimento.	53
Figura 28 – Quocientes $ G^* /\text{Sen}(\delta)$ após o envelhecimento de curto prazo.	53
Figura 29 – Módulo complexo de cisalhamento ($ G^* $) antes do envelhecimento.	54
Figura 30 – Módulo complexo de cisalhamento ($ G^* $) após envelhecimento de curto prazo.	55
Figura 31 – Ângulos de fase (δ) antes do envelhecimento.	56
Figura 32 – Ângulos de fase (δ) após envelhecimento de curto prazo.	56
Figura 33 – Rigidez dos CAP's antes do envelhecimento.	58
Figura 34 – Rigidez dos CAP's após o envelhecimento de curto prazo.	58
Figura 35 – Módulo de relaxação dos CAP's antes do envelhecimento.	59
Figura 36 – Módulo de relaxação dos CAP's após o envelhecimento de curto prazo.	59

Figura 37 – Análise termogravimétrica antes do envelhecimento.....	60
Figura 38 – Calorimetria exploratória diferencial antes do envelhecimento	61
Figura 39 – Análise termogravimétrica após o envelhecimento de curto prazo.....	62
Figura 40 – Calorimetria exploratória diferencial após o envelhecimento de curto prazo	63
Figura 41 – Análise termogravimétrica dos CAP's modificados com borracha moída de pneus + PEAD particulado antes e após o envelhecimento de curto prazo.	64
Figura 42 – Calorimetria exploratória diferencial dos CAP's modificados com borracha moída de pneus + PEAD particulado antes e após o envelhecimento de curto prazo.	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração.	17
Quadro 2 - Configuração dos ensaios produzidos em laboratório por Dantas Neto (2004).	24
Quadro 3 - Materiais selecionados para estudo detalhado.	34
Quadro 4 - Regressão linear múltipla para o ponto de amolecimento.	66
Quadro 5 - Regressão linear múltipla para o módulo complexo de cisalhamento ($ G^* $).	67
Quadro 6 - Nova análise de regressão para o módulo complexo de cisalhamento ($ G^* $).	67
Quadro 7 - Análise de regressão para o ângulo de fase (δ).	68
Quadro 8 - Nova análise de regressão para o ângulo de fase (δ).	69
Quadro 9 - Análise de regressão para o quociente $ G^* /\text{Sen}(\delta)$	69
Quadro 10 - Nova análise de regressão para o quociente $ G^* /\text{Sen}(\delta)$	70
Quadro 11 - Análise de regressão para a rigidez (S).	71
Quadro 12 - Nova análise de regressão para a rigidez (S).	71
Quadro 13 - Análise de regressão para o módulo de relaxação (valor-m).	72
Quadro 14 - Nova análise de regressão para o módulo de relaxação (valor-m).	72
Quadro 15 - Quantificação das contribuições das variáveis significativas no ponto de amolecimento.	73
Quadro 16 - Quantificação das contribuições das variáveis significativas no módulo complexo de cisalhamento ($ G^* $).	74
Quadro 17 - Quantificação das contribuições das variáveis significativas no ângulo de fase (δ).	74
Quadro 18 - Quantificação das contribuições das variáveis significativas no quociente $ G^* /\text{Sen}(\delta)$	74
Quadro 19 - Quantificação das contribuições das variáveis significativas na rigidez (S).	74
Quadro 20 - Quantificação das contribuições das variáveis significativas no módulo de relaxação (valor-m).	74

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Elementos considerados para a produção de CAP's modificados.22
- Tabela 2** – Caracterização das propriedades físicas do CAP 50/70 convencional. .31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Geral.....	14
1.2.2 Específicos	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 LIGANTE ASFÁLTICO.....	16
2.2 LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO	17
2.4 BORRACHA DE PNEUS	22
2.5 POLIETILENO.....	27
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	31
3.1 MATERIAIS	31
3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	31
3.1.2 Borracha de pneus	31
3.1.3 Polietileno de Alta Densidade (PEAD).....	32
3.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS	33
3.3 MÉTODO.....	35
3.3.1 Produção dos CAP's modificados	35
3.3.2 Ensaio convencionais para caracterização dos CAP's	36
3.3.3 Ensaio reológicos para caracterização dos CAP's	38
3.3.4 Ensaio térmicos	41
3.3.5 Análise estatística.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 ESTUDO PRELIMINAR.....	46
4.2 AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA.....	46
4.3 ENSAIOS CONVENCIONAIS	47
4.3.1 Ensaio de ponto de amolecimento	47
4.3.2 Ensaio do ponto de fulgor.....	49
4.4 ENSAIOS REOLÓGICOS	50
4.4.1 Ensaio de viscosidade rotacional Brookfield	50
4.4.2 Ensaio de Cisalhamento Dinâmico.....	52
4.4.3 Ensaio de Fluência em Viga (BBR)	57
4.5 ENSAIOS TÉRMICOS.....	60

4.5.1 Efeito da adição de PEAD no comportamento térmico do CAP antes do envelhecimento.	60
4.5.2 Efeito da adição de PEAD no comportamento térmico do CAP após envelhecimento de curto prazo.	61
4.5.3 Efeito da adição de PEAD e borracha moída de pneus no comportamento térmico do CAP.....	63
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	66
4.6.1 Análise de regressão para o ponto de amolecimento	66
4.6.2 Análise de regressão para o módulo complexo de cisalhamento ($ G^* $)	67
4.6.3 Análise de regressão para o ângulo de fase (δ)	69
4.6.4 Análise de regressão para o quociente $ G^* /\text{Sen}(\delta)$	68
4.6.5 Análise de regressão para a rigidez (S).....	69
4.6.6 Análise de regressão para o módulo de relaxação (valor-m)	72
4.7 ANÁLISES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CADA VARIÁVEL	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.1 CONCLUSÕES	75
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	776
REFERÊNCIAS.....	78
APÊNDICE A – REVISÃO DE CONCEITOS DE ESTATÍSTICA.....	86
APÊNDICE B – ESTUDOS REALIZADOS PRELIMINARMENTE	92

1 INTRODUÇÃO

Responsável por 61% da matriz de transporte de cargas e predominante no deslocamento de passageiros, o modal rodoviário é um dos principais agentes indutores do crescimento econômico brasileiro (CNT, 2018). As estradas brasileiras, em sua grande maioria são revestidas por pavimento flexível, de modo que nos dias atuais, se encontram em estado muito precário devido ao alto custo de manutenção, causando assim insegurança e prejuízo econômico. O estado de conservação das rodovias impacta diretamente no desempenho econômico de uma determinada região, ou mesmo de um país (MELO, 2014).

Segundo Melo (2014) e FWA (2017) a condição do pavimento, geometria e sinalização viária, contribuem fundamentalmente nas ocorrências de acidentes, além de diminuir a eficiência energética dos veículos e aumentar a emissão de poluentes, gerando custos socioeconômicos e ambientais.

A 22ª pesquisa CNT de rodovias (2018) revela que 56,6% (3.581 km) das rodovias avaliadas no Estado do Paraná apresentam algum tipo de deficiência. De acordo com o mesmo levantamento 43,4% (2.749 km) da extensão pesquisada é considerada boa ou ótima. Na pesquisa foram considerados os seguintes defeitos nos revestimentos asfálticos: fissuras, trincas (transversais, longitudinais e em malha), corrugação, exsudação, desagregação, remendos, afundamentos, ondulações e buracos.

Os componentes adicionados às camadas de revestimento asfáltico têm um valor agregado alto e merecem atenção, devendo ser realizada uma análise minuciosa em relação ao custo/benefício. Os derivados de petróleo e a redução da disponibilidade de materiais naturais, ligados às exigências da construção, estabelecem uma busca por elementos que possam apresentar bom desempenho e baixo custo (SANCHES et al., 2012).

Para Mello (2014), a malha rodoviária é de suma importância para o país, deste modo o desenvolvimento de novas tecnologias que proporcionem o aumento da vida útil do pavimento é de real importância, pois, é inevitável a deterioração por efeitos ambientais e de cargas aplicadas. As misturas asfálticas são importantes, porém o principal elemento a ser considerado é o ligante asfáltico, o qual aglutina os vários componentes da mistura. Assim, se as propriedades do ligante forem melhoradas mediante modificadores, podem proporcionar uma redução nos custos de operação dos veículos e minimização na periodicidade das atividades de conservação da malha

rodoviária.

Do ponto de vista do estado de conservação dos revestimentos asfálticos, a deterioração destes pode advir do dimensionamento inadequado, falhas no processo construtivo, tráfego de veículos pesados muito superior ao previsto e na utilização de materiais tradicionais incapazes de suportar elevadas solicitações ocasionadas pelo tráfego. Para superar estas adversidades, nos últimos anos foram desenvolvidos modificadores para ligantes asfálticos, como o uso de SBR por Yaacob et al. (2016), PET (Polietileno tereftalato) + resíduo de borracha de pneus por Karahrodi et al. (2016) e HDPER (Polietileno de alta densidade reciclado) por Ahmedzade et al. (2017). A adição desses produtos melhora a resistência ao envelhecimento, resistência às trincas por fadiga e de origem térmica, resistência aos danos por umidade induzida e resistência à deformação permanente. Os tipos mais comuns de modificadores são os elastômeros, plastômeros e borracha moída de pneus, entre outros (BERNUCCI et al., 2006).

No Brasil foram produzidos mais de 60 milhões de unidades de pneus no ano de 2017 (IBAMA, 2018). A destinação inadequada e não reutilização desses resulta em depósitos a céu aberto em grandes centros urbanos. Do ponto de vista da saúde pública, tais depósitos a céu aberto contribuem efetivamente para a proliferação de mosquitos e doenças infecto-contagiosas. Além disso, a borracha vulcanizada empregada na fabricação desses pneus, quando queimada a céu aberto, pode contaminar o meio ambiente com óxido de carbono e enxofre, entre outros poluentes (DANTAS NETO, 2004).

Segundo Holleran e Reed (2000) e Lopresti et al. (2012) devido a fabricação de borracha de pneus ser munida de uma mistura de diferentes componentes como borracha de estireno-butadieno de elevado peso molecular, borracha natural, borracha sintética, negro de fumo, entre outros, tem-se uma melhora significativa nas propriedades dos ligantes asfálticos convencionais através da sua incorporação.

No relatório anual do Fundo Mundial para a Natureza (WWF) (2019), é relatado que aproximadamente 37% de todo o lixo plástico mundial não está sendo tratado de forma eficiente, de modo que há uma preocupação eminente com a má gestão desses resíduos plásticos, sendo provável que esses resíduos virem poluição.

O meio ambiente vem sofrendo com a disposição inadequada de resíduos plásticos na natureza, razão pela qual, esforços têm sido feitos, para estes sejam depositados em lugares adequados ou de modo que possam ser empregados durante a produção de outros materiais (WWF, 2019). Segundo Ahmedzade et al. (2017) um

exemplo disso são os estudos sobre o uso de polietileno em ligantes asfálticos modificados, de forma que o material polimérico melhore as propriedades físicas e reológicas dos asfaltos. A reutilização do polietileno ainda contribui na preservação do meio ambiente, pois os lixos plásticos contribuem efetivamente na emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, devido à queima descontrolada destes (WWF, 2019).

No País foram consumidos no ano de 2016 quase 14% de polietileno de alta densidade considerando o total de materiais plásticos (ABIPLAST, 2017). Além disso, no Brasil são consumidas anualmente mais de 13 bilhões de sacolas plásticas, de modo que um brasileiro chega a consumir 66 unidades por ano (LIMA, 2016). Por ser um material com longo tempo de decomposição, o qual pode alcançar até 450 anos, muitas vezes os danos causados ao meio ambiente são irreversíveis (PAJARES, 2010).

O presente estudo teve o intuito de apresentar um estudo da adição de resíduo polietileno de alta densidade e borracha de pneus reciclados em ligante asfáltico convencional 50/70, a partir de ensaios laboratoriais para ligantes não envelhecidos e envelhecidos em curto prazo, analisando as propriedades físicas, reológicas e térmicas desses, de modo a melhorar a qualidade destes ligantes e contribuir para a minimização dos impactos ambientais ocasionados pelo despejo e uso inadequado destes resíduos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O objetivo geral deste estudo é a avaliação do efeito da adição de resíduo de polietileno de alta densidade e borracha moída de pneus reciclados em ligante asfáltico convencional 50/70.

1.1.2 Específicos

Em decorrência do objetivo geral, tem-se:

- Avaliar a percentagem ótima de adição de resíduo de polietileno de alta densidade e borracha de pneus em ligante asfáltico convencional 50/70.

- Estudar a influência da adição de resíduo de polietileno de alta densidade no envelhecimento de curto prazo de ligantes asfálticos modificados;
- Estudar os efeitos reológicos nos ligantes asfálticos modificados mediante ensaio de cisalhamento dinâmico e de fluência em viga.
- Estudar os efeitos térmicos ocasionados pela adição de resíduo de polietileno de alta densidade no ligante asfáltico convencional por meio dos ensaios termogravimétricos e de calorimetria exploratória diferencial.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos que serão descritos, de forma resumida, a seguir tem se.

Capítulo 1: Compreende a introdução do trabalho, onde se aborda de modo geral a pavimentação no cenário nacional e regional, bem como seu estado de conservação, a relevância de aplicação deste estudo e os objetivos do trabalho.

Capítulo 2: Apresenta a revisão bibliográfica sobre ligantes asfálticos, modificação dos asfaltos com polímeros e a utilização de resíduo de borracha de pneus e polietileno de alta densidade como agentes modificadores.

Capítulo 3: São descritos os materiais e métodos utilizados durante a fase experimental, bem como a metodologia utilizada para a fabricação da modificação do ligante asfáltico com resíduo de polietileno de alta densidade e borracha moída de pneus.

Capítulo 4: São apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

Capítulo 5: São apresentadas as conclusões do estudo e as sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados de forma sucinta: ligantes asfálticos, modificação dos asfaltos com polímeros e utilização de resíduo de borracha de pneus e polietileno de alta densidade como agentes modificadores.

2.1 LIGANTE ASFÁLTICO

Para Bernucci et al. (2006) asfalto é um ligante betuminoso proveniente da destilação do petróleo, com propriedades termoviscoplasticas, impermeáveis à água e com baixa reatividade. Quando o ligante está em serviço, por ter propriedades reativas, o mesmo continua a sofrer alterações devidas aos efeitos de envelhecimento por oxidação lenta, que são provocados pelo contato com o oxigênio do ar e a água da chuva (BRANCO, 2016).

No Brasil o órgão responsável por classificar, fiscalizar e garantir a qualidade dos asfaltos é a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP). A ANP publica resoluções contendo especificações técnicas, condições de armazenamento, qualidade e preservação dos ligantes asfálticos (CERATTI et al., 2015).

Comercialmente são encontrados os seguintes tipos de ligantes asfálticos:

- a) Cimentos Asfálticos de Petróleo – CAP;
- b) Asfaltos Diluídos – ADP;
- c) Emulsões Asfálticas – EAP;
- d) Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial - Piche;
- e) Asfaltos modificados por polímero – AMP ou borracha de pneus - AMB;
- f) Agentes rejuvenescedores – AR e ARE.

Segundo a NORMA DNIT 095/2006 – EM, os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) são asfaltos obtidos especialmente para o uso direto na pavimentação, onde atendem as qualidades e consistências próprias deste uso. Considerando o grau de dureza (ou grau de penetração em décimas de milímetro), tem-se a classificação seguinte: CAP-30/45; CAP-50/70; CAP-85/100 e CAP-150/200. O Quadro 1 especifica as características técnicas para cada tipo de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

Quadro 1 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s					NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135 °C, mín		192	141	110	80			
a 150 °C, mín		90	50	43	36			
a 177 °C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60			
OU								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	214	155			
a 150 °C, SP 21, mín.		203	112	97	81			
a 177 °C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114			
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872	
Variação em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

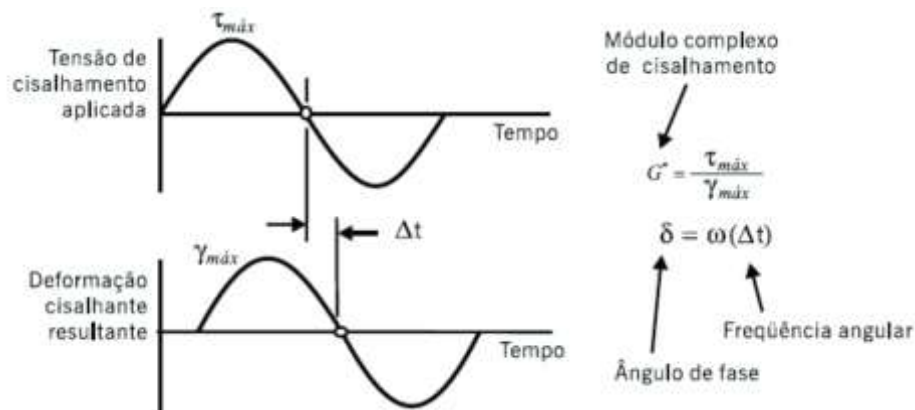
Fonte: DNIT 095/2006-EM.

Além dos ensaios convencionais de caracterização dos ligantes asfálticos indicados no Quadro 1, existem ensaios reológicos indicados no método Superpave (Superior PERFORMANCE asphalt PAVEMENTS). O Superpave utiliza um novo procedimento para seleção e especificação de ligantes asfálticos, incluindo ensaios como o cisalhamento dinâmico e de fluência em viga, além de uma nova formulação para dosagem de misturas asfálticas (ASPHALT INSTITUTE, 2001).

O ensaio de cisalhamento dinâmico é realizado em temperaturas altas e intermediárias tendo por finalidade a caracterização das propriedades viscoelásticas do CAP a partir do módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ) (Figura 3) (AASHTO T315, 2012).

Segundo a especificação Superpave, os parâmetros $|G^*|$ e δ podem ser considerados conjuntamente a partir do quociente entre ambos. Assim, considerando temperaturas elevadas, para ligantes não envelhecidos (originais) o quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ deve ser superior a 1,00 kPa enquanto para ligantes envelhecidos em curto prazo, o quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ deve ser maior que 2,20 kPa (Figura 1).

Figura 1 – Cálculo do módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ).



Fonte: BERNUCCI et al., 2006.

O ensaio de fluência em viga é realizado em temperaturas baixas, tendo por objetivo a caracterização da rigidez de um ligante asfáltico a partir da rigidez estática (S) e do módulo de relaxação (valor- m). A especificação Superpave recomenda que a rigidez do ligante asfáltico seja inferior a 300 MPa e o valor- m superior a 0,3 quando transcorridos 60 segundos do início do ensaio, o qual tem duração de 240 segundos.

2.2 LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP's) convencionais têm bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. No entanto, para condições de volume de veículos comerciais e pesos por eixo crescentes, ano a ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessário a adição de modificadores aos CAP's convencionais. A modificação destes permite elevar a temperatura de amolecimento, a resistência à deformação permanente, a

resistência aos trincamentos térmico e por fadiga, aumento na resistência ao envelhecimento além de melhoria nas características adesivas e coesivas. Assim, tem-se redução das variações de suas propriedades em relação às temperaturas de serviço (BERNUCCI et al., 2006).

Para Yildirim (2007) polímeros dos mais diversos tipos e categorias são usados para a modificação de CAP's. O uso desses produtos para modificação de ligantes asfálticos vem sendo feito desde 1970 na Europa e Estados Unidos (SILVA et al., 2002). Seu uso se destina a novos tipos de aplicações, tais como: misturas asfálticas drenantes, concretos asfálticos de alto módulo, microrevestimentos, membranas anti-fissuras, entre outras (YILDIRIM, 2005).

A interação entre o CAP e os polímeros resulta num desempenho superior dos revestimentos asfálticos produzidos com tais materiais. Assim, os CAP's modificados por polímeros têm sido utilizados com sucesso em revestimentos asfálticos submetidos à elevadas tensões tais como avenidas com elevado volume de tráfego pesado, pistas de aeroportos, pátios de estacionamento para veículos pesados, entre outros (KING et al., 1999; BRINGEL, 2007).

Ceratti et al. (2015) considera que ligantes asfálticos modificados por polímero são materiais compostos por CAP e um ou mais polímeros, geralmente em teores de 3 a 8% (massa/massa, ou seja, em relação à massa do CAP).

Segundo Bernucci et al. (2006) o comportamento dos polímeros depende dos materiais de partida (monômeros), do tipo de reação empregado para sua obtenção e da técnica utilizada na sua preparação. Os tipos de reação mais usuais empregados podem ser:

- Poliadição: Borracha Estireno-Butadieno (SBR) e Etileno-Acetato de Vinila (EVA);
- Policondensação: Polietileno Tereftalato (PET);
- Modificação química de outro polímero: Estireno-Butadieno-Estireno (SBS).

Conforme Leite (1999), os polímeros podem ser classificados em quatro categorias: termorrígidos, termoplásticos, elastômeros e elastômeros termoplásticos. Apresenta-se a seguir uma breve descrição de cada categoria:

- Termorrígidos: São aqueles que após a sua formação, sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente. Ao serem aquecidos novamente, não amolecem mais, impossibilitando sua remodelagem, tendo-se, por exemplo, a resina epóxica e o poliuretano;
- Termoplásticos: São aqueles que depois de sua formação tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Assim, esses polímeros amolecem quando aquecidos e endurecem quando resfriados. Eles podem ser incorporados aos CAP's em altas temperaturas, tendo-se nesse caso o Polietileno de Alta Densidade (PEAD), polipropileno e Policloreto de Polivinila (PVC);
- Elastômeros: São aqueles que uma vez aquecidos, se decompõem antes de amolecer, apresentando propriedades elásticas que lembram às da borracha, um exemplo é o SBR;
- Elastômeros termoplásticos: São aqueles que em temperaturas baixas, apresentam comportamento elástico, e quando em temperaturas altas passam a apresentar comportamento termoplástico. Exemplo: SBS e EVA.

Para Pinto (1993); Isacsson e Lu (1999); Anguas et al. (2004); Bringel (2007), ao se adicionar um modificador polimérico ao CAP pode ocorrer uma melhoria de suas propriedades físicas, tais como:

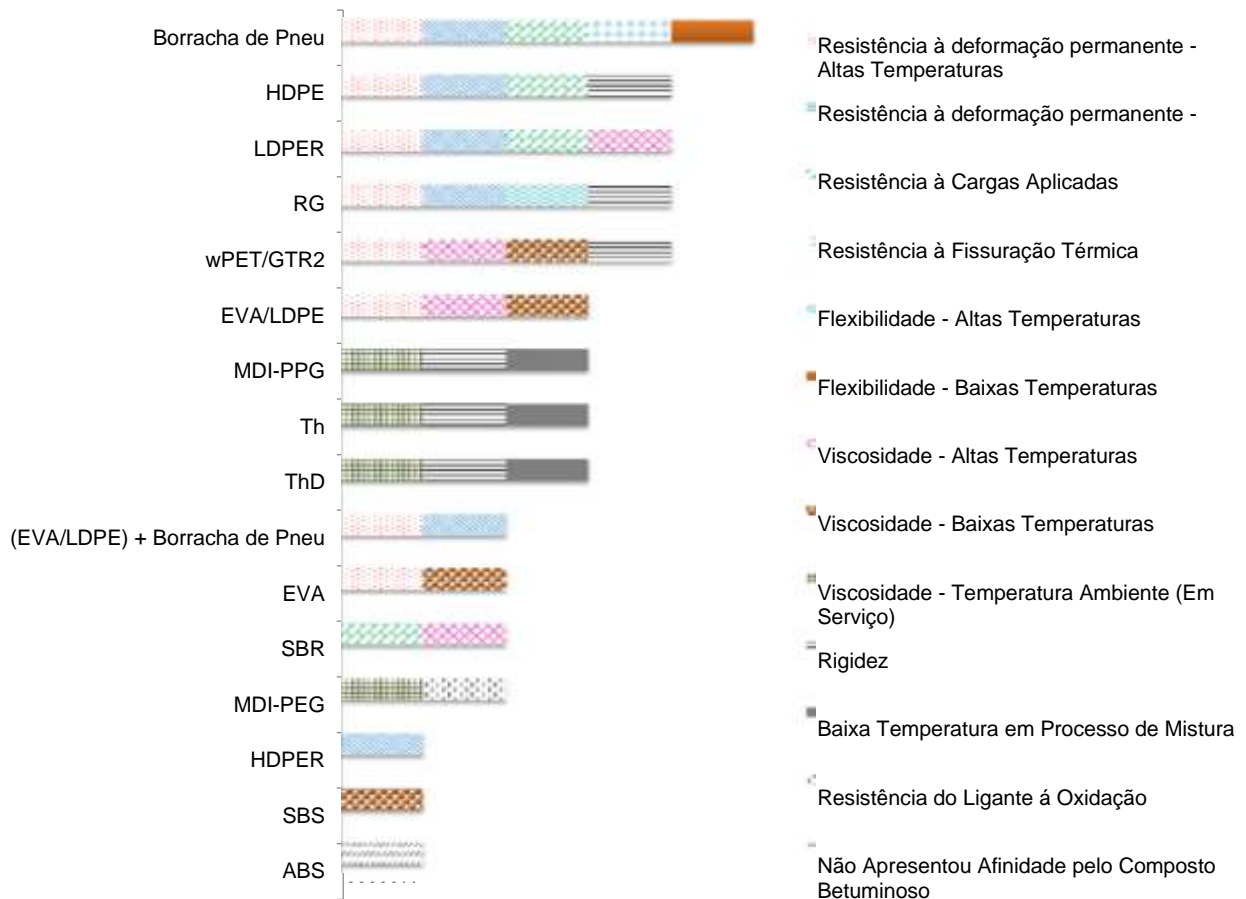
- Redução da susceptibilidade térmica;
- Aumento da coesão interna;
- Melhoria da elasticidade e flexibilidade em baixas temperaturas;
- Melhoria no comportamento à fadiga;
- Aumento da resistência ao envelhecimento;
- Redução da deformação permanente.

Os polímeros normalmente usados na modificação de ligantes asfálticos incluem estireno-butadieno-estireno (SBS), borracha de estireno-butadieno (SBR), etileno acetato de vinilo (EVA), polietileno (LDPE, HDPE (PEAD), etc.) e polímeros de resíduos (plásticos de sacolas, borracha moída de pneus descartados, etc...) (AIT-KADI, 1996;

BERNUCCI et al., 2006).

Na Figura 2 são apresentadas algumas das propriedades que são modificadas nos ligantes asfálticos convencionais com a adição de resíduos poliméricos (HINISLIOĞLU e AĞAR, 2004; NAVARRO et al., 2004, GARCÍA-MORALES et al., 2006; 2009; CUADRI et al., 2014; 2016; GARCÍA-TRAVÉ et al., 2016; KARAHRODI et al., 2016; YAACOB et al., 2016; AHMEDZADE et al., 2017).

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



Em princípio essa modificação nas propriedades físicas e reológicas pode ser uma consequência de possíveis ligações ou interações químicas entre as moléculas do ligante com o polímero modificador, resultando na melhoria do desempenho dos ligantes convencionais quanto ao afundamento de trilha de roda, trincamento térmico e trincamento por fadiga (SILVA, 2005).

A Tabela 1 ilustrada a seguir apresenta estudos e elementos considerados para a produção de CAP's modificados com polímero.

Tabela 1 – 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 EVA/LDPE + Borracha de pneu - 5; 7 e 9	60/70	1200
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)	HDPER	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: AUTOR, 2019.

2.3 BORRACHA DE PNEUS

A frota de veículos brasileira vem crescendo ano a ano, deste modo o

número de pneus descartados aumenta progressivamente, originando um problema ambiental o qual requer solução. Segundo Rodrigues Junior (2006), os pneus descartados são objetos perceptíveis e volumosos, que requerem um armazenamento apropriado para evitar risco de incêndio e proliferação de insetos que podem transmitir doenças. A dificuldade para disposição de carcaças de pneus em aterros sanitários (pois se torna inviável, já que apresentam baixa compressibilidade e degradação muito lenta) e a falta de uma legislação eficaz para controle da destinação adequada desses resíduos, tem conduzido ao abandono desses pneus em cursos de água, em terrenos baldios e em beiras de estradas, agravando ainda mais o problema.

Segundo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), em seu Relatório de pneumáticos “Resolução Conama nº 416/09: 20178 do ano de 2018”, entre importadores e fabricantes nacionais, em 2017 foi comercializado no mercado brasileiro cerca de 60.424.080 de unidades de pneus novos, equivalente a 839.863,47 toneladas de borracha de pneu.

A borracha de pneus reciclados pode ser empregada como combustível, para geração de energia (NEVES FILHO, 2004; RODRIGUES JUNIOR, 2006) e na fabricação de outros produtos como tijolos ecológicos (SILVA et al. 2017), quadras poliesportivas (PISOLEVE®, 2019) e também na pavimentação rodoviária. Nesse caso, os pneus inservíveis podem ser reutilizados de forma triturada em misturas asfálticas. Quando usados para esse fim, o processo de fabricação das misturas modificadas com borracha pode ocorrer por dois processos: “processo seco”, quando as partículas de borracha triturada substituem parte dos agregados na mistura, e após a adição do CAP, formam o concreto asfáltico modificado com adição de borracha (PINHEIRO, 2004); ou pelo “processo úmido”, de forma que a borracha triturada de pneus é incorporada ao CAP por um período de tempo, antes da adição do agregado, formando assim o ligante asfalto-borracha (NEVES FILHO, 2004; DANTAS NETO, 2004; SOUZA, 2006). Para Souza (2006), o período de tempo para essa incorporação normalmente varia entre 10 e 45 minutos.

Para Neves Filho (2004) os principais objetivos da adição do resíduo de borracha de pneus em ligantes asfálticos são: minimização dos problemas da disposição final de pneus descartados; melhoria do desempenho dos pavimentos asfálticos mediante aumento da sua rigidez em elevadas temperaturas (reduzindo desta forma a deformação permanente nas trilhas de roda); aumento da flexibilidade (retardando o aparecimento de trincas); e melhoria da eficiência na impermeabilização proporcionada pelos

revestimentos asfálticos.

Dantas Neto (2004) produziu misturas de asfalto-borracha variando a temperatura de mistura, os teores (percentagem de borracha) e o tempo de mistura mecanizada, conforme ilustra o Quadro 2.

O resíduo de borracha triturada usada por Dantas Neto (2004) foi obtido pelo processo de moagem à temperatura ambiente sendo consideradas as seguintes granulometrias para estudo: R1: 0,5 – 1,15mm; R2: 1,0 – 2,0mm; R3: 2,0 – 3,0mm; R4 (35% de R1 + 65% de R2): 0,5 – 2,0mm; R5 (25% de R1 + 25% de R2 + 50% de R3): 0,5 – 3,0mm; R6 (25% de R1 + 75% de R3): 0,5 – 1,15 e 2,0 – 3,0mm.

Quadro 2 – Configuração dos ensaios produzidos em laboratório por Dantas Neto (2004).

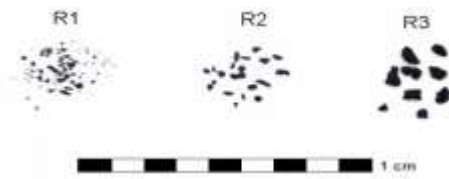
CAP (Pen)	Borracha granulada	Temperatura (°C)	Percentagem de borracha (%)	Tempo de mistura (minutos)
35/50	R ₁	170	10, 15, 17, 19, 21, 23	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180
35/50	R ₄	170, 190, 210	10, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 30	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180, 240, 300
50/70	R ₄	170, 190, 210	15, 17, 19, 21, 25, 30*	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300
50/70	R ₅	170, 190, 210	21, 25, 30*	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300
50/70	R ₆	170, 190, 210	21, 25, 30*	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300
100/150	R ₄	170, 190, 210	21, 25, 30*	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300
100/150	R ₅	170, 190, 210	21, 25	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300
50/70	CRM 5	190	21, 25	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300

* Apenas para a temperatura de 210°C

Fonte: DANTAS NETO, 2004.

A Figura 3 apresenta um comparativo dos tamanhos dos grãos base, utilizados no estudo em questão. Dantas Neto (2004) também utilizou amostras obtidas pelo processo criogênico: CRM 1: inferior a 0,6mm; CRM 2: inferior a 1,4mm; CRM 3: 0,6 – 1,4mm; CRM 4: 1,4 – 2,0mm; CRM 5 (50% de CRM 2 + 50% de CRM 4): inferior a 2,0mm (Quadro 2).

Figura 3 – Dimensões das partículas de borracha de pneus estudadas por Dantas Neto (2004).

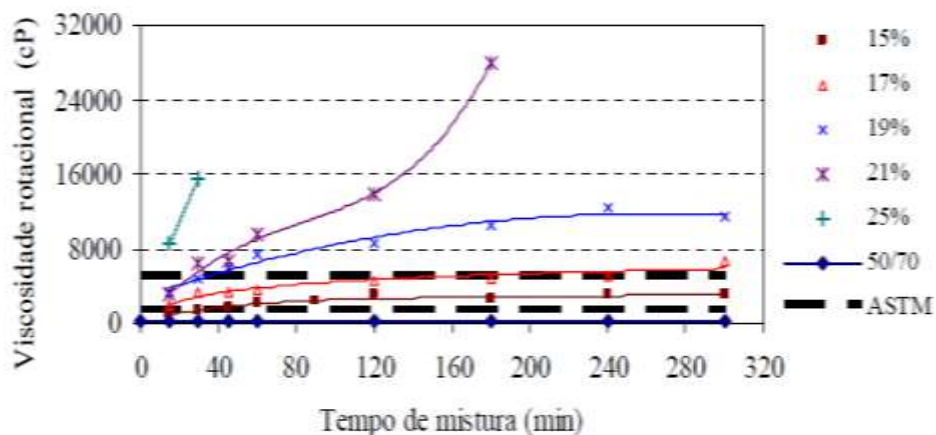


Fonte: DANTAS NETO, 2004.

As análises laboratoriais efetuadas por Dantas Neto (2004) indicaram aumento da viscosidade rotacional Brookfield à 170°C (Figura 4) nas amostras de asfalto-borracha com o acréscimo da percentagem de borracha incorporada. Os resultados também mostraram que a obtenção de CAP's modificados com percentagens de borracha superiores a 21%, em peso, só era possível para condições bem específicas, como por exemplo, elevadas temperaturas e para tempo de mistura de 300 minutos.

A viscosidade rotacional Brookfield é um dos principais fatores que limitam o aumento da percentagem de borracha incorporada aos CAP's convencionais durante o processo de fabricação. A adição da borracha moída ao CAP convencional aumenta a temperatura de amolecimento e a resiliência das amostras de asfalto-borracha. Esse ganho de consistência do ponto de amolecimento pode indicar uma melhoria do comportamento dos asfaltos-borracha em elevadas temperaturas, porém pode proporcionar em alguns casos uma baixa trabalhabilidade, enquanto o aumento da resiliência está relacionado com o ganho da capacidade de recuperação elástica (DANTAS NETO, 2004).

Figura 4 – Viscosidade rotacional Brookfield à 170°C.

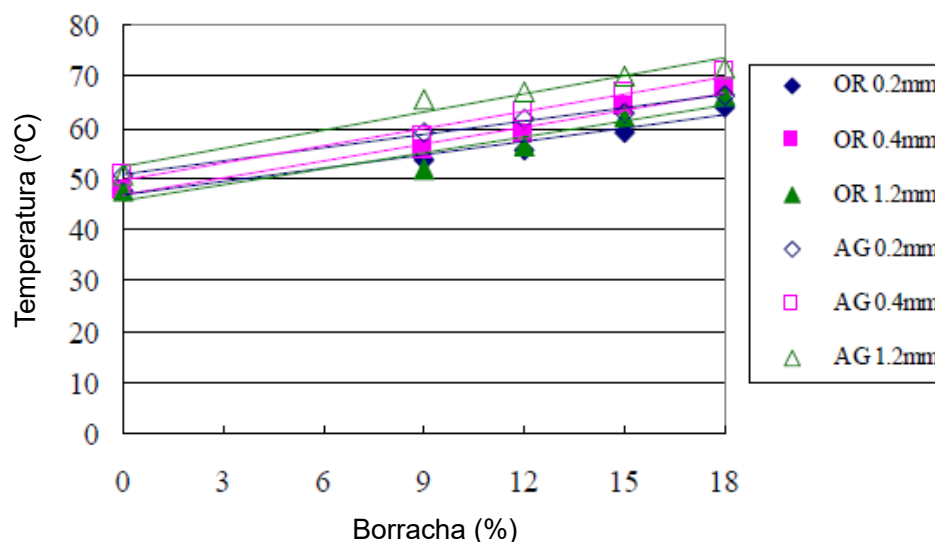


Fonte: DANTAS NETO, 2004.

Souza (2006) apresentou em seu estudo o uso de borracha moída de pneus adicionada ao ligante asfáltico 60/80 (fabricado no Japão). Nesse estudo variou-se a percentagem de adição de borracha triturada (0, 3, 6, 9, 12, 15 e 18 %) e o tamanho das partículas adicionadas (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 e 1.2 mm). Por outro lado, considerou-se uma temperatura de 180°C durante o processo de mistura mecânica e velocidades de rotação de 250 rpm durante a adição da borracha triturada ao ligante asfáltico. Concluída a adição da borracha, aumentou-se a velocidade de rotação para 660 rpm durante 30 minutos. Finalizado esse período de tempo, o material resultante foi acondicionado por uma hora em estufa à 180°C para que ocorresse a digestão do ligante asfalto-borracha.

Souza (2006) constatou que em asfaltos-borracha não envelhecidos e envelhecidos em curto prazo, o aumento do teor de borracha adicionada ao ligante resultou em aumento na temperatura do ponto de amolecimento (Figura 5). Assim, houve melhoria na resistência ao afundamento de trilha de roda, e também uma redução no envelhecimento. Além disso, ligantes asfalto-borracha contendo partículas menores aliado à maiores teores de borracha apresentaram menor envelhecimento. Por outro lado, as viscosidades Brookfield aumentaram proporcionalmente com o teor de inserção de borracha, haja vista que as partículas incham após a mistura com o ligante, o atrito entre elas se torna mais alto, melhorando assim a consistência dos ligantes asfalto-borracha.

Figura 5 – Ponto de amolecimento para ligantes asfalto-borracha.



Fonte: SOUZA, 2006.

2.4 POLIETILENO

Descoberto na Grã-Bretanha por volta de 1933 e comercializado em meados de 1939, o polietileno é um dos plásticos mais vendidos e reciclados atualmente (CANDIN, 2007).

O polietileno consiste de um polímero parcialmente cristalino, flexível, cujas propriedades são acentuadamente influenciadas pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina (DOAK, 1986; RESTREPO-FLÓREZ, et al., 2014). Possui uma das mais simples estruturas poliméricas, conferindo ao material uma grande versatilidade em relação à variedade dos processos de transformação e aplicação, obtendo características próprias de densidade, peso molecular e distribuição de peso molecular (CANDIN, 2007).

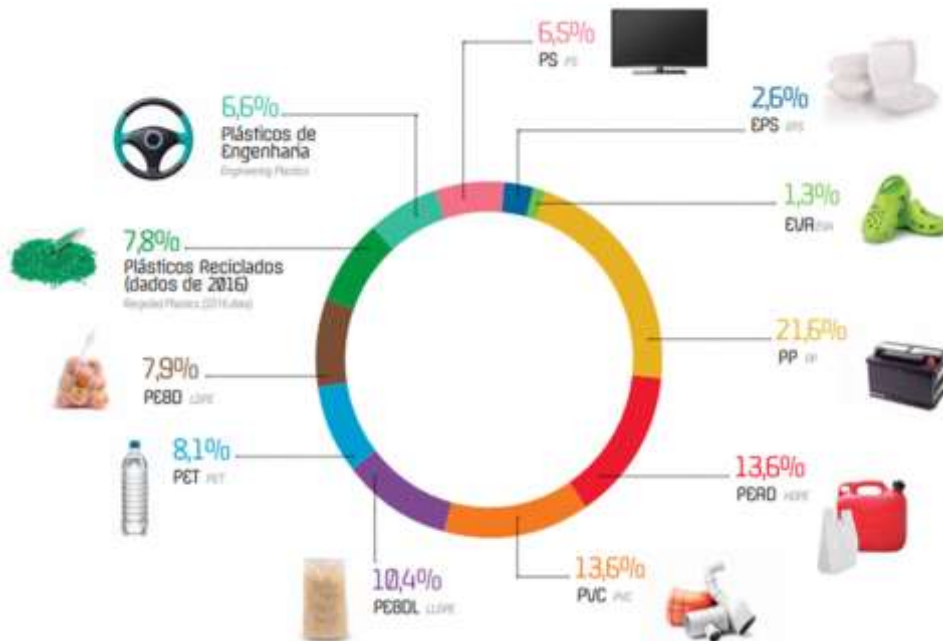
Segundo Coutinho (2003), o polietileno se divide em cinco grupos:

- Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE);
- Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE);
- Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE);
- Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE);
- Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD ou ULDPE).

O polietileno pode ser aplicado em vários materiais, como: filmes para embalagens industriais e agrícolas, filmes destinados a embalagens de alimentos, revestimento de fios e cabos, tubos e mangueiras, baldes e bacias, tampas para garrafas e potes, embalagens para detergentes, redes para embalagem de frutas, fitas decorativas, sacos para lixo e sacolas de supermercados, fraldas descartáveis, lonas em geral, brinquedos, plástico bolha, artigos flexíveis e peças de uso geral, tubos, bombas, válvulas, filtros, tampas de caixa de sucção, réguas e perfis (COUTINHO, 2003). Ainda pode ser usado na modificação de CAP's para fornecer maior resistência às deformações permanentes em altas temperaturas (GIBREIL; FENG, 2017).

A Figura 6 ilustra o consumo brasileiro de materiais plásticos para o ano de 2016 segundo o anuário Perfil 2017 elaborado pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST). Tanto o PEAD quanto o PVC representam 13,6% do consumo de plástico no Brasil no ano do estudo, ambos ficando atrás somente do Polipropileno (PP), que representou 21,6% do total.

Figura 6 – Consumo de materiais plásticos no Brasil no ano de 2016.



Fonte: ABIPLASTIC, 2018.

Segundo o Fundo Mundial para a Natureza (WWF, 2019) o Brasil é o 4º maior gerador de lixo plástico do mundo, com uma produção de 11,3 milhões de toneladas, ficando atrás dos Estados Unidos, China e Índia. Desse total, foram coletados 91%, porém apenas 1,28% foi reciclado.

Em nível mundial, aproximadamente 40% dos resíduos plásticos são enviados diretamente a aterros, onde são necessários mais de 400 anos para decomposição (WWF, 2019).

O ciclo de vida dos plásticos varia em função da sua aplicabilidade. O ciclo curto é composto principalmente pelas embalagens destinadas a alimentos, bebidas e artigos de higiene pessoal e limpeza (Figura 7) (ABIPLASTIC, 2018).

O ciclo médio é constituído por plásticos utilizados na agricultura, na fabricação têxtil e de vestuário, e na produção papelreira. O ciclo longo, em razão de suas propriedades versáteis, está fortemente presente na construção civil, nos automóveis e autopeças, em móveis e eletrônicos, sendo o responsável por mais da metade do mercado consumidor de produtos plásticos (ABIPLASTIC, 2018).

Figura 7 – Principais setores consumidores de materiais plásticos.



- Em valores de produção (%).

Fonte: ABIPLASTC (2018).

O polietileno de alta densidade (PEAD) é produzido a partir do petróleo, sendo um termoplástico que apresenta temperatura de fusão entre 130 a 140°C além de cristalinidade entre 75 e 95% (KUMAR et al., 2011; CANDIM, 2007).

O PEAD pode ser empregado na modificação de CAP's e misturas asfálticas. Attaelmanan et al. (2010) avaliaram a modificação de CAP convencional com PEAD considerando teores de 1, 3, 5 e 7% (em peso) de PEAD em relação ao peso do CAP convencional. Posteriormente, esses CAP's modificados foram adicionados aos agregados pétreos para a produção de misturas asfálticas, as quais apresentaram desempenho superior comparado às misturas fabricadas com CAP's convencionais não modificados. Observou-se redução da suscetibilidade à umidade e à temperatura devido à

inclusão de PEAD no CAP convencional. Os ensaios laboratoriais indicaram que a adição de 5% de PEAD ao CAP convencional produziu o melhor desempenho e durabilidade para as misturas asfálticas avaliadas.

Gibreil e Feng (2017) avaliaram a modificação de CAP convencional mediante adição de borracha de pneus em teores de 5, 10 e 15% mais PEAD em teores de 4, 5 e 6% (em peso). Os ensaios laboratoriais mostraram que a resistência à deformação em temperaturas moderadas e altas aumentou com a adição dos modificadores. Além disso, houve melhoria significativa na resistência aos danos causados pela umidade. Dentre várias modificações ensaiadas, observou-se melhor desempenho para adição de 5% de PEAD + 10% de borracha de pneus.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os materiais, os métodos utilizados durante a fase experimental do estudo e as especificações (normativas) para a obtenção das propriedades físicas e reológicas dos CAP's.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O ligante asfáltico convencional utilizado nesta pesquisa foi classificado como CAP 50/70 produzido por uma empresa situada na cidade de Araucária no estado do Paraná. A Tabela 2 apresenta a caracterização das suas propriedades.

Tabela 2 – Caracterização das propriedades físicas do CAP 50/70 convencional.

Ensaio	Unidade	Método/Procedimento	Limites	Resultado
Penetração	0,1 mm	DNIT 155/2010-ME	50 - 70	52,3
Ponto de Amolecimento	°C	DNIT 131/2010-ME; ABNT NBR 6560/2016	> 46	46,6
Viscosidade Brookfield	135°C	ABNT NBR 15184/2004; NBR 15529/2007; ASTM D4402/2015	> 274	364,3
	150°C		> 112	190,2
	177°C		57 - 285	83,9
Ponto de Fulgor	°C	ABNT NBR 11341/2014	> 235	280
Efeito do calor e do ar (RTFOT)				
Varição em Massa	% massa	ABNT NBR 15235/2009; ASTM D2872/2012	< 0,5	0,13
Penetração Retida	%	DNIT 155/2010-ME	> 55	55
Aumento do Ponto de Amolecimento	°C	DNIT 131/2010-ME; ABNT NBR 6560/2016	< 8	3,5

Fonte: AUTOR, 2019.

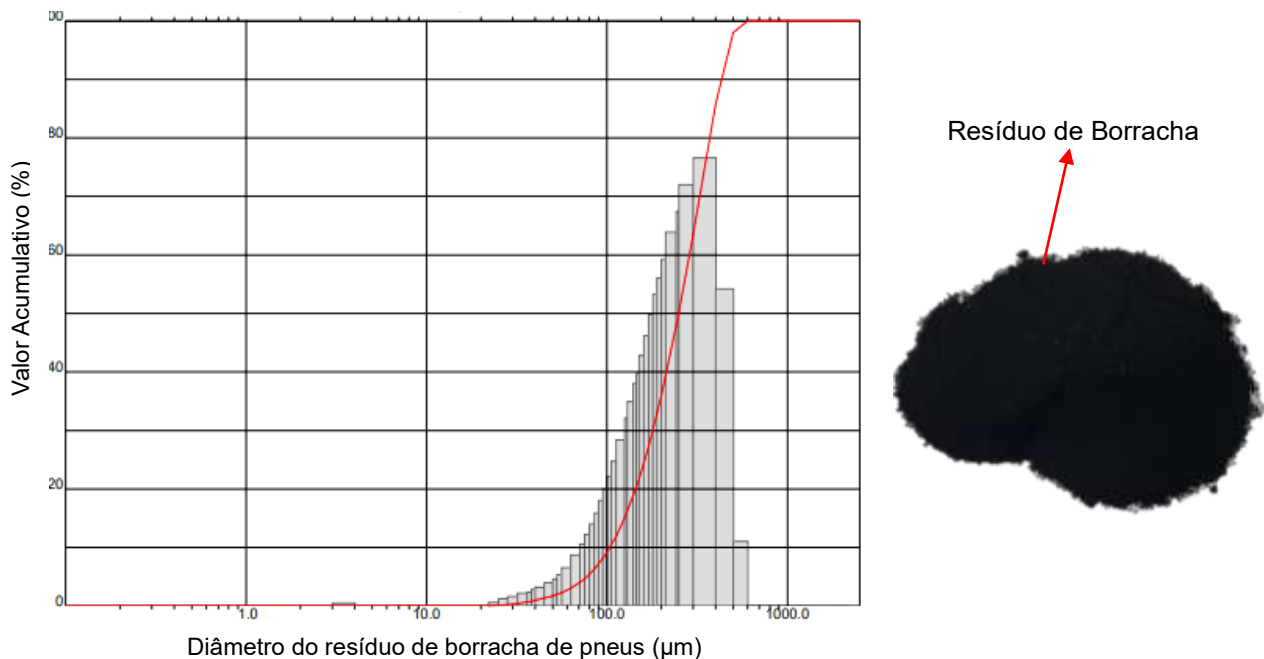
3.1.2 Borracha de pneus

O processo de obtenção da borracha de pneus moída utilizada neste estudo foi por trituração em temperatura ambiente, tendo-se 80% de pneus inservíveis oriundos de veículos de passeio e 20% de pneus inservíveis provenientes de caminhões.

O material foi adquirido em uma empresa de reciclagem de pneus na cidade de Mandaguari no estado do Paraná. O ensaio de granulometria foi realizado com granulômetro da marca CILAS (modelo 1190), o qual considera uma faixa de leitura das partículas entre 0,10 e 2500 μm , analisadas em estado seco.

A Figura 8 ilustra a curva granulométrica, tendo-se obtido partículas com diâmetro mínimo de 103.65 μm e diâmetro máximo de 432.12 μm .

Figura 8 – Curva granulométrica do resíduo de borracha de pneus.



Fonte: AUTOR, 2019.

3.1.3 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

O resíduo de polietileno de alta densidade utilizado, foi o de sacolas plásticas, que foram trituradas com o auxílio de um fragmentador de papel (Fellowes MS-450Cs), assim obtendo partículas reticuladas passantes na peneira #10 (2 mm), essas advindas de uso em um comércio local da cidade de Foz de Iguaçu.

O ensaio de granulometria não foi possível de ser realizado de modo que o tentar ser analisado, devido ao material ser demasiadamente leve e com partículas sem forma geométrica definida, a leitura foi impossibilitada.

As sacolas plásticas passaram inicialmente por triagem para identificação da presença de contaminantes em seu interior e/ou exterior. A seguir as sacolas limpas,

secas e livres de qualquer contaminação aparente foram trituradas com auxílio de uma fragmentadora de papel, a qual produzia micropartículas de 2×8mm. Além disso, para cada unidade de sacola plástica (Figura 9), foram produzidas aproximadamente 2g de resíduo particulado de PEAD, assim para cada litro de CAP 50/70 convencional, foram usadas aproximadamente 25 sacolas plásticas para realizar a sua modificação.

Figura 9 – Processamento do resíduo de PEAD.

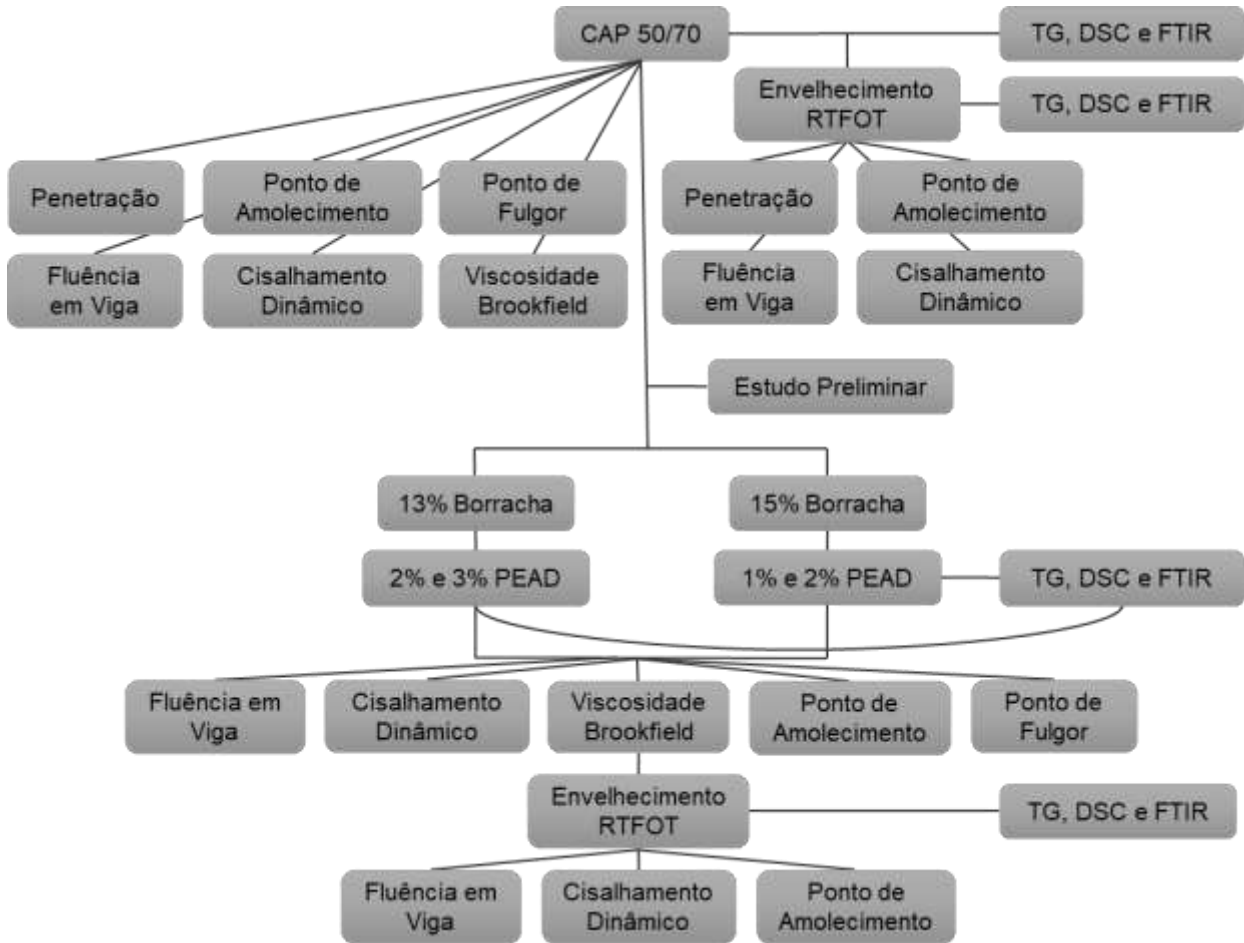


Fonte: AUTOR, 2019.

3.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS

A partir da revisão bibliográfica pode-se identificar os fatores usuais para a modificação de ligantes asfálticos com polímeros, os quais foram elencados na seção 2.3 (tabela 1). Justifica-se assim o uso do fator velocidade com uma rotação de 1200 rpm e o fator tempo de 30 min. Todos os ensaios foram realizados para, no mínimo, 03 (três) amostras. Na Figura 10 é apresentado o fluxograma do projeto experimental.

Figura 10 – Fluxograma do projeto experimental.



Fonte: AUTOR, 2019.

A nomenclatura definida neste estudo está explícita a seguir, de modo que consistiu na análise do ligante convencional 50/70 sem modificação e modificado com resíduos de borracha de pneus reciclada e PEAD particulado (Quadro 3).

Quadro 3 – Materiais selecionados para estudo.

Amostras	Nomenclatura
CAP 50/70	CAP 50/70
CAP 50/70 + 13% de Borracha de Pneus	13% Borracha
CAP 50/70 + 13% de Borracha de Pneus + 2% de Polietileno de Alta Densidade	13% Borracha + 2% PEAD
CAP 50/70 + 13% de Borracha de Pneus + 3% de Polietileno de Alta Densidade	13% Borracha + 3% PEAD
CAP 50/70 + 15% de Borracha de Pneus	15% Borracha
CAP 50/70 + 15% de Borracha de Pneus + 1% de Polietileno de Alta Densidade	15% Borracha + 1% PEAD
CAP 50/70 + 15% de Borracha de Pneus + 2% de Polietileno de Alta Densidade	15% Borracha + 2% PEAD

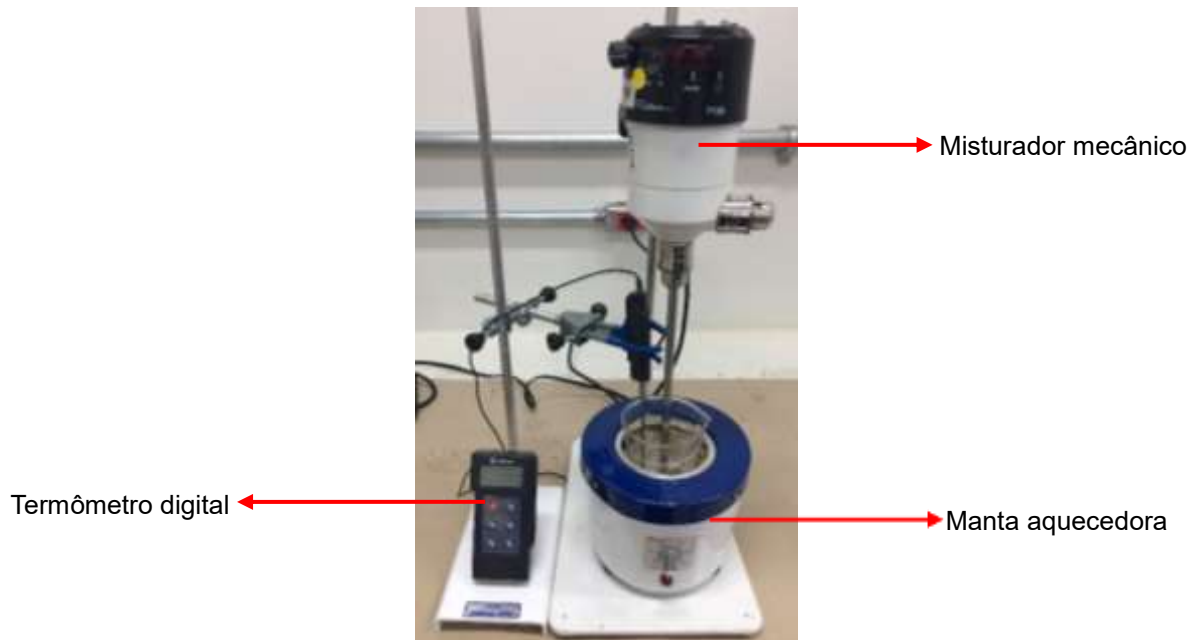
Fonte: AUTOR, 2019.

3.3 MÉTODO

3.3.1 Produção dos CAP's modificados

Os CAP's modificados foram produzidos no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila). Para realizar as modificações foi utilizado um misturador mecânico (Figura 11) com controle de rotação e hélice cisalhante, manta aquecedora e termômetro digital para o controle da temperatura. As etapas desenvolvidas seguiram a sequência descrita na seção 3.2

Figura 11 – Misturador mecânico empregado no estudo.



Fonte: AUTOR, 2019.

A produção das misturas do ligante asfáltico seguiu uma metodologia elaborada pelo autor, que ao realizar vários ensaios durante a fase de estudo deste trabalho, criou uma sequência de etapas para essa produção das misturas:

ETAPA 1: O CAP 50/70 foi aquecido em estufa à uma temperatura de 175°C durante 30 minutos, de forma que o material obtivesse uma consistência fluida.

ETAPA 2: Se transferiu 500ml do CAP 50/70 previamente aquecido para um béquer, após inserindo-o em manta aquecedora e com o auxílio de um termômetro aguardou a estabilização da temperatura de ensaio (180°C).

ETAPA 3: A borracha moída foi aquecida em estufa com uma temperatura de 50°C durante um tempo de 30 minutos, para que fosse eliminado qualquer vestígio de umidade no material, para que não comprometer a mistura asfáltica.

ETAPA 4: Com o misturador mecânico em uma rotação de 500rpm adicionou-se a percentagem de borracha moída (13% e 15%) e posteriormente a percentagem de PEAD (1, 2 e 3%) ao CAP 50/70, de modo a não ultrapassar 10 minutos essa fase de adição de materiais.

ETAPA 5: Quando a mistura já estava totalmente homogenia (10 minutos de adição do material), aumentou-se a rotação do agitador mecânico para 1200 rpm, onde a mistura ficou em processo por um tempo de 30 minutos.

ETAPA 6: Ao concluir-se o período de mistura mecânica entre asfalto-borracha-polietileno se realizou os ensaios convencionais, reológicos e térmicos com o material produzido.

3.3.2 Ensaios convencionais para caracterização dos CAP's

Os CAP's foram avaliados considerando:

- Ensaio de penetração;
- Ensaio do ponto de amolecimento;
- Ensaio do ponto de fulgor.

a) Ensaio de penetração

O ensaio seguiu os procedimentos descritos na DNIT 155/2010-ME, que tem por finalidade determinar a profundidade em décimas de milímetros, que uma agulha padrão penetra verticalmente a amostra de material asfáltico. Desta forma determina-se a consistência do CAP e sua respectiva classificação segundo a norma DNIT 095/2006-EM. Foram observadas as seguintes condições para esse ensaio: 100g de carga aplicada sobre a amostra, tempo de 5 s e temperatura de 25°C. Este ensaio foi realizado somente para amostras de CAP 50/70 convencional em estado não envelhecido e envelhecido em curto prazo com a estufa de filme fino rotativo (RTFOT).

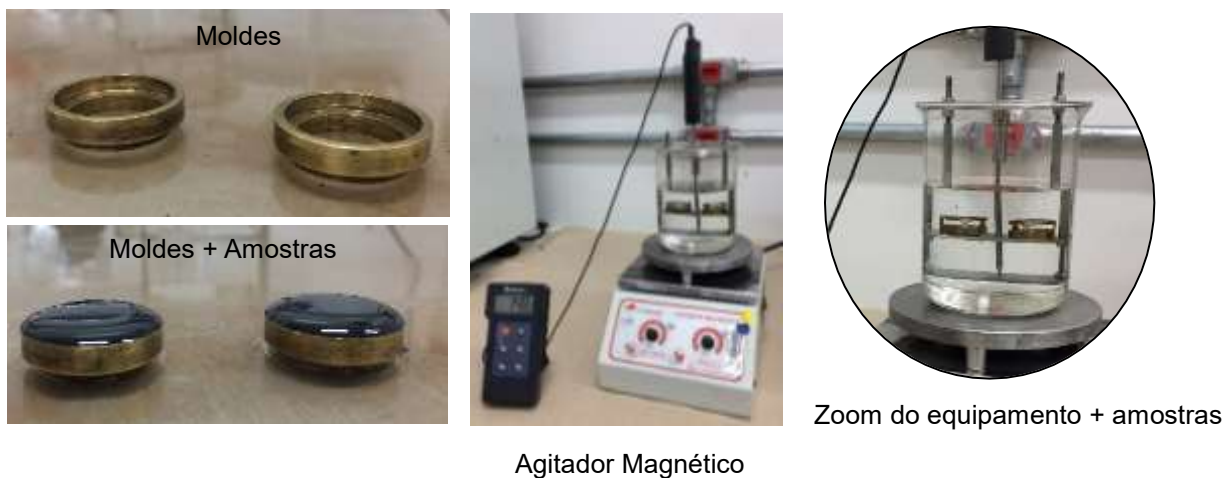
Durante a modificação do CAP convencional com borracha moída de

pneus, as partículas aumentam de volume e não se dissolvem no CAP. Assim, quanto maior a percentagem de borracha adicionada ao CAP, maior será a interferência durante a penetração da agulha padrão. Desta forma, a diferença entre o maior e o menor valor de penetração numa amostra supera o valor indicado na norma DNIT 155/2010-ME. Haja vista a situação apresentada decidiu-se não realizar ensaios de penetração para CAP's modificados com borracha + PEAD.

b) Ensaio do ponto de amolecimento

O ensaio foi realizado conforme os procedimentos das normas DNIT 131/2010-ME e ABNT NBR 6560/2016. Este ensaio, também conhecido como ensaio de Anel e bola (Figura 12), tem por objetivo a determinação da temperatura de amolecimento de um CAP quando a amostra imersa em um banho é submetida a aquecimento gradual.

Figura 12 – Sistema de ensaio do ponto de amolecimento (anel e bola).

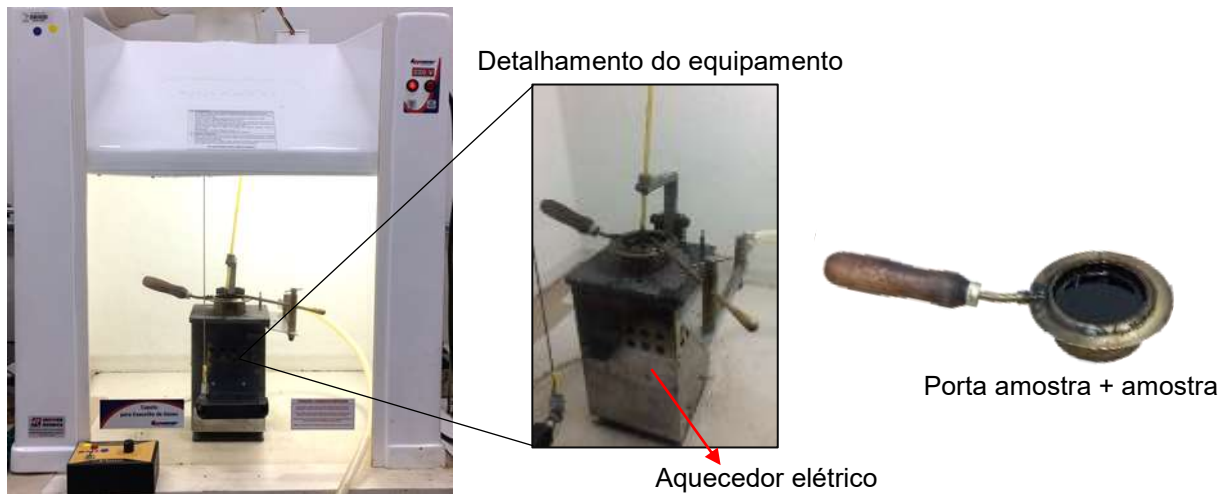


Fonte: AUTOR, 2019.

c) Ensaio do ponto de fulgor

O ensaio foi efetuado conforme recomendações da Norma ABNT NBR 11341/2014. Neste caso o objetivo do ensaio é a determinação da temperatura de inflamação do CAP continuamente aquecido, a partir do momento em que os gases inflamáveis são liberados pela amostra. O ensaio relaciona-se às condições de segurança durante a estocagem e usinagem de misturas asfálticas aquecidas (Figura 13).

Figura 13 – Equipamento para o ensaio do ponto de fulgor.



Fonte: Autor, 2019.

3.3.3 Ensaios reológicos para caracterização dos CAP's

Dentre os ensaios reológicos indicados pela metodologia Superpave, foram considerados neste estudo os seguintes:

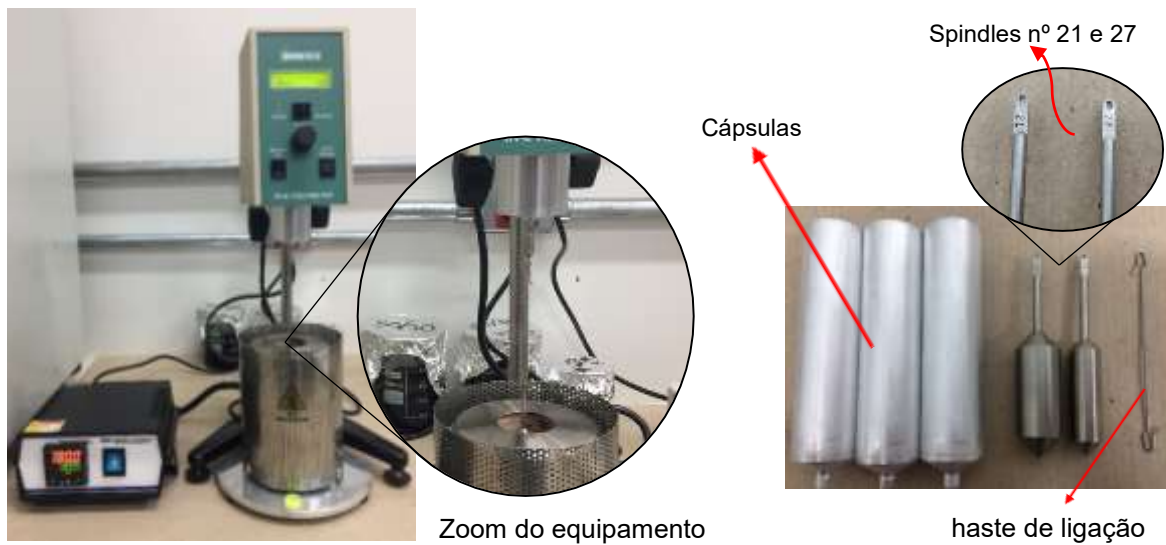
- Viscosidade rotacional Brookfield;
- Cisalhamento Dinâmico;
- Fluência em Viga;
- Envelhecimento de curto prazo.

a) Viscosidade rotacional Brookfield

O ensaio seguiu as normas ABNT NBR 15529/2007, DNIT 111/2009 - EM, ASTM D2196/2018E1 e ASTM D4402/2015. Este ensaio permite determinar a consistência do CAP mediante resistência ao escoamento. Essa viscosidade está relacionada ao bombeamento e transporte do CAP, assim como à usinagem e compactação de uma mistura asfáltica.

Neste trabalho utilizou-se um viscosímetro Brookfield modelo RV-DVE com spindle nº 21 para CAP não modificado, spindle nº 27 para CAP's modificados, rotação de 20 RPM e termocélula aquecedora para garantir a estabilidade da temperatura de ensaio (Figura 14).

Figura 14 – Equipamento para o ensaio de viscosidade rotacional Brookfield.

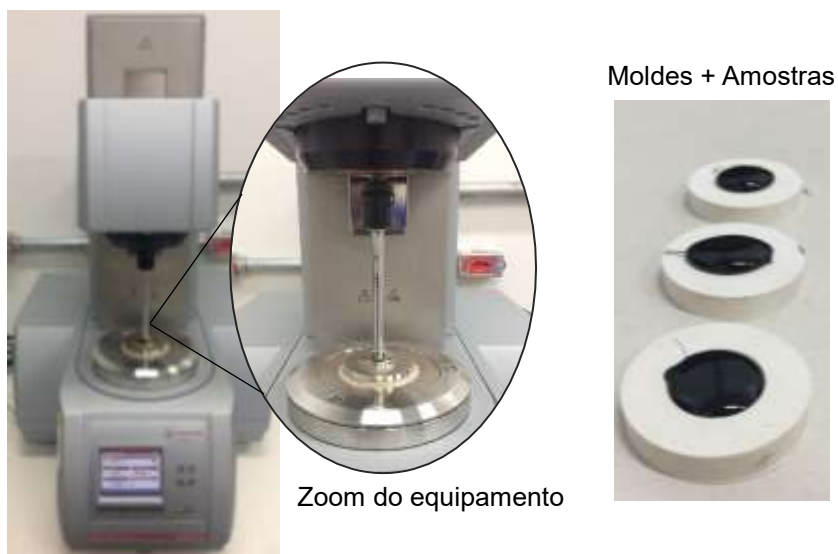


Fonte: AUTOR, 2019.

b) Cisalhamento Dinâmico (DSR)

Para a realização deste ensaio foram consideradas as normas ASTM D7175/2015, ASTM D6373/2016 e AASHTO T315/2012. Este ensaio permite caracterizar as propriedades viscoelásticas do CAP em temperaturas altas e em intermediárias, a partir da determinação do módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ). Para ensaios em altas temperaturas são utilizados pratos circulares de 25mm de diâmetro e afastamento de 1mm entre o prato superior e o prato inferior (Figura 15).

Figura 15 – Detalhamento do ensaio utilizando o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).



Fonte: AUTOR, 2019.

Na metodologia Superpave, em altas temperaturas as duas variáveis mencionadas podem ser consideradas conjuntamente a partir do quociente entre ambas. O valor desse quociente indicará o desempenho do CAP do ponto de vista da resistência ao afundamento de trilha de roda. Assim, CAP's não envelhecidos devem apresentar $|G^*|/\text{Sen}(\delta) > 1,00 \text{ kPa}$ e CAP's envelhecidos em curto prazo devem apresentar $|G^*|/\text{Sen}(\delta) > 2,20 \text{ kPa}$.

c) Fluência em Viga (BBR)

Neste caso os ensaios foram efetuados considerando as normas ASTM D6648-08/2016 e AASHTO T313/2012. Este ensaio tem por objetivo a caracterização da rigidez de um CAP em baixas temperaturas a partir da determinação da rigidez estática (S) e do módulo de relaxação (valor m) em um tempo pré-determinado de 60 segundos, onde a rigidez deve ser menor que 300 MPa e o módulo de relaxação deve ser maior que 0,3 (Figura 16).

Figura 16 – Detalhamento do ensaio utilizando o Reômetro de Fluência em Viga (BBR).



Fonte: AUTOR, 2019.

Durante o ensaio aplica-se uma carga constante no centro de uma viga prismática biapoada (125mm×12,70mm×6,35mm). Conhecendo a carga aplicada sobre a viga e medindo-se a deflexão ao longo do ensaio, determina-se a rigidez estática (S) a partir dos fundamentos da mecânica dos materiais.

d) Envelhecimento de curto prazo com Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT)

Este ensaio também conhecido como ensaio de película delgada rotacional seguiu as normas ABNT NBR 15235/2009 e ASTM D2872/2019. Neste caso amostras de CAP são submetidas ao envelhecimento mediante calor (temperatura de ensaio de 163°C) e ar (ar comprimido injetado) durante um período pré-determinado de tempo (85 minutos). Assim, é possível simular em laboratório a oxidação e evaporação experimentada pelo CAP durante a usinagem, espalhamento e compactação numa mistura asfáltica (Figura 17).

Figura 17 – Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT).

Antes Ensaio (35 g) Após



Fonte: AUTOR, 2019



3.3.4 Ensaios térmicos

Os ensaios termogravimétricos e de calorimetria exploratória diferencial foram realizados em um termo-analisador modelo STA 8000 da marca Percking Elemer, para amostras constituídas por CAP 50/70 convencional + PEAD em diferentes teores, assim como para o compósito final (CAP 50/70 convencional + Borracha moída + PEAD particulado).

Os ensaios foram realizados em porta amostra de alumina, com aproximadamente 15 mg de amostra. O programa de temperatura constou de um processo isotérmico a 50°C durante 5 minutos e uma varredura de temperatura entre 50 e 650°C, sendo a razão de aquecimento igual a 20°C.min⁻¹. Todas as análises foram conduzidas sob atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo de 20 mL.min⁻¹ (Figura 18).

Figura 18 – Analisador termogravimétrico.



Zoom das amostras em análise



Fonte: AUTOR, 2019.

3.3.5 Análise estatística

A partir dos resultados obtidos nos ensaios do ponto de amolecimento, ensaio de cisalhamento dinâmico e ensaio de fluência em viga, foram realizadas análises de regressão linear múltipla (breve revisão de conceitos de estatística disponível no Apêndice A). Desta forma, as equações de regressão cujas variáveis independentes foram avaliadas a partir dos valores-p calculados. Assim, foi possível identificar a significância estatística destas para um dado nível de confiança, pois valores-p iguais ou superiores a α (nível de significância do teste) indicam que as variáveis de estudo não são estatisticamente significativas.

As contribuições de cada variável independente, estatisticamente significativas, foram obtidas mediante análise de regressão múltipla tipo "stepwise". Esta técnica consiste em selecionar a variável independente mais correlacionada com Y e encontrar a equação de regressão linear de primeira ordem entre Y e esta variável independente. Em seguida seleciona-se a segunda variável independente para entrar na equação (ou modelo estatístico) baseando-se no coeficiente de correlação parcial; esta variável será aquela que apresentar o maior coeficiente de correlação parcial com a variável dependente (Y). Obtém-se uma equação de Y como sendo função destas duas variáveis. Como próxima etapa, examina-se a contribuição da primeira variável selecionada como se ela tivesse entrado no modelo após a inclusão da segunda variável. Caso seja significativa em um determinado nível, ela é mantida no modelo. Dando prosseguimento, seleciona-se a terceira variável mais correlacionada com a variável dependente, dada a condição de que duas variáveis já estão no modelo. Novo teste é

feito para a primeira variável selecionada visando determinar se ela permanece no modelo, considerando que a segunda e a terceira já estão nele. O mesmo é feito para a segunda variável selecionada admitindo que a primeira e a terceira já pertencem ao modelo. Qualquer variável que apresente uma contribuição não significativa é removida dele. O processo é continuado até que mais nenhuma variável seja admitida ou rejeitada. As análises de regressão múltipla tipo "Stepwise" foram desenvolvidas utilizando-se o subprograma "Linear Regression", componente do software XLSTAT - Versão 2010.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

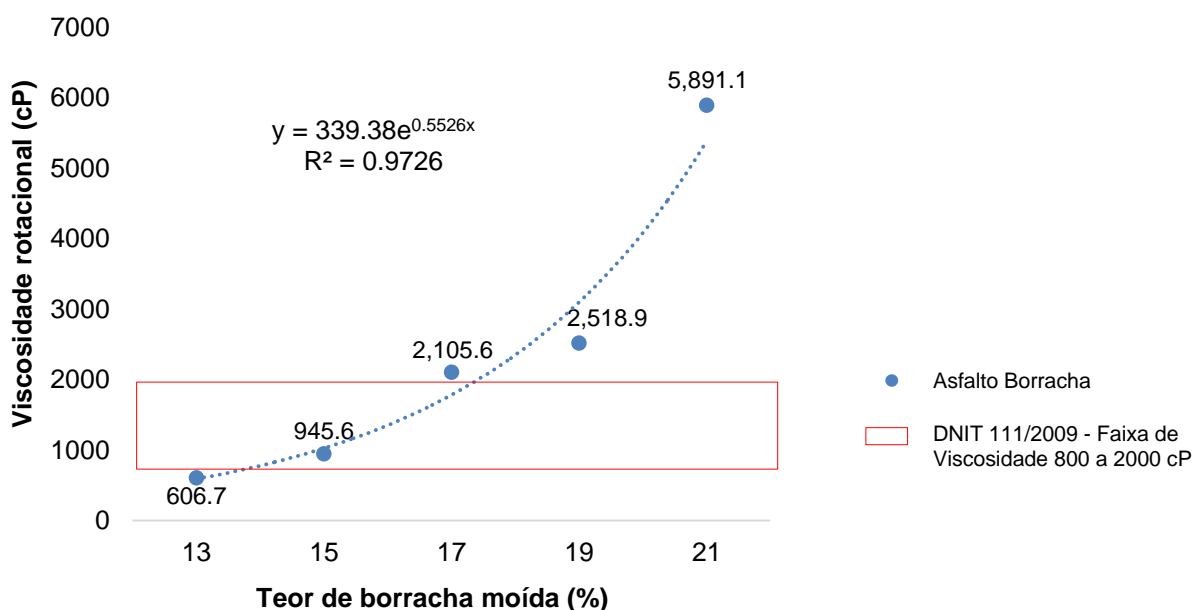
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do estudo preliminar e resultados finais obtidos por meio dos ensaios convencionais, reológicos e termogravimétricos, para o CAP convencional e CAP's modificados com borracha moída de pneus + polietileno de alta densidade (PEAD) particulado.

4.1 ESTUDO PRELIMINAR

Inicialmente foi realizado estudo preliminar de viscosidade rotacional do CAP modificado com borracha de pneus e CAP modificado com borracha de pneus+PEAD de modo a identificar quais as percentagens de adição de borracha de pneus e percentagens de adição de PEAD produziam viscosidades rotacionais entre 800 e 2000 cP conforme preconizado pela norma DNIT 111/2009 para CAP's modificados com borracha.

Observa-se (Figura 19) que a adição de maiores teores de borracha moída de pneus resulta em acréscimo exponencial da viscosidade rotacional. Além disso, para adição de 17, 19 e 21% de borracha moída, as viscosidades rotacionais superaram 2000 cP, valor limite para esse parâmetro segundo a norma DNIT 111/2009-EM. Desta forma, teores de adição de 17, 19 e 21% foram descartados nas análises seguintes.

Figura 19 – Estudo da viscosidade do CAP 50/70 convencional + teores de borracha.



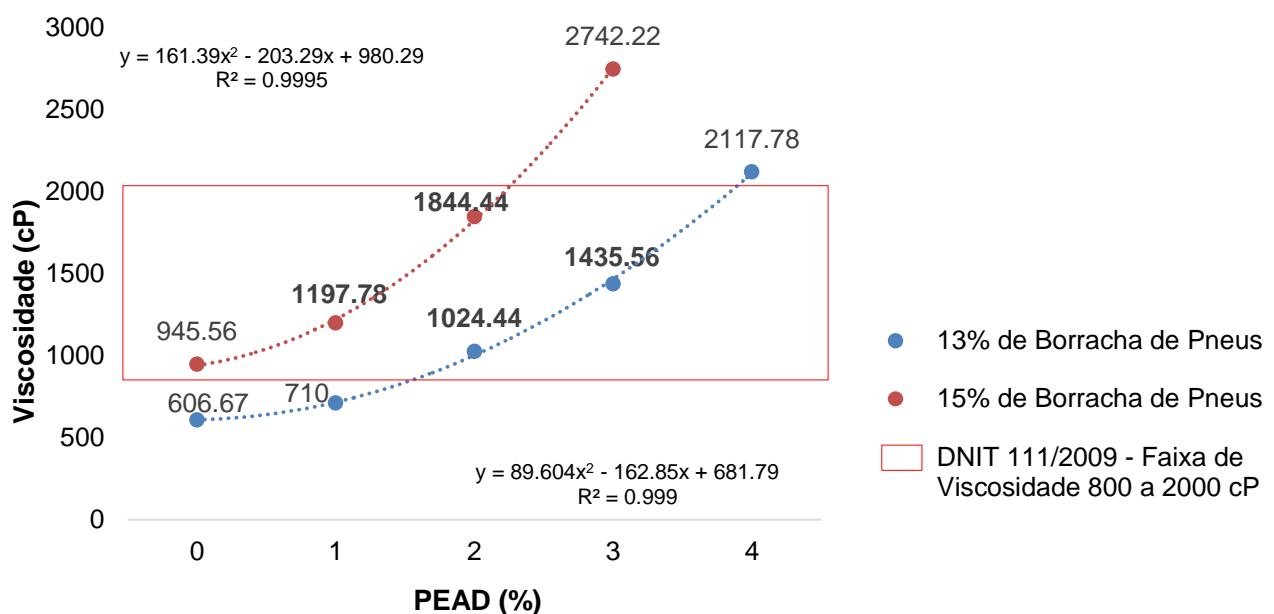
Por outro lado, conforme ilustrado na Figura 19, a adição de 13% de borracha resulta em CAP modificado com viscosidade rotacional ligeiramente inferior a 800 cP enquanto a adição de 15% de borracha produziu viscosidade ligeiramente superior a 800 cP, valor mínimo requerido pela norma DNIT 111/2009-EM.

Segundo Bernucci et al. (2006), ligantes demasiado fluidos causam perdas de agregados nas misturas asfálticas além de prejuízo na aderência pneu/revestimento asfáltico. Assim, para aumentar a viscosidade rotacional dos CAP's modificados com 13 e 15% de borracha, foi avaliada a possibilidade de utilização de Polietileno de Elevada Densidade (PEAD). Nesse sentido, foram avaliados respectivamente, teores de adição de PEAD particulado de 1, 2, 3 e 4%.

A Figura 20 apresenta as viscosidades rotacionais obtidas para CAP 50/70 convencional + borracha moída de pneus + PEAD. À medida que aumentam os teores de PEAD particulado, aumentam as viscosidades dos CAP's modificados com borracha moída de pneus.

Por outro lado, considerando a norma DNIT 111/2009-EM, modificações do CAP 50/70 convencional com 13% de borracha + 1% de PEAD e 13% de borracha + 2% de PEAD apresentaram viscosidades inferiores a 800 cP enquanto a modificação com 13% de borracha + 4% de PEAD apresentou valor superior a 2000 cP. Para modificações do CAP 50/70 convencional com 15% de borracha + 3% de PEAD, a viscosidade rotacional apresentou valor superior a 2000 cP.

Figura 20 – Estudo da viscosidade entre CAP 50/70 + 13% borracha + teores de PEAD e CAP 50/70 + 15% borracha + teores de PEAD.



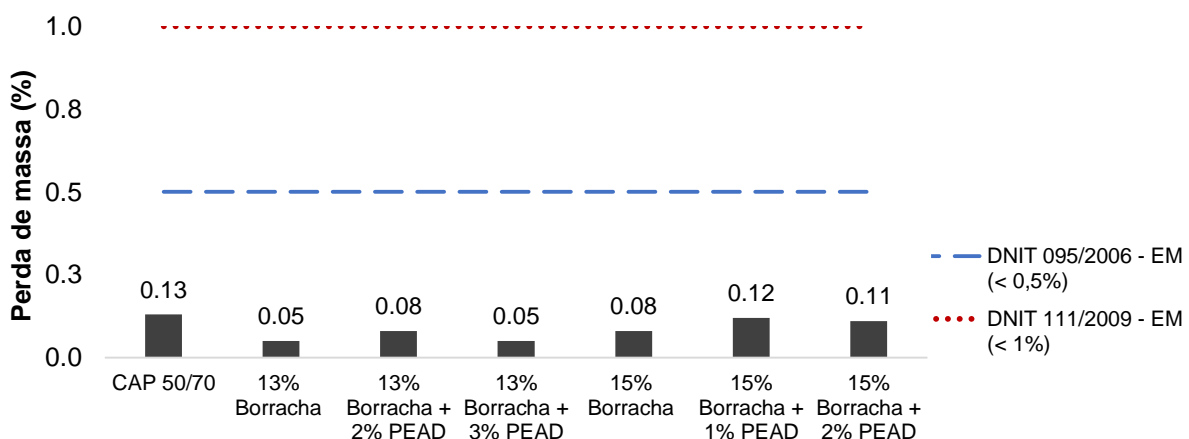
4.2 AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA

A avaliação da perda de massa do CAP foi feita a partir do ensaio de envelhecimento de curto prazo na estufa de filme fino rotativo (RTFOT). Neste ensaio procura-se quantificar o efeito da ação do calor e do ar no CAP, ao ponto de degradar e reduzir a matéria, implicando em alterações na composição e nas propriedades reológicas do material. Essa degradação pode causar aumento na viscosidade e na rigidez do CAP (CRAVO, 2016).

Usinagem, aplicação e compactação da mistura asfáltica, são processos que oxidam o ligante asfáltico em serviço, o envelhecimento de curto prazo (RTFOT) simula esses processos, de modo que o procedimento retorna a variação da perda de massa do material. Um outro ponto importante é de que os ensaios convencionais, reológicos e térmicos precisam ser previstos sobre a ótica da condição envelhecida (SANTOS, 2017).

Neste estudo foram avaliados CAP 50/70 convencional, CAP 50/70 convencional + 13% de borracha + 3% de PEAD, CAP 50/70 convencional + 15% de borracha + 1% de PEAD e CAP 50/70 convencional + 15% de borracha + 2% de PEAD. Para cada tipo de CAP foram ensaiadas duas amostras sendo então determinada a perda de massa média. Conforme ilustra a Figura 21, todos os CAP's avaliados apresentaram valores de perda de massa inferiores aos limites das normas DNIT 095/2006 – EM e DNIT 111/2009 – EM.

Figura 21 – Avaliação da perda de massa dos CAP's.



Também se observou que os CAP's modificados apenas com borracha de pneus apresentaram em média 50% menos de perda de massa comparado ao CAP 50/70 convencional, ou seja, a presença da borracha inibiu significativamente a volatilização. Quando se analisam os CAP's com 13% de borracha de pneus e respectivamente, 2% e 3% de PEAD, também se verificou em média 50% de queda na volatilização comparado ao CAP 50/70 convencional, ou seja, a presença de PEAD particulado não teve efeito na modificação do CAP+13% de borracha. No entanto, quando se avaliam os CAP's com 15% de borracha de pneus e respectivamente, 1% e 2% de PEAD particulado, foram constatadas perdas de massa da mesma ordem de grandeza daquela observada para o CAP 50/70 convencional. Assim, a adição de PEAD neutralizou o ganho em termos de perda de massa observado quando da adição de apenas 15% de borracha. Por outro lado, para os teores de adição de borracha de pneus e PEAD particulado considerados, não houve acréscimo de volatilização (degradação) comparado ao CAP 50/70 convencional.

4.3 ENSAIOS CONVENCIONAIS

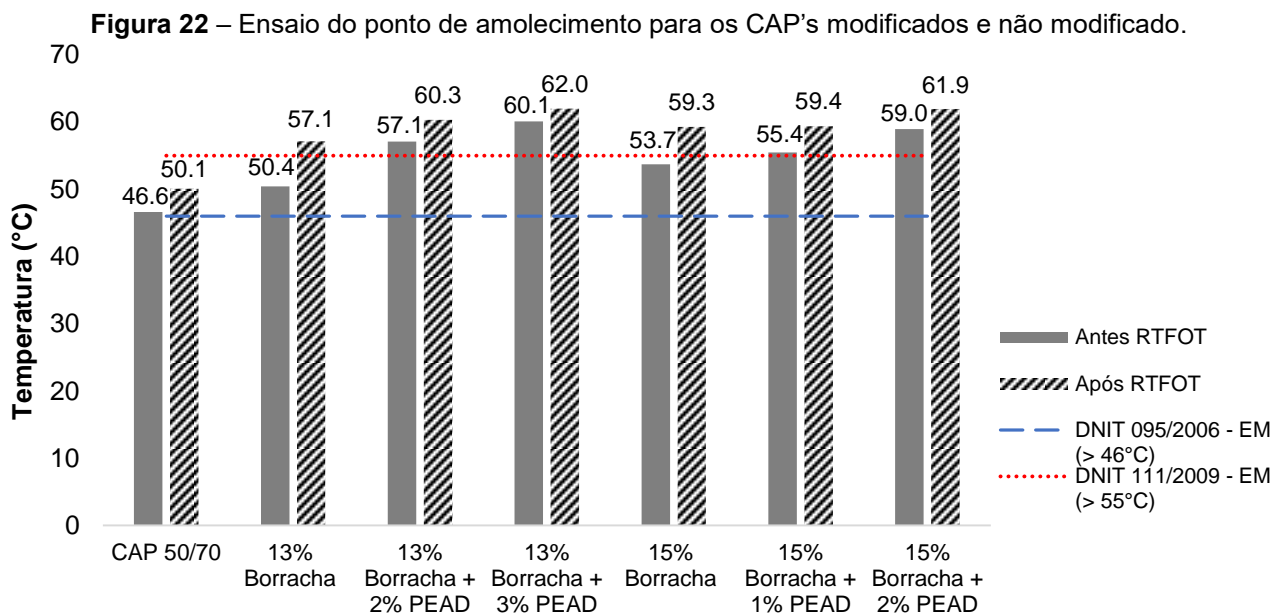
4.3.1 Ensaio do ponto de amolecimento

Este ensaio está relacionado à resistência do CAP à deformação permanente em altas temperaturas. Para cada tipo de CAP avaliado foram ensaiadas três amostras sendo então determinada a temperatura média do ponto de amolecimento. Conforme ilustra a Figura 22, as temperaturas de amolecimento para o CAP 50/70 convencional atenderam o valor mínimo de 46°C requerido na norma DNIT 095/2006-ME, observando-se um aumento da consistência e da resistência à deformação permanente após o envelhecimento RTFOT. Para Dantas Neto (2004) a evaporação das frações leves e a oxidação com o tempo e temperatura de exposição, faz com que ocorra um endurecimento do ligante asfáltico convencional. Deste modo, o valor relativamente baixo para o CAP 50/70 pode ser justificado, pelo fato que o ligante base deste estudo, foi adquirido há quase um ano (meados de 2018), e ao se aquecer, pode ter ocorrido tal evaporação e oxidação, e assim tenha sofrido um envelhecimento leve (enrijecimento) devido a esse possível motivo.

Considerando os CAP's modificados e não envelhecidos, respectivamente, com 13% e 15% de borracha, constatou-se que a temperatura mínima

de 55°C requerida na norma DNIT 111/2009-EM não foi atingida. Porém após o envelhecimento de curto prazo, observou-se aumento na temperatura de amolecimento (atendimento da norma DNIT 111/2009-EM) com o consequente ganho de consistência e resistência à deformação permanente.

Por outro lado, analisando os CAP's modificados e não envelhecidos com borracha de pneus + PEAD particulado, se verificou que todos atenderam a temperatura mínima de 55°C para o amolecimento (norma DNIT 111/2009-EM), ou seja, a presença de PEAD contribuiu para o aumento da consistência. Além disso, o aumento no teor de PEAD resultou em incremento na temperatura de amolecimento e, por conseguinte da consistência e resistência à deformação permanente. Após o envelhecimento de curto prazo, houve ligeiro aumento nas temperaturas de amolecimento, ou seja, a presença de PEAD particulado não provocou enrijecimento excessivo nos CAP's modificados.



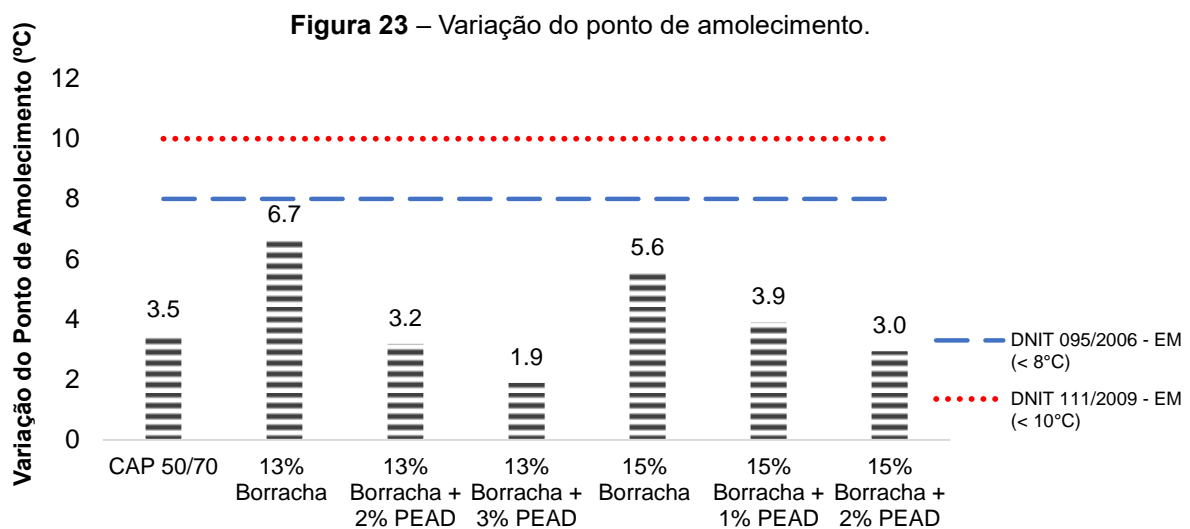
Para Oda (2000), Dantas Neto (2004) e Souza (2006) ao se adicionar teores com maior concentração de borracha de pneus na mistura entre ligante e modificador, pode apresenta uma forte indicação de maior resistência a deformações permanentes em temperaturas altas e intermediárias. De modo que ao se adicionar o modificador a taxa de envelhecimento tornasse menor em relação ao ligante base.

Gibreil e Feng (2017) apresentam em seu estudo um aumento de 44% quando modificado com 5% de PEAD e 10% de borracha de pneus em relação a modificação base entre ligante asfáltico e PEAD, assim, ao se adicionar os modificadores (PEAD + borracha) resultou em uma melhoria na resistência à deformação em

temperaturas moderadas e altas.

As normas DNIT 095/2006 – ME para CAP's convencionais e DNIT 111/2009 – ME para CAP's modificados com borracha moída de pneus também apresentam requisitos para a diferença de temperatura observada antes e após o envelhecimento de curto prazo.

Conforme ilustra a Figura 23, o CAP 50/70 convencional e os CAP's modificados com borracha moída de pneus + PEAD particulado apresentaram variações de temperatura de amolecimento inferiores aos limites indicados nas normas. Além disso, a adição de PEAD particulado aos CAP's + borrachas contribuiu para reduzir essa variação de temperatura. Também se constatou queda nas diferenças de temperaturas de amolecimento antes e após o envelhecimento à medida que aumentou o teor de PEAD adicionado. Assim, a presença de PEAD particulado contribuiu na diminuição do enrijecimento devido ao envelhecimento dos CAP's modificados.

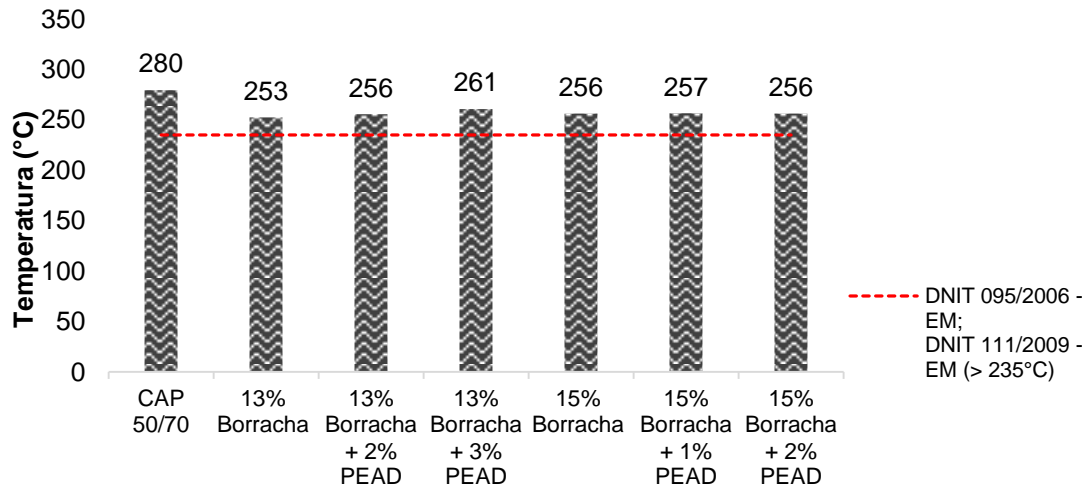


4.3.2 Ensaio do ponto de fulgor

Este ensaio se relaciona com a temperatura de inflamação do CAP em presença de uma centelha (DNIT 095/2006 – EM e a DNIT 111/2009 – EM). Para cada tipo de CAP avaliado foram ensaiadas três amostras sendo então determinada a temperatura média do ponto de fulgor. A Figura 24 apresenta as temperaturas de inflamação obtidas. Foi constatada diminuição das temperaturas de inflamação para os CAP's modificados com borracha e CAP's modificados com borracha + PEAD

particulado. Apesar disso, essas temperaturas atenderam o valor mínimo de 235°C requerido nas normas mencionadas, portanto, não há risco para estocagem e usinagem de misturas asfálticas.

Figura 24 – Temperatura de inflação para os CAP's modificados no ensaio do ponto de fulgor.



Para Oda (2000) ao se aquecer o ligante asfáltico em uma temperatura muito elevada, pode vir a ocorrer a liberação de contaminantes. Tais gases ao entrar em contato com ar e na precipitação de uma chama podem vir a provocar um incêndio ou até mesmo uma explosão. Além disso, este ponto de ignição está também totalmente ligado ao transporte, estocagem do produto e sua usinagem. Apesar de ser um ensaio relativamente simples, muitas vezes não é realizado, assim não havendo uma verificação de qual seria a temperatura limite para o aquecimento, assim causando muitas vezes uma oxidação desnecessária ao material asfáltico, e antes mesmo de ser empregado em serviço, já ocorre um envelhecimento.

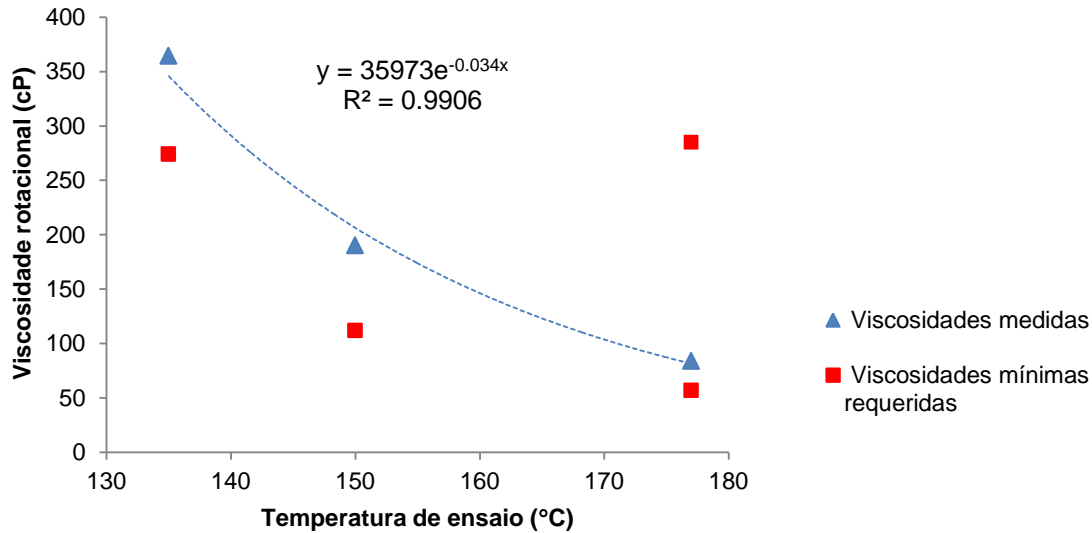
4.4 ENSAIOS REOLÓGICOS

4.4.1 Ensaio de viscosidade rotacional Brookfield

A viscosidade rotacional Brookfield é importante do ponto de vista do bombeamento do CAP, usinagem da mistura asfáltica, transporte e compactação desta em campo. Para cada tipo de CAP avaliado foram ensaiadas três amostras sendo então determinada a viscosidade rotacional média. Conforme ilustra a Figura 25, as viscosidades rotacionais Brookfield medidas a 135°C, 150°C e 177°C para o CAP 50/70

convencional atenderam os requisitos da norma DNIT 095/2006.

Figura 25 – Viscosidade rotacional Brookfield para o CAP 50/70 convencional.



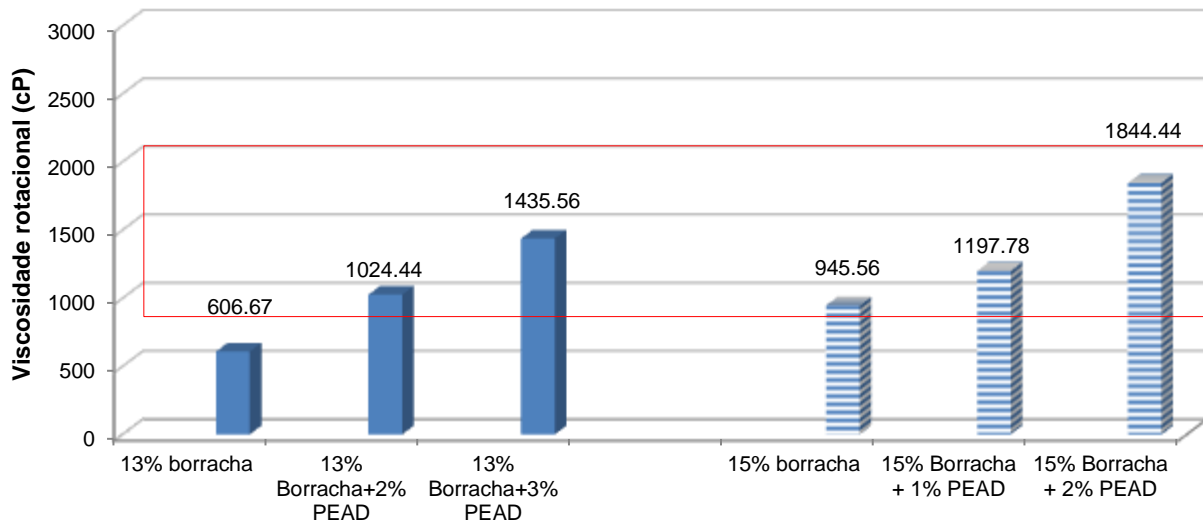
A Figura 26 exhibe as viscosidades rotacionais Brookfield obtidas para os CAP's modificados. Foi constatado aumento das viscosidades rotacionais à medida que se incrementou o teor de PEAD particulado adicionado, ou seja, a adição de PEAD particulado aumentou a consistência dos CAP's modificados. Além disso, observou-se que o CAP 50/70 convencional + 13% de borracha e CAP 50/70 convencional + 13% de borracha + 1% de PEAD não atingiram o valor mínimo de 800 cP requerido pela DNIT 111/2009 – EM enquanto os CAP's 50/70 convencional + 13% de borracha + 4% de PEAD e CAP 50/70 convencional + 15% de borracha + 3% de PEAD superaram o valor máximo de 2000 cP indicado na norma DNIT 111/2009 – EM.

Para Santos (2017) a viscosidade rotacional influencia diretamente no recobrimento dos agregados da mistura e em sua trabalhabilidade em serviço. O estudo da viscosidade tem fundamental importância de modo que, para uma viscosidade elevada se requer uma temperatura elevada, podendo assim ser inviável tal uso desse material como modificador asfáltico.

Uma alta viscosidade do ligante asfáltico faz com que o mesmo proporcione uma película mais espessa sobre os agregados da mistura asfáltica, esta por sua vez, possibilita um aumento significativo na resistência ao envelhecimento e uma alta durabilidade do material (LI et al., 2018). O autor frisa em seu estudo que para a produção de asfalto-borracha deve ser levar alguns parâmetros em consideração, tais esses, como a temperatura de produção da mistura deva ser em torno de 180°C e um tempo máximo

de 90 minutos, isso corrobora com o procedimento usado neste estudo.

Figura 26 – Viscosidade rotacional Brookfield para os CAP's modificados.



4.4.2 Ensaio de Cisalhamento Dinâmico

O ensaio de cisalhamento dinâmico efetuado em altas temperaturas (a partir dos 46°C) permitiu a determinação dos módulos complexos de cisalhamento ($|G^*|$), ângulos de fase (δ) e quocientes $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$. Foram avaliados CAP's modificados e não modificados, envelhecidos e não envelhecidos em curto prazo. Para cada tipo de CAP avaliado foram ensaiadas três amostras sendo então determinados os valores médios do módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$), ângulo de fase (δ) e quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$. Os ensaios foram realizados até as amostras atingirem temperatura que resultasse em quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ inferior a 1,00 kPa para CAP's não envelhecidos e $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ inferior a 2,20 kPa para CAP's envelhecidos em curto prazo.

As Figuras 27 e 28 ilustram a variação dos quocientes $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ com o aumento da temperatura. Foi observado antes e após o envelhecimento, diminuição dos quocientes com o aumento da temperatura de ensaio. Também foram constatados valores de $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ envelhecidos superiores aos $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ não envelhecidos, ou seja, houve aumento da rigidez das amostras envelhecidas em curto prazo. Em ambos os casos, os CAP's com adição de borracha moída e CAP's com adição de borracha moída + PEAD particulado apresentaram valores de $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ superiores aos determinados para o CAP 50/70 convencional.

Adicionalmente, os CAP's com adição de borracha moída + PEAD particulado exibiram em todas as situações, valores de $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ ligeiramente superiores aos observados para os CAP's apenas com adição de borracha moída. Assim, a adição de PEAD particulado melhorou o desempenho em relação à deformação permanente.

Figura 27 – Quocientes $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ antes do envelhecimento.

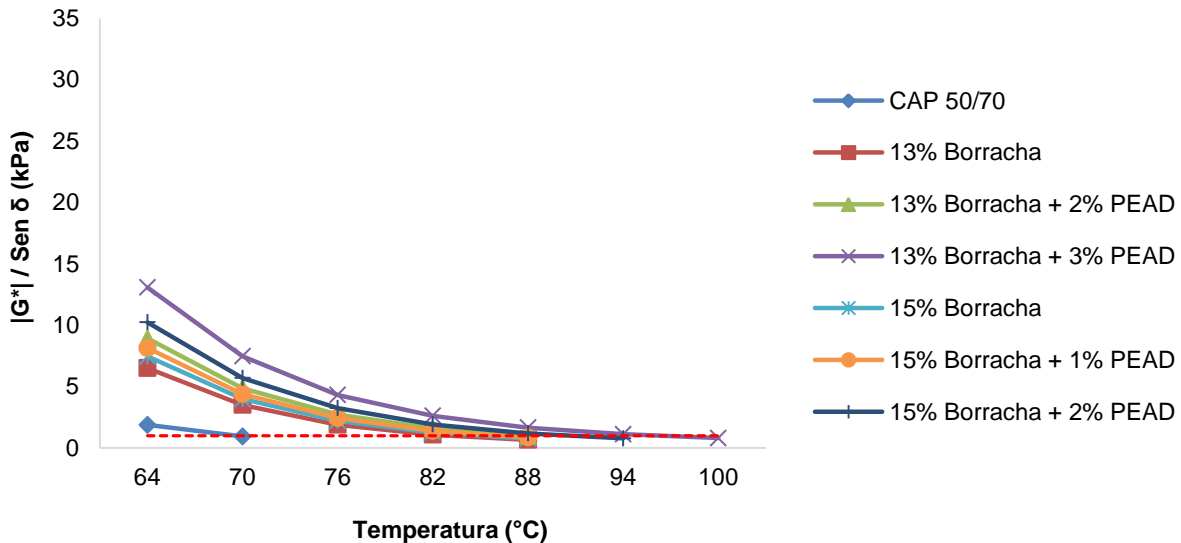
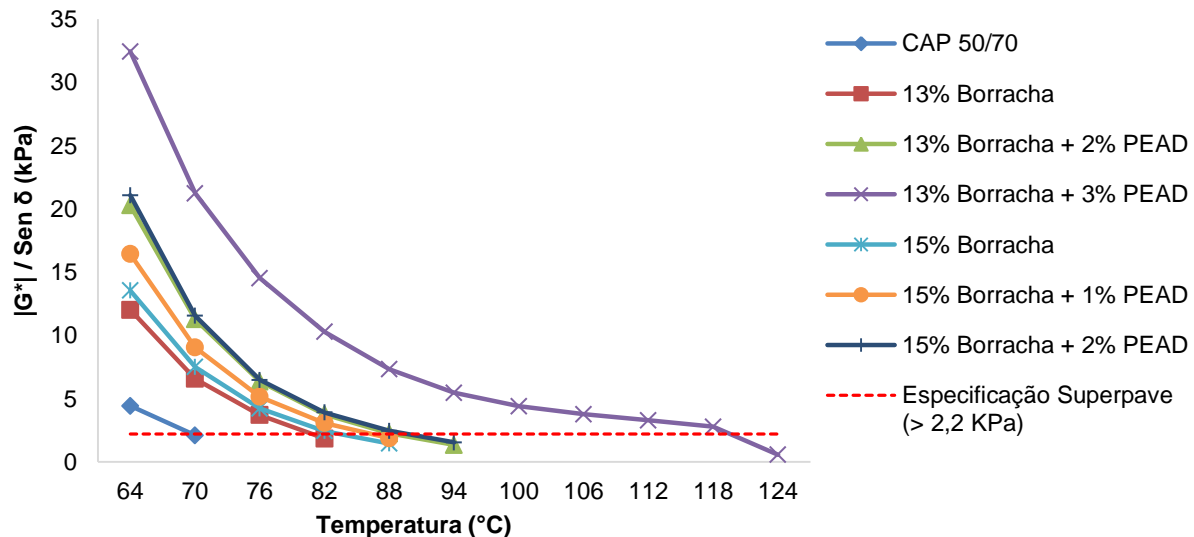


Figura 28 – Quocientes $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ após o envelhecimento de curto prazo.



Além disso, para os CAP's modificados foram alcançadas maiores temperaturas de ensaio até serem atingidos os limites indicados na especificação Superpave. Em particular, os CAP's com adição de 13% de borracha + 3% de PEAD particulado e 15% de borracha + 2% de PEAD particulado envelhecidos em curto prazo

apresentaram as maiores temperaturas de ensaio (88°C e 118°C) nas quais os quocientes $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ atenderam o requisito da especificação Superpave ($|G^*|/\text{Sen}(\delta) > 2,2 \text{ kPa}$).

Para Santos (2017) esse tipo de comportamento pode ser justificado pela interação entre “partícula-partícula” do polímero disperso (PEAD) e não obrigatoriamente à melhoria efetiva das propriedades do ligante asfáltico. Para Ge et al. (2016) ao passo que G^* aumenta e δ diminui no ligante asfáltico, isso corrobora para um aumento significativo do parâmetro $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$, de modo que se terá um material asfáltico com menor elasticidade entre tanto com uma maior resistência a deformações em altas temperaturas.

Nas Figuras 29 e 30 são apresentadas as variações do módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$) antes e após o envelhecimento de curto prazo (RTFOT).

Figura 29 – Módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$) antes do envelhecimento.

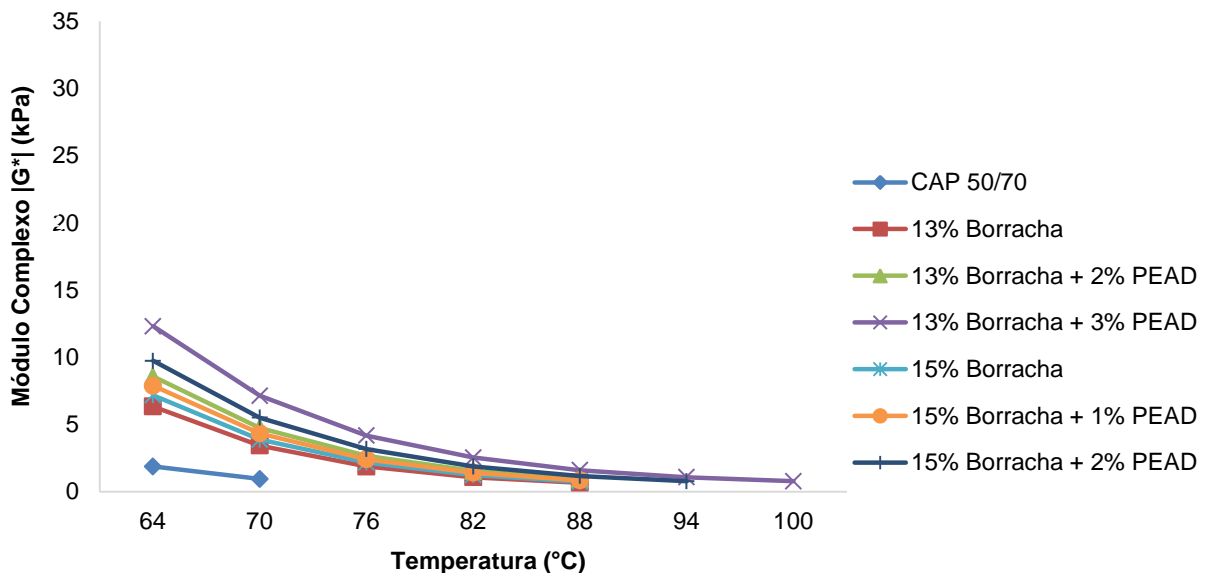
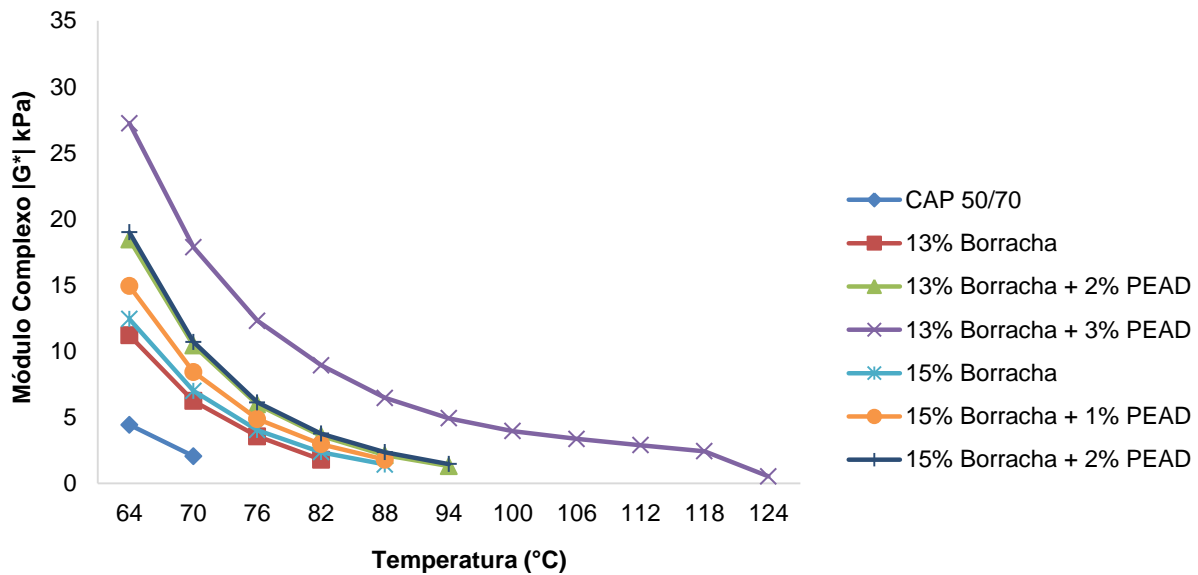


Figura 30 – Módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$) após envelhecimento de curto prazo.



Foram observados para os CAP's modificados, antes e após o envelhecimento, em todas as temperaturas de ensaio, valores de $|G^*|$ superiores aos do CAP 50/70 convencional, ou seja, as modificações do CAP aumentaram a resistência total à deformação. Considerando apenas os CAP's modificados, a presença de 13% de borracha + 3% de PEAD particulado originou as maiores resistências à deformação nas maiores temperaturas de ensaio seguido pelos CAP's com adição de 13% de borracha + 2% de PEAD e 15% de borracha + 2% de PEAD.

No estudo de Ge et al. (2016) onde foi estudado o mecanismo da modificação do ligante asfáltico com borracha de pneus (5% e 10%) e polietileno reciclado (2% e 4%), chegaram as mesmas conclusões, que ao se adicionar as maiores percentagens de polietileno, há um ganho na resistência a altas temperaturas em relação ao ligante base.

As Figuras 31 e 32 ilustram a variação do ângulo de fase (δ) antes e após o envelhecimento dos CAP's.

Todos os ângulos de fase dos CAP's modificados apresentaram valores menores que os obtidos para o CAP 50/70 convencional, ou seja, as modificações dos CAP's aumentaram a elasticidade mesmo após o envelhecimento de curto prazo. Além disso, foi constatado que a adição de PEAD particulado gerou os menores valores, em particular para a combinação 13% de borracha + 3% de PEAD.

Figura 31 – Ângulos de fase (δ) antes do envelhecimento.

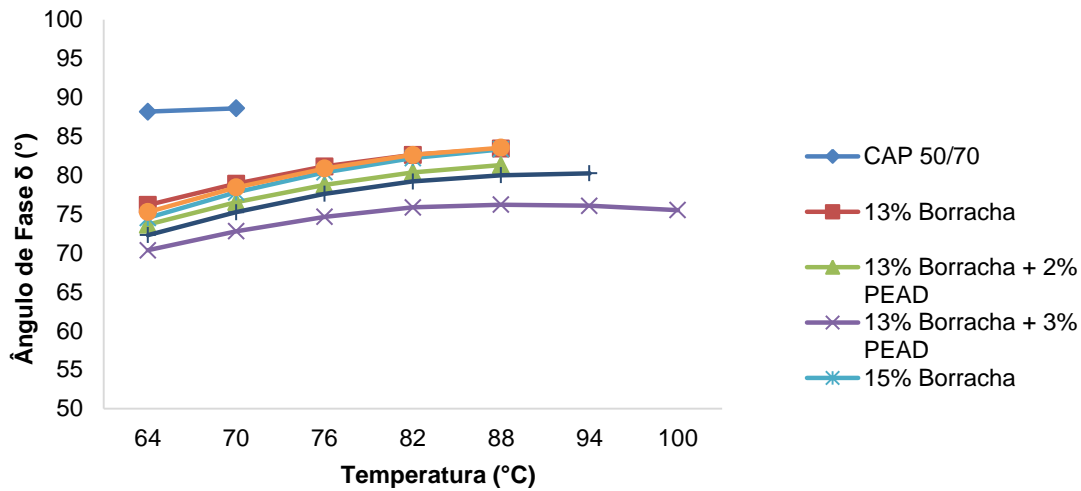
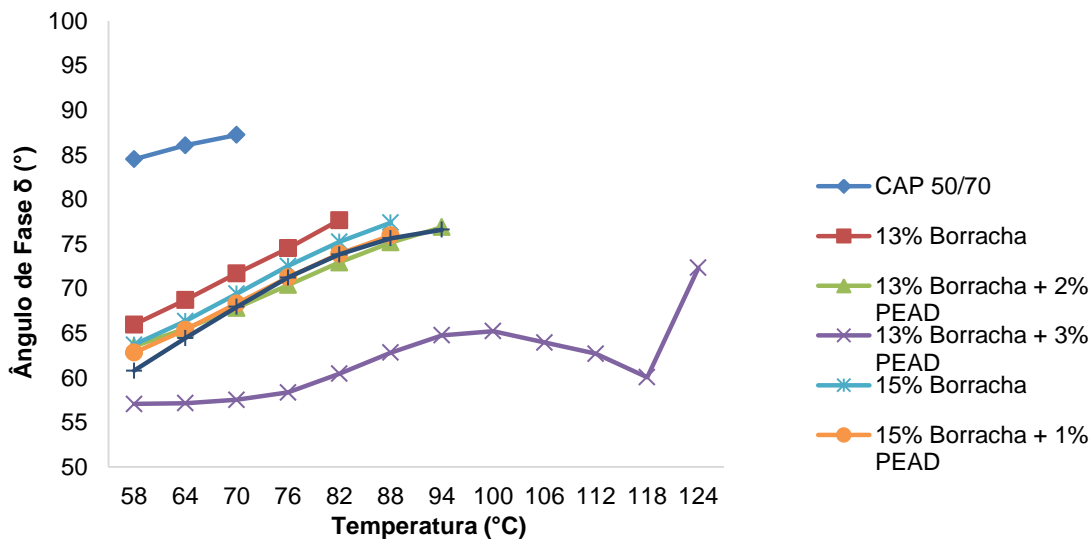


Figura 32 – Ângulos de fase (δ) após envelhecimento de curto prazo.



Durante a varredura de verificação houve dois episódios diferentes (picos de oscilação), um incremento na faixa de 70-76°C que prologou-se até a faixa de 100-106°C e o ultimo que foi incremento consideravelmente alto em 118°C. Acredita-se que o primeiro se refere a uma liberação de calor do PEAD, pois os materiais poliméricos tendem a se fundir efetivamente na mistura como um todo, deste modo liberam calor de reação, até que se funda por completo. No segundo episódio acredita-se que o PEAD se fundiu por completo na mistura asfáltica, as ocorrências desses eventos são esclarecidas na seção sobre os ensaios térmicos.

Para Ge et al. (2016) os polímeros geram uma rede elástica continua, quando misturados ao ligante asfáltico base, quando o ângulo de fase entra em uma região de estabilidade, tal estrutura pode advém principalmente das propriedades da

borracha de pneus, pois o período estável ocorre quando é adicionado o resíduo.

4.4.3 Ensaio de Fluência em Viga (BBR)

Segundo Souza (2006), um fator crítico para os ligantes asfálticos é o trincamento térmico advindo das baixas temperaturas. Ao passar do tempo, os revestimentos asfálticos tornam-se cada vez mais rígidos, desta forma reduzindo a sua capacidade de deformação.

O ensaio de fluência em viga permite avaliar a rigidez e o módulo de relaxação de um CAP em baixas temperaturas. Neste estudo foram consideradas temperaturas de -10°C , -20°C e -30°C . Para temperaturas maiores que -10°C os CAP's modificados e não modificados não apresentaram rigidez suficiente para a realização dos ensaios laboratoriais. Para cada tipo de CAP avaliado foram ensaiadas três amostras sendo então determinados os valores médios de rigidez (S) e módulos de relaxação (valor-m).

As Figuras 33 e 34 apresentam a variação da rigidez em função da temperatura de ensaio antes e após o envelhecimento de curto prazo. Foi observado que em todas as situações, a rigidez máxima de 300 MPa indicada na especificação Superpave foi atendida apenas para a temperatura de -10°C . Os CAP's modificados com borracha e com borracha + PEAD apresentaram valores de rigidez inferiores aos obtidos para o CAP 50/70 convencional sendo essas diferenças mais acentuadas nas temperaturas de -10°C e -20°C . Por outro lado, os CAP's com borracha + PEAD apresentaram valores de rigidez com a mesma ordem de grandeza que os CAP's apenas com adição de borracha.

Figura 33 – Rigidez dos CAP's antes do envelhecimento de curto prazo.

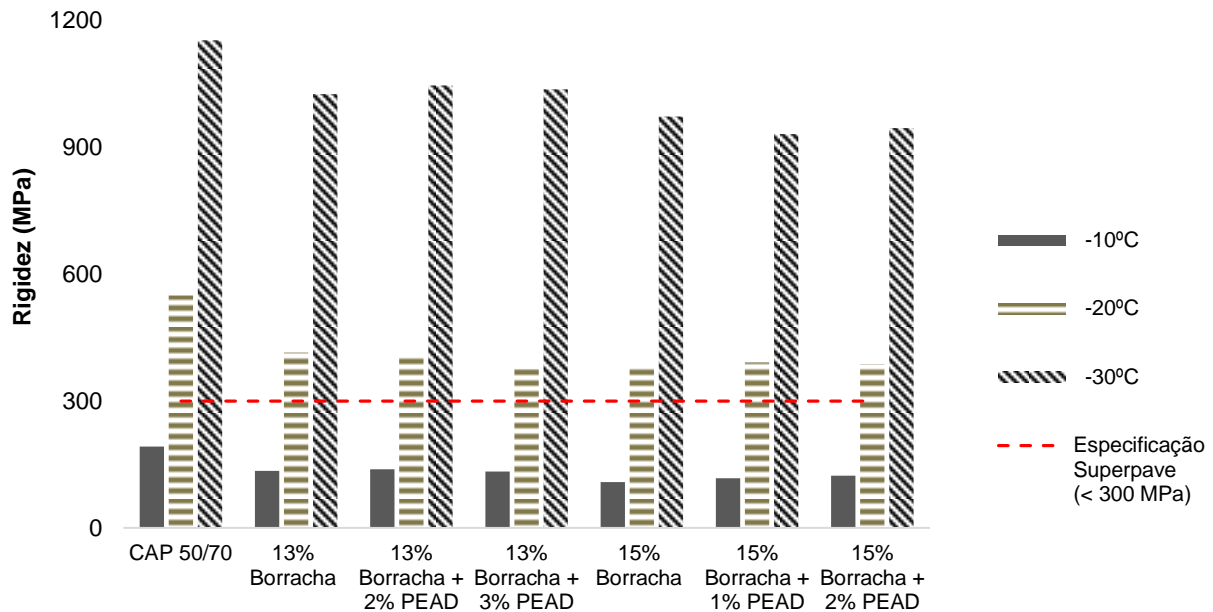
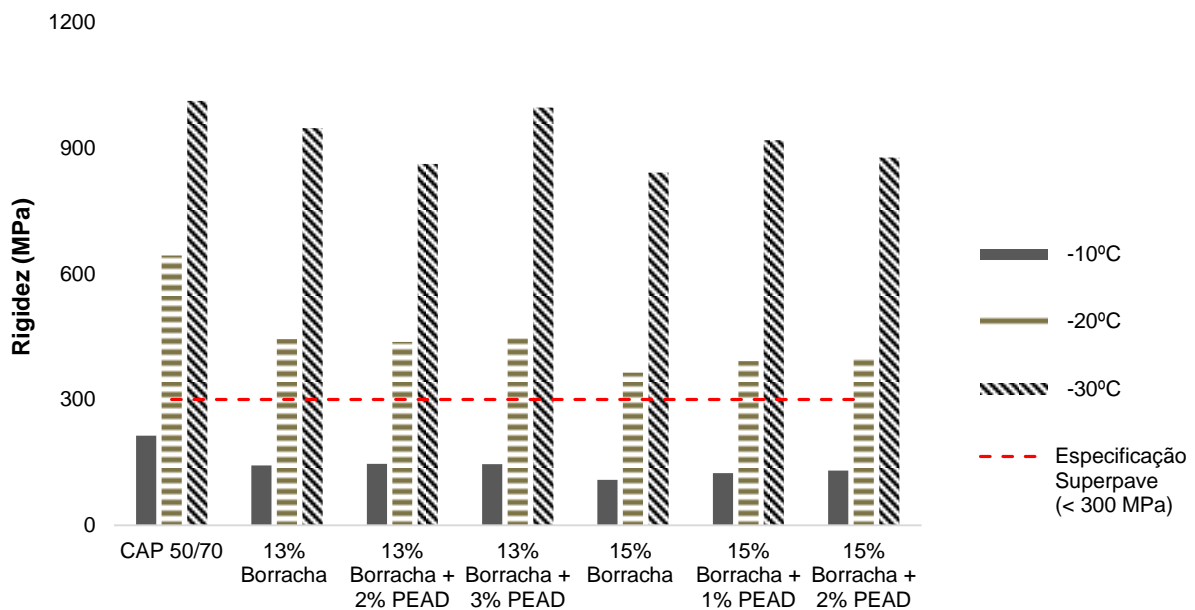


Figura 34 – Rigidez dos CAP's após o envelhecimento de curto prazo.



Do ponto de vista do módulo de relaxação (valor-m), conforme ilustram as Figuras 35 e 36, o valor mínimo igual a 0,30 requerido pela especificação Superpave foi atendido apenas para a temperatura de -10°C, ou seja, nessa temperatura os materiais avaliados demonstraram maior capacidade para dissipar as tensões. Combinando o resultado da rigidez e do módulo de relaxação, conclui-se que a -10°C não haveria risco de trincamento térmico.

Figura 35 – Módulo de relaxação dos CAP's antes do envelhecimento de curto prazo.

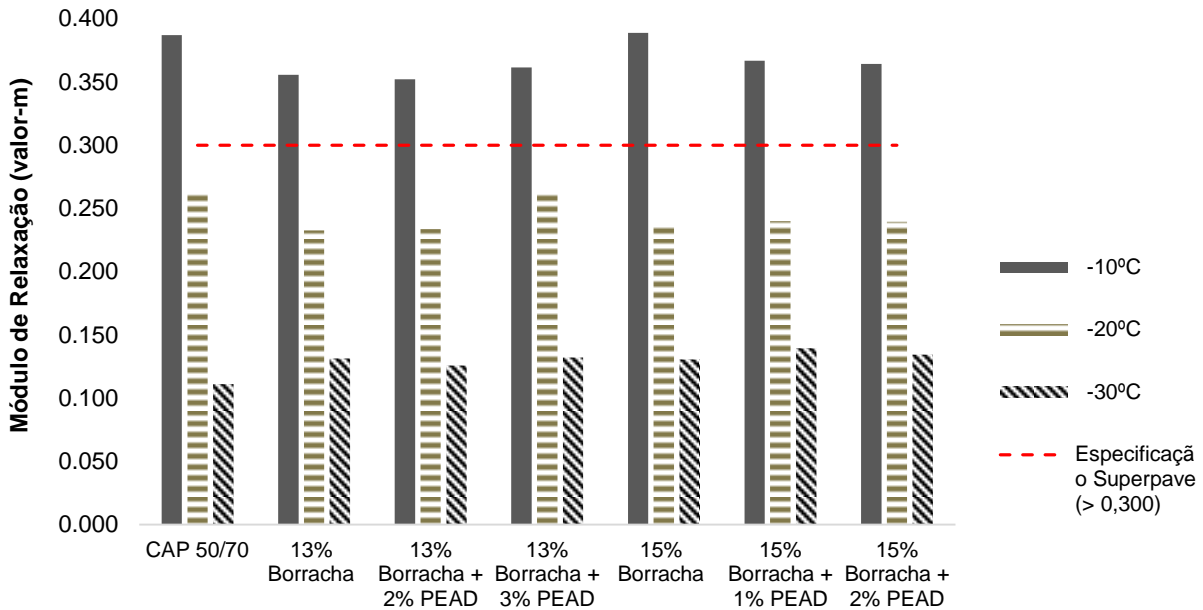
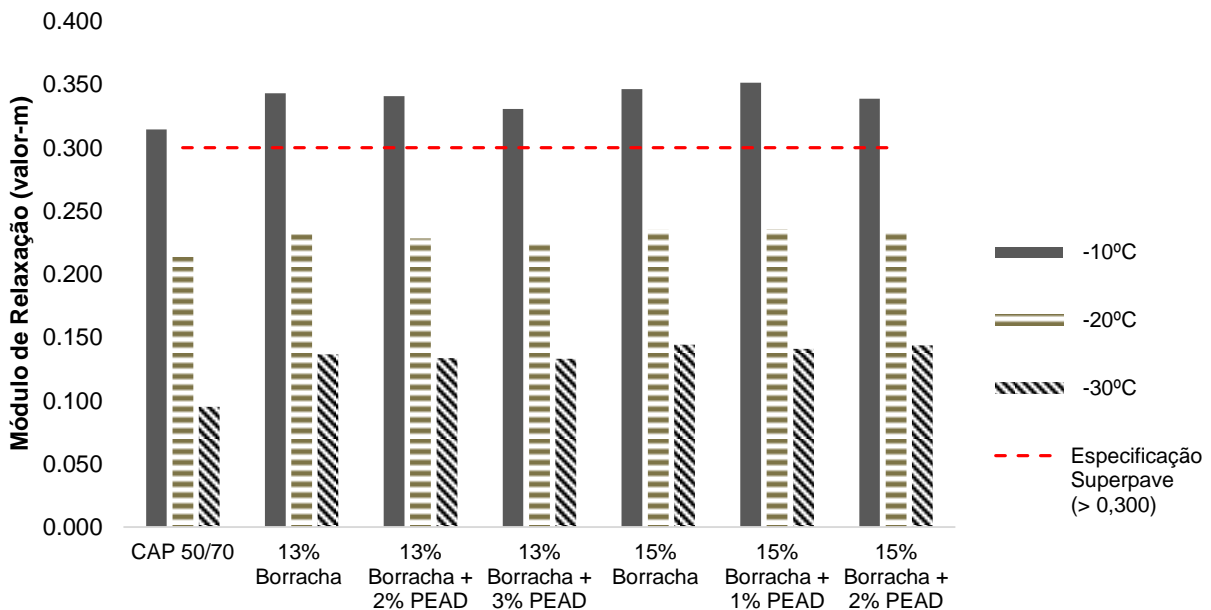


Figura 36 – Módulo de relaxação dos CAP's após o envelhecimento de curto prazo.



Para Attaelmanan et al. (2011) ao se adicionar polietileno na mistura asfáltica há uma redução do trincamento térmico em baixas temperaturas. Já no estudo de Ge et al. (2016) as amostras contendo borracha de pneus e polietileno, obtiveram resistência ao trincamento em temperaturas até -18°C , de modo que ao se reduzir a rigidez há um ganho significativo de flexibilidade de recuperação elástica a baixas temperaturas.

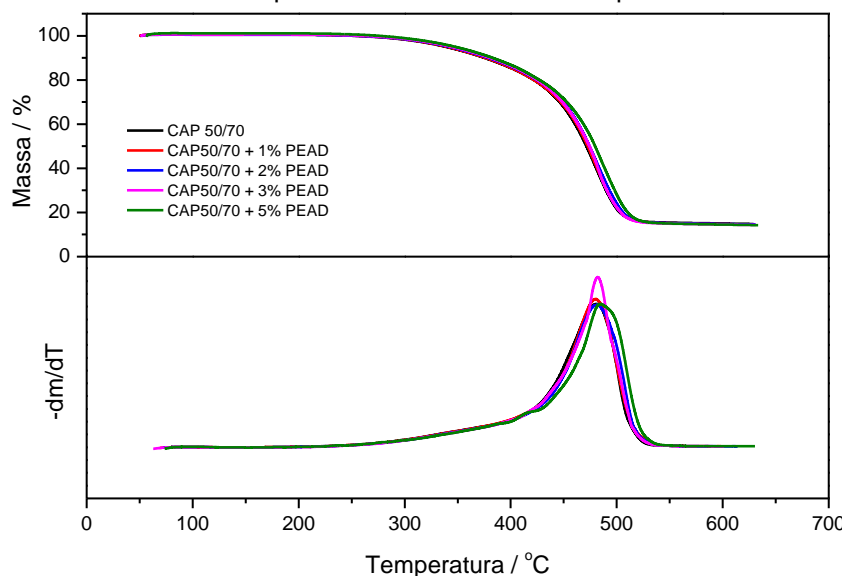
4.5 ENSAIOS TÉRMICOS

Inicialmente foi avaliada a influência do PEAD particulado no CAP 50/70 convencional, antes e após o envelhecimento de curto prazo. Para os ensaios de comportamento térmico foram considerados teores de PEAD iguais a 1, 2, 3 e 5%. Apesar de o teor igual a 5% não ter sido considerado nos ensaios de caracterização apresentados nas seções 4.1 a 4.3, o mesmo foi incluído para se ter um teor de extrapolação que permitisse identificar o comportamento do CAP com teores elevados de PEAD.

4.5.1 Efeito da adição de PEAD no comportamento térmico do CAP antes do envelhecimento.

A Figura 37 apresenta o perfil termogravimétrico das amostras de CAP 50/70 convencional e CAP's 50/70 convencionais modificados com PEAD particulado nos teores de 1, 2, 3 e 5%. Na mesma figura também são apresentadas as curvas termogravimétricas diferenciais para cada caso.

Figura 37 – Análise termogravimétrica antes do envelhecimento para o CAP não modificado e para os CAP's modificados apenas com PEAD.



Considerando o perfil termogravimétrico, se observa que não houve alteração significativa em relação à estabilidade térmica do material, nem mesmo a massa residual demonstra alteração significativa, pois apresenta valor igual a 14,25%. Assim, esse resultado sugere que a adição de baixos teores de PEAD particulado não afeta o

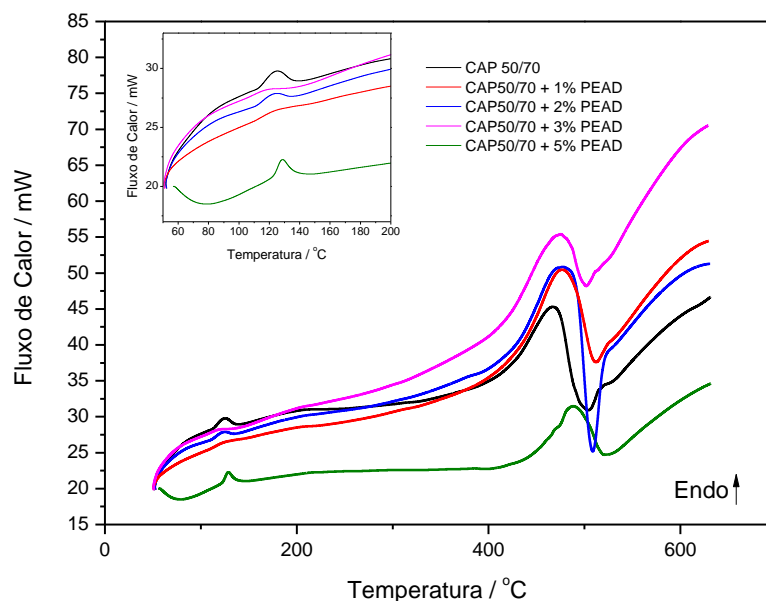
processo de degradação do ligante asfáltico antes do processo de envelhecimento.

Além disso, os eventos de perda de massa do CAP e do polímero ocorrem simultaneamente, dificultando a identificação individual de cada um. Desta forma, acredita-se na ocorrência de formação de mistura heterogênea com baixa interação entre os componentes da amostra. A partir da curva termogravimétrica diferencial se constata que a temperatura de degradação máxima (T_{max}) é de aproximadamente 480°C , também sem variação significativa em relação a composição do material.

Simultaneamente aos resultados termogravimétricos foi realizado o ensaio de calorimetria exploratória diferencial (Figura 38). Nas análises calorimétricas são observados ao menos dois eventos térmicos principais, sendo o primeiro um processo endotérmico com máximo em aproximadamente 126°C que ocorre sem variação de massa, esse evento pode ser atribuído à fusão do PEAD, cuja intensidade do pico endotérmico resulta proporcional à quantidade de PEAD adicionado ao CAP. Esse resultado demonstra que o PEAD não se incorpora ao ligante e mantém suas propriedades térmicas originais.

O segundo evento térmico também é um processo endotérmico com máximo em aproximadamente 475°C que ocorre acompanhado por perda de massa, assim podendo ser atribuído ao processo de evaporação/degradação dos componentes do CAP modificado.

Figura 38 – Calorimetria exploratória diferencial antes do envelhecimento para o CAP não modificado e para os CAP's modificados apenas com PEAD.



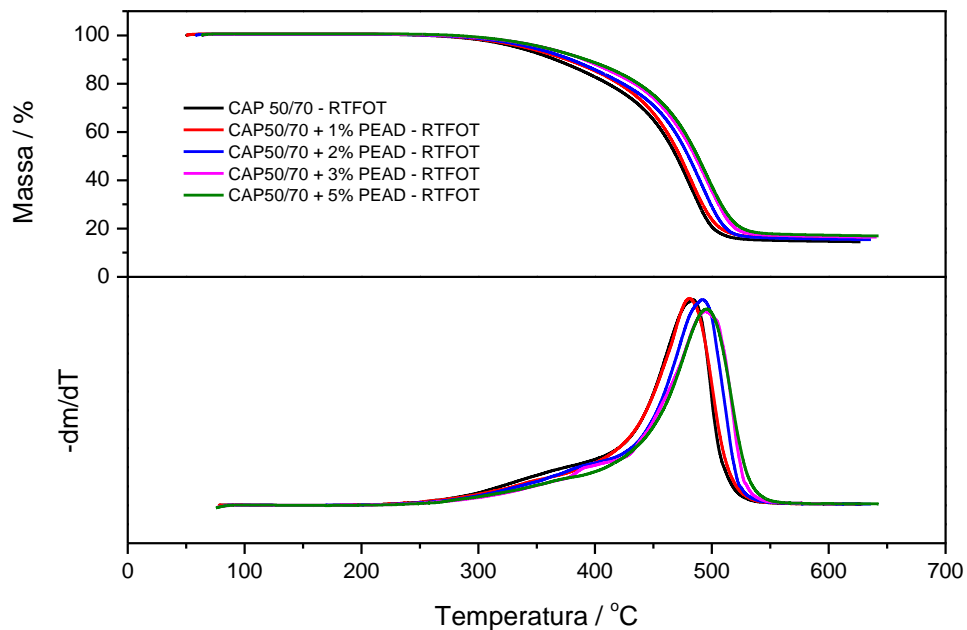
4.5.2 Efeito da adição de PEAD no comportamento térmico do CAP após

envelhecimento de curto prazo.

A Figura 39 apresenta o perfil termogravimétrico do CAP 50/70 modificado com diferentes teores de PEAD particulado após o envelhecimento de curto prazo, assim como as curvas termogravimétricas diferenciais para cada caso.

A partir do perfil termogravimétrico observa-se que após o envelhecimento de curto prazo, existe uma variação no comportamento térmico entre as amostras. Tem-se elevação da estabilidade térmica à medida que aumenta o teor de PEAD particulado até 3% de adição deste. Esse comportamento pode ser devido ao efeito que o envelhecimento de curto prazo causa nas amostras, processo esse, que ocorre mediante elevação da temperatura (163°C), injeção de ar comprimido e rotação mecânica constante, condições essas adequadas para a incorporação do PEAD na estrutura do CAP.

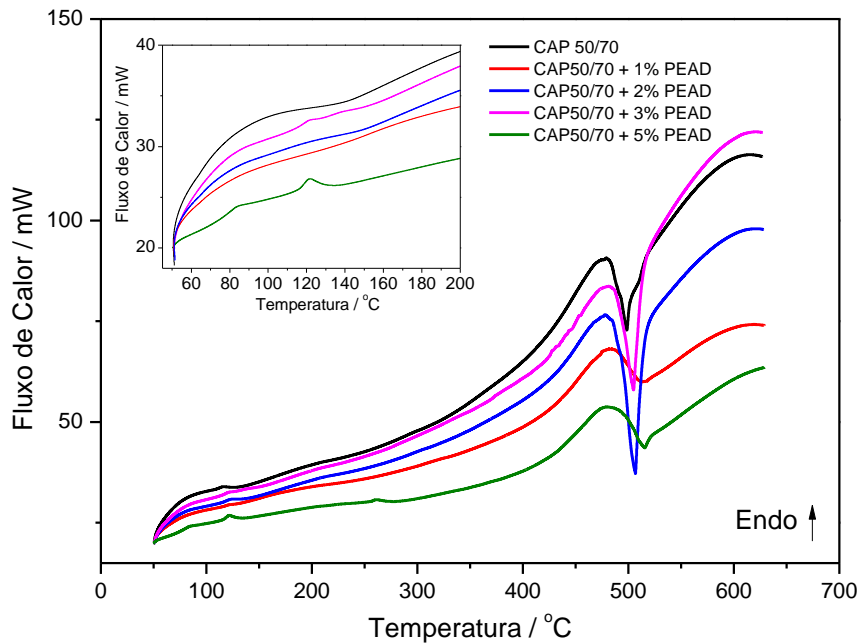
Figura 39 – Análise termogravimétrica após o envelhecimento de curto prazo para o CAP não modificado e para os CAP's modificados apenas com PEAD.



A calorimetria exploratória diferencial relacionada às amostras envelhecidas é apresentada na Figura 40. Observa-se após o envelhecimento de curto prazo, comportamentos similares entre as amostras com presença de picos endotérmicos, um relacionado à fusão do PEAD e outro relacionado à evaporação/degradação das amostras. Porém ao se observar mais atentamente o gráfico ampliado, percebe-se que o pico endotérmico relacionado à fusão do PEAD praticamente desaparece nas amostras com 1, 2 e 3% e se apresenta com menor intensidade na amostra com 5%. Esse fato é

atribuído ao processo de incorporação do PEAD particulado na estrutura do CAP que nessas condições permite a incorporação de até 3% de polímero no CAP 50/70 convencional. Assim pode-se afirmar que a adição de até 3% de PEAD particulado afeta as propriedades do CAP 50/70 convencional.

Figura 40 – Calorimetria exploratória diferencial após o envelhecimento de curto prazo para o CAP não modificado e para os CAP's modificados apenas com PEAD.



Outra consideração fundamental é que o envelhecimento de curto prazo não é responsável pela elevação da estabilidade térmica. Isso pode ser comprovado pelo fato de que as amostras não envelhecidas apresentam um T_{max} de aproximadamente 480°C, temperatura essa também observada no caso da amostra sem a presença de PEAD particulado, porém após o processo de envelhecimento.

As elevações na estabilidade térmica do material ocorrem então devido a incorporação de PEAD no CAP 50/70 convencional mediante processo de envelhecimento, fato este comprovado pela T_{max} de 495°C da amostra CAP 50/70 + 3% PEAD particulado a qual apresenta uma considerável elevação de 15°C na estabilidade térmica do material. Acredita-se que esse aumento da estabilidade térmica explica-se devido à dispersão e entrelaçamento das cadeias poliméricas do PEAD no CAP 50/70 convencional, resultando em um material de estrutura mais coesa que reflete também no aprimoramento das suas propriedades mecânicas.

4.5.3 Efeito da adição de PEAD e borracha moída de pneus no comportamento térmico

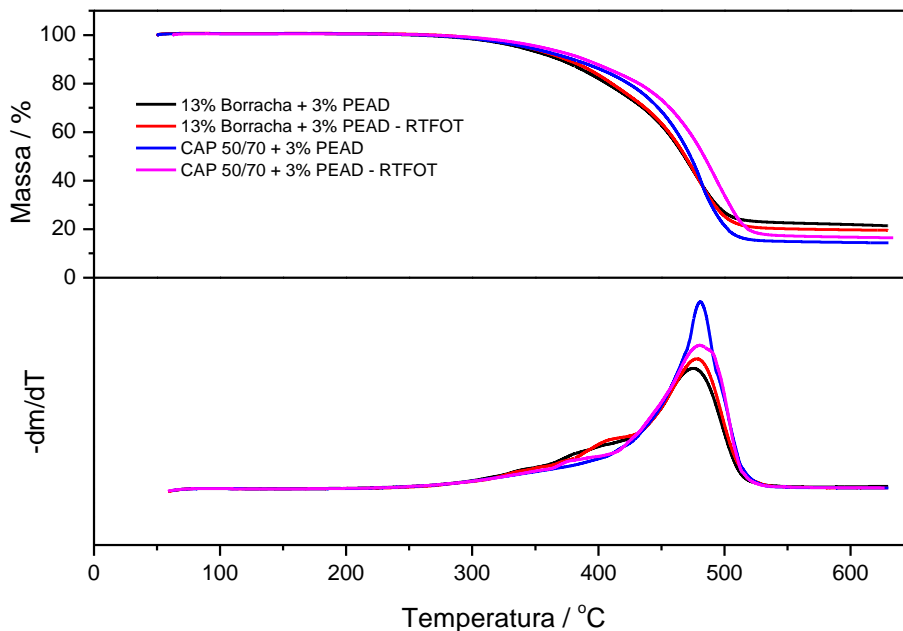
do CAP.

Considerando os resultados obtidos nas análises de caracterização mediante ensaios convencionais e reológicos (seções 4.1 a 4.3), selecionou-se o CAP 50/70 convencional modificado com 13% de borracha + 3% de PEAD particulado, o qual apresentou o melhor desempenho dentre os CAP's modificados avaliados.

Para esse CAP modificado foram determinados os perfis termogravimétricos antes e após o envelhecimento de curto prazo (Figura 41). Esses perfis foram então comparados aos perfis termogravimétricos obtidos para CAP 50/70 convencional modificado apenas com 3% de PEAD particulado antes e após o envelhecimento de curto prazo (Figura 38).

A análise dos perfis termogravimétricos indica que as amostras envelhecidas apresentaram maior estabilidade térmica quando comparadas às amostras que não passaram pelo envelhecimento de curto prazo. Isso ocorre devido aos processos de oxidação do CAP e à incorporação do PEAD, que são atribuídos ao processo de envelhecimento.

Figura 41 – Análise termogravimétrica dos CAP's modificados com borracha moída de pneus + PEAD particulado antes e após o envelhecimento de curto prazo.



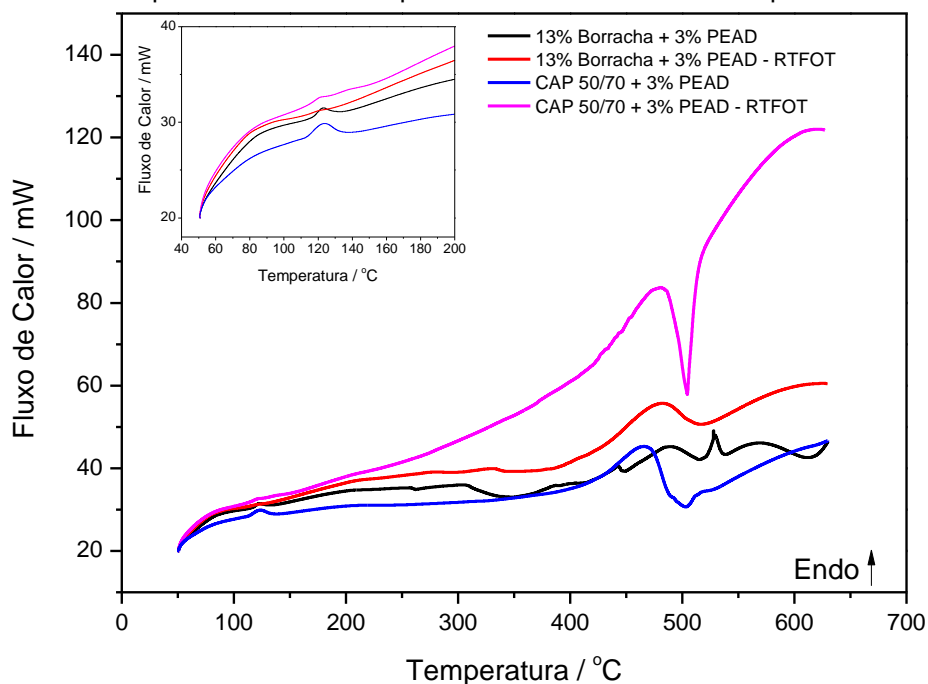
A presença de borracha no material diminuiu a estabilidade térmica da amostra antes e após o envelhecimento. Este resultado provavelmente deve-se a heterogeneidade do CAP modificado e aos processos de degradação térmica da borracha

que ocorreram em temperaturas menores que a do CAP 50/70 convencional. Situação idêntica pode ser observada nas curvas termogravimétricas diferenciais, onde para amostras com borracha existe um evento de perda de massa em aproximadamente 400°C, que não é observado nas amostras CAP 50/70 + 3% de PEAD particulado.

A calorimetria exploratória diferencial para as amostras com borracha pode ser observada na Figura 42. Nas curvas calorimétricas das amostras sem o envelhecimento de curto prazo fica evidente, pelo gráfico ampliado, que existem picos endotérmicos referentes ao processo de fusão do PEAD. Esses processos praticamente desaparecem após o envelhecimento, devido à incorporação do polímero no CAP 50/70 convencional.

Antes do envelhecimento é possível observar que a amostra com borracha quando comparada à amostra sem adição do polímero, apresenta processo de degradação mais complexo, com mais eventos endotérmicos. Esses eventos endotérmicos são devidos à degradação térmica dos componentes da borracha.

Figura 42 – Calorimetria exploratória diferencial dos CAP's modificados com borracha moída de pneus + PEAD particulado antes e após o envelhecimento de curto prazo.



Comparando o perfil calorimétrico das amostras envelhecidas e não envelhecidas, nota-se que as amostras envelhecidas apresentam comportamento mais homogêneo, com menor número de eventos térmicos. Este resultado pode ser atribuído a homogeneização que o processo de envelhecimento causa na amostra.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Cada equação de regressão linear múltipla com todos os coeficientes estatisticamente significativos tem um coeficiente de determinação (R^2). Esse coeficiente indica o quanto as variações da variável dependente (Y) podem ser explicadas pelas variações das variáveis independentes (X_i) presentes na equação calculada.

4.6.1 Análise de regressão para o ponto de amolecimento

A temperatura do ponto de amolecimento foi correlacionada à percentagem de borracha moída, percentagem de PEAD particulado e estado de envelhecimento dos CAP's modificados. Mediante análise de regressão linear múltipla, foram obtidos os resultados seguintes:

Quadro 4 – Regressão linear múltipla para o ponto de amolecimento.

Equação de regressão:	Y=40,23+0,9×%BR+2,29×%PEAD+4,05×ENV Onde, %BR: % de borracha moída adicionada ao CAP (em massa do CAP); %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP); ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo).	$R^2=0,924$	
Teste F:	$F_{\text{calculado}}=32,41$ $F_{\text{significação}}=7,97 \times 10^{-5}$	$F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$	
Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	$3,41 \times 10^{-5}$	SIM
	%Borracha	0,0274	SIM
	%PEAD	$6,61 \times 10^{-5}$	SIM
	ENV	0,0002	SIM

No Quadro 4, para a equação de regressão obtida se constatou elevadíssimo coeficiente de determinação (R^2), ou seja, 92,4% das variações das temperaturas de amolecimento experimentadas pelos CAP's avaliados podem ser explicadas pelas variáveis independentes presentes na equação. Considerando o teste F, existem variáveis independentes significativas haja vista que $F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$. E a análise de significância das variáveis independentes indicou que as três variáveis independentes presentes na equação são significativas para um nível de confiança de 95%.

4.6.2 Análise de regressão para o módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$).

O módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$) foi correlacionado à percentagem de borracha moída, percentagem de PEAD particulado, estado de envelhecimento e temperatura de ensaio dos CAP's modificados. Mediante análise de regressão linear múltipla, foram obtidos os resultados seguintes:

Quadro 5 – Regressão linear múltipla para o módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$).

Equação de regressão:	$Y=188,05-1,6\times\%BR+10,72\times\%PEAD+24,12\times ENV-2,36\times TEMP$ Onde, %BR: % de borracha moída adicionada ao CAP (em massa do CAP); %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP); ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio ($^{\circ}C$).		$R^2=0,587$
Teste F:	$F_{calculado}=40,14$ $F_{significação}=6,9\times 10^{-21}$		$F_{calculado} > F_{significação}$
Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	0,0008	SIM
	%Borracha	0,661	NÃO
	%PEAD	0,0014	SIM
	ENV	0,0005	SIM
		$9,58\times 10^{-23}$	SIM

Considerando que a percentagem de borracha moída não foi significativa do ponto de vista estatístico ($\text{valor-p} > 0,05$), se procedeu à nova análise de regressão sem a presença dessa variável. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Nova análise de regressão para o módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$).

Equação de regressão:	$Y=164,79+11,22\times\%PEAD+24,14\times\%ENV-2,36\times TEMP$ Onde, %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP); ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio ($^{\circ}C$).		$R^2=0,586$
Teste F:	$F_{calculado}=53,84$ $F_{significação}=9,46\times 10^{-22}$		$F_{calculado} > F_{significação}$
Análise da significância das variáveis: 95% de		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	$2,47\times 10^{-23}$	SIM
	%PEAD	0,0003	SIM

confiança	ENV	0,0005	SIM
	TEMP	$6,86 \times 10^{-23}$	SIM

No Quadro 6, para a equação de regressão obtida se constatou que o coeficiente de determinação (R^2) é inferior a 0,7 então se conclui que as variáveis independentes consideradas não são suficientes para explicar satisfatoriamente as variações nos módulos complexos de cisalhamento dos CAP's avaliados. Apesar disso, o teste F indica que existem variáveis independentes significativas haja vista que $F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$. E a análise de significância das variáveis independentes indicou que as três variáveis independentes presentes na equação são significativas para um nível de confiança de 95%.

4.6.3 Análise de regressão para o ângulo de fase (δ).

O ângulo de fase (δ) foi correlacionado à percentagem de borracha moída, percentagem de PEAD particulado, estado de envelhecimento e temperatura de ensaio dos CAP's modificados. Mediante análise de regressão linear múltipla, foram obtidos os resultados que são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Análise de regressão para o ângulo de fase (δ).

Equação de regressão:	$Y=54,19+0,19 \times \%BR-2,66 \times \%PEAD-7,83 \times ENV+0,3 \times TEMP$ Onde, %BR: % de borracha moída adicionada ao CAP (em massa do CAP); %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP); ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio ($^{\circ}C$).	$R^2=0,769$	
Teste F:	$F_{\text{calculado}}=94,13$ $F_{\text{significação}}=4,72 \times 10^{-35}$	$F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$	
Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	$1,11 \times 10^{-16}$	SIM
	%Borracha	0,599	NÃO
	%PEAD	$1,55 \times 10^{-12}$	SIM
	ENV	$2,49 \times 10^{-20}$	SIM
	TEMP	$9,87 \times 10^{-30}$	SIM

Considerando que a percentagem de borracha moída não foi significativa do ponto de vista estatístico ($\text{valor-p} > 0,05$), se procedeu à nova análise de regressão sem a presença dessa variável. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 8.

No Quadro 8, para a equação de regressão obtida se constatou coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,7, ou seja, o modelo obtido é consideravelmente bom pois 76,9% das variações do ângulo de fase podem ser explicadas pelas variáveis independentes presentes na equação. Considerando o teste F, existem variáveis independentes significativas haja vista que $F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$. E a análise de significância das variáveis independentes indicou que as três variáveis independentes presentes na equação são significativas para um nível de confiança de 95%.

Quadro 8 – Nova análise de regressão para o ângulo de fase (δ).

Equação de regressão:	Y=57,04-2,72×%PEAD-7,84×ENV+0,30×TEMP Onde, %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP); ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).		$R^2=0,769$
Teste F:	$F_{\text{calculado}}=126,22$ $F_{\text{significação}}=4,42 \times 10^{-36}$		$F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$
Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	$4,13 \times 10^{-72}$	SIM
	%PEAD	$2,66 \times 10^{-14}$	SIM
	ENV	$1,78 \times 10^{-20}$	SIM
	TEMP	$6,40 \times 10^{-30}$	SIM

4.6.4 Análise de regressão para o quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$

O quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ foi correlacionado à percentagem de borracha moída, percentagem de PEAD particulado, estado de envelhecimento e temperatura de ensaio dos CAP's modificados. Mediante análise de regressão linear múltipla, foram obtidos os resultados seguintes:

Quadro 9 – Análise de regressão para o quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$.

Equação de regressão:	Y=211,63-1,59×%BR+12,86×%PEAD+28,96×ENV-2,73×TEMP Onde, %BR: % de borracha moída adicionada ao CAP (em massa do CAP); %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP); ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).		$R^2=0,580$
Teste F:	$F_{\text{calculado}}=39,06$		$F_{\text{calculado}} >$

	$F_{\text{significação}}=1,68 \times 10^{-20}$		$F_{\text{significação}}$
Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	0,0013	SIM
	%Borracha	0,711	NÃO
	%PEAD	0,0012	SIM
	ENV	0,0004	SIM
	TEMP	$2,86 \times 10^{-22}$	SIM

Considerando que a percentagem de borracha moída não foi significativa do ponto de vista estatístico (valor-p>0,05), se procedeu à nova análise de regressão sem a presença dessa variável. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Nova análise de regressão para o quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$.

Equação de regressão:	Y=188,56+13,37×%PEAD+28,99×ENV-2,73×TEMP Onde, %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP); ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).	$R^2=0,580$	
Teste F:	$F_{\text{calculado}}=52,43$ $F_{\text{significação}}=2,27 \times 10^{-21}$	$F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$	
Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	$1,31 \times 10^{-22}$	SIM
	%PEAD	0,0003	SIM
	ENV	0,0004	SIM
	TEMP	$2,00 \times 10^{-22}$	SIM

No Quadro 10, para a equação de regressão obtida se constatou que o coeficiente de determinação (R^2) é inferior a 0,7 então se conclui que as variáveis independentes consideradas não são suficientes para explicar satisfatoriamente as variações do quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ nos CAP's avaliados. Apesar disso, o teste F indica que existem variáveis independentes significativas haja vista que $F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$. E a análise de significância das variáveis independentes indicou que as três variáveis independentes presentes na equação obtida são significativas para um nível de confiança de 95%.

4.6.5 Análise de regressão para a rigidez (S)

A rigidez (S) em baixas temperaturas dos CAP's modificados foi

correlacionada à percentagem de borracha moída, percentagem de PEAD particulado, estado de envelhecimento e temperatura de ensaio dos CAP's modificados. Mediante análise de regressão linear múltipla, foram obtidos os resultados apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Análise de regressão para a rigidez (S).

Equação de regressão:	Y=-35,04-20,37×%BR+2,49×%PEAD-19,20×ENV-41,06×TEMP Onde, %BR: % de borracha moída adicionada ao CAP (em massa do CAP); %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP); ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).		R ² =0,955
Teste F:	F _{calculado} =166,03 F _{significação} =1,83×10 ⁻²⁰		F _{calculado} > F _{significação}
Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	0,8624	NÃO
	%Borracha	0,1466	NÃO
	%PEAD	0,8419	NÃO
	ENV	0,4673	NÃO
	TEMP	1,81×10 ⁻²²	SIM

Considerando que o intercepto, a percentagem de borracha moída, a percentagem de PEAD particulado e o estado de envelhecimento não foram significativos do ponto de vista estatístico (valor-p>0,05), se procedeu à nova análise de regressão sem a presença desses quatro elementos. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 – Nova análise de regressão para a rigidez (S).

Equação de regressão:	Y=-326,47-41,06×TEMP Onde, TEMP: temperatura do ensaio (°C).		R ² =0,951
Teste F:	F _{calculado} =656,58 F _{significação} =8,16×10 ⁻²⁴		F _{calculado} > F _{significação}
Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	5,13×10 ⁻¹¹	SIM
	TEMP	8,16×10 ⁻²⁴	SIM

No Quadro 12, para a equação de regressão obtida se constatou que 95,1% das variações da rigidez dos CAP's avaliados podem ser explicadas pela variação da temperatura de ensaio. Considerando o teste F, existem variáveis independentes

significativas haja vista que $F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$. E a análise de significância das variáveis independentes indicou que o intercepto e a temperatura de ensaio são estatisticamente significativos para um nível de confiança de 95%.

4.6.6 Análise de regressão para o módulo de relaxação (valor-m)

O módulo de relaxação (valor-m) em baixas temperaturas dos CAP's modificados foi correlacionado à percentagem de borracha moída, percentagem de PEAD particulado, estado de envelhecimento e temperatura de ensaio dos CAP's modificados. Mediante análise de regressão linear múltipla, foram obtidos os resultados seguintes:

Quadro 13 – Análise de regressão para o módulo de relaxação (valor-m).

Equação de regressão:	$Y=0,42+0,003\times\%BR-0,00042\times\%PEAD-0,0087\times ENV+0,01\times TEMP$ Onde, %BR: % de borracha moída adicionada ao CAP (em massa do CAP); %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP); ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).	$R^2=0,988$	
Teste F:	$F_{\text{calculado}}=643,16$ $F_{\text{significação}}=2,44\times 10^{-29}$	$F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$	
Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	$3,77\times 10^{-16}$	SIM
	%Borracha	0,0860	NÃO
	%PEAD	0,801	NÃO
	ENV	0,019	SIM
	TEMP	$2,27\times 10^{-31}$	SIM

Considerando que as percentagens de borracha moída e PEAD particulado não foram significativas do ponto de vista estatístico (valor-p > 0,05), se procedeu à nova análise de regressão sem a presença dessas duas variáveis. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 14.

Quadro 14 – Nova análise de regressão para o módulo de relaxação (valor-m).

Equação de regressão:	$Y=0,46-8,67\times 10^{-3}\times ENV+1,09\times 10^{-2}\times TEMP$ Onde, ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido; 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).	$R^2=0,987$
Teste F:	$F_{\text{calculado}}=1217,01$ $F_{\text{significação}}=1,22\times 10^{-31}$	$F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$

Análise da significância das variáveis: 95% de confiança		Valor-p calculado	Valor-p < 0,05?
	Intercepto	$3,46 \times 10^{-41}$	SIM
	ENV	0,022	SIM
	TEMP	$1,75 \times 10^{-32}$	SIM

No Quadro 14, para a equação de regressão obtida se constatou que 98,7% das variações do módulo de relaxação podem ser explicadas pelas variações do estado de envelhecimento e temperatura. Considerando o teste F, existem variáveis independentes significativas haja vista que $F_{\text{calculado}} > F_{\text{significação}}$. E a análise de significância das variáveis independentes indicou que o estado de envelhecimento dos CAP's e a temperatura de ensaio são estatisticamente significativos para um nível de confiança de 95%.

4.7 ANÁLISES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CADA VARIÁVEL

Conforme ilustra o Quadro 15, no ensaio convencional do ponto de amolecimento, a percentagem de adição do PEAD particulado teve contribuição preponderante na temperatura de amolecimento.

Quadro 15 – Quantificação das contribuições das variáveis significativas no ponto de amolecimento.

Y=40,23+0,9×%BR+2,29×%PEAD+4,05×ENV		
Variável significativa	R ²	Contribuição (%)
%PEAD	0,475	51,36
ENV	0,855	41,19
%BR	0,924	7,45

%BR: % de borracha moída adicionada ao CAP (em massa do CAP);
 %PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP);
 ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido;
 1: envelhecido em curto prazo).

Quando são considerados os ensaios reológicos (cisalhamento dinâmico e fluência em viga), ilustrados nos Quadros 16 a 20, a temperatura de ensaio demonstrou ser o fator preponderante, seguido pelo estado de envelhecimento das amostras ensaiadas.

Quadro 16 – Quantificação das contribuições das variáveis significativas no módulo complexo de cisalhamento (G^*).

Y=164,79+11,22×%PEAD+24,14×%ENV-2,36×TEMP		
Variável significativa	R ²	Contribuição (%)
TEMP	0,488	83,17
%PEAD	0,540	8,96
ENV	0,586	7,87

%PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP);
 ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido;
 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).

Quadro 17 – Quantificação das contribuições das variáveis significativas no ângulo de fase (δ).

Y=57,04-2,72×%PEAD-7,84×ENV+0,30×TEMP		
Variável significativa	R ²	Contribuição (%)
TEMP	0,335	43,63
ENV	0,614	36,31
%PEAD	0,769	20,06

%PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP);
 ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido;
 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).

Quadro 18 – Quantificação das contribuições das variáveis significativas no quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$.

Y=188,56+13,37×%PEAD+28,99×ENV-2,73×TEMP		
Variável significativa	R ²	Contribuição (%)
TEMP	0,476	82,05
%PEAD	0,531	9,49
ENV	0,580	8,46

%PEAD: % de PEAD particulado adicionado ao CAP (em massa do CAP);
 ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido;
 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).

Quadro 19 – Quantificação das contribuições das variáveis significativas na rigidez (S).

Y=-326,47-41,06×TEMP		
Variável significativa	R ²	Contribuição (%)
TEMP	0,951	100,00

TEMP: temperatura do ensaio (°C).

Quadro 20 – Quantificação das contribuições das variáveis significativas no módulo de relaxação (valor-m).

Y=0,46-8,67×10 ⁻³ ×ENV+1,09×10 ⁻² ×TEMP		
Variável significativa	R ²	Contribuição (%)
TEMP	0,984	99,76
ENV	0,987	0,24

ENV: estado de envelhecimento do CAP (zero: não envelhecido;
 1: envelhecido em curto prazo); TEMP: temperatura do ensaio (°C).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa a partir dos resultados obtidos em laboratório. Também são apresentadas recomendações para pesquisas futuras.

5.1 CONCLUSÕES

A partir do envelhecimento de curto prazo foi observado que o PEAD particulado e a borracha moída de pneus agem como redutores de perda de massa, diminuindo a volatilização do CAP modificado, que o torna mais resistente ao enrijecimento.

Com os ensaios convencionais do ponto de amolecimento e ponto de fulgor observou-se que CAP's modificados com menor teor de borracha e maiores teores de PEAD apresentaram menor envelhecimento e maior resistência às deformações permanentes em temperaturas altas comparadas ao CAP 50/70 convencional.

No ensaio de viscosidade rotacional Brookfield se observou aumento da viscosidade para CAP's modificados com menor teor de borracha e maior teor de PEAD sem, contudo prejudicar a trabalhabilidade dos CAP's modificados. Além disso, CAP's mais viscosos produzem maior filme de recobrimento dos agregados e maior resistência aos efeitos do envelhecimento.

Considerando o ensaio de cisalhamento dinâmico nos CAP's modificados, se constatou aumento significativo da resistência à deformação ($|G^*|$) em altas temperaturas para amostras com menor teor de borracha moída de pneus e maior teor de PEAD. O CAP 50/70 convencional modificado com 13% de borracha + 3% de PEAD particulado apresentou incremento de quase 170% no $|G^*|$ comparado ao CAP 50/70 convencional.

Do ponto de vista dos ensaios de fluência em viga, os CAP's modificados apresentaram desempenho satisfatório em termos de rigidez e módulo de relaxação apenas para a maior temperatura avaliada (-10°C). À medida que a temperatura decresceu os CAP's modificados com borracha e PEAD ganharam rigidez, demonstrando suscetibilidade ao trincamento térmico.

Os ensaios térmicos permitiram observar os efeitos primeiramente do PEAD particulado que ao sofrer envelhecimento gerou estabilidade para amostras com

3% de adição, estabilizando-a e não havendo aumento após esse teor. Também se constatou que teores maiores que 3% de adição de PEAD particulado apresentam pouca homogeneidade e picos endotérmicos, os quais estão relacionados à fusão do material com o CAP. Assim teores de até 3% de adição de PEAD particulado resultam em uma fusão efetiva entre o material asfáltico e o polímero.

Outro fato observado se refere à maior estabilidade térmica dos CAP's envelhecidos comparados aos CAP's que não passaram pelo processo de envelhecimento de curto prazo. Isso ocorre devido aos processos de oxidação do CAP e à incorporação do PEAD particulado que são atribuídos ao processo de envelhecimento de curto prazo.

Na análise estatística efetuada para o estudo o ponto de amolecimento resultou em modelo de regressão múltipla no qual 92% das variações da temperatura de amolecimento podem ser explicadas satisfatoriamente pelas variações da percentagem de borracha, percentagem de PEAD particulado e estado de envelhecimento. Além disso, a percentagem de PEAD particulado adicionado teve mais de 51% de contribuição, seguida por 41% de contribuição devida ao estado de envelhecimento do CAP modificado.

As análises estatísticas efetuadas para as variáveis módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$) e quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$, ambos em altas temperaturas ($>46^\circ\text{C}$), resultaram em baixos coeficientes de determinação ($R^2_{|G^*|}=0,58$ e $R^2_{|G^*|/\text{Sen}(\delta)}=0,58$) para os modelos de regressão calculados para ($|G^*|$) e quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$. Assim, apenas 58% das variações do ($|G^*|$) e do quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$ puderam ser explicadas satisfatoriamente pelas variáveis independentes percentagem de PEAD particulado, estado de envelhecimento e temperatura de ensaio. Portanto, existem outros fatores não identificados que influenciam o desempenho do ($|G^*|$) e quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$. Apesar disso, a temperatura de ensaio teve contribuição preponderante (82 a 83%) na determinação do ($|G^*|$) e $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$, seguida pela percentagem de PEAD particulado e estado de envelhecimento cujas contribuições apresentaram a mesma ordem de grandeza.

A análise estatística do ângulo de fase (δ) em altas temperaturas ($>46^\circ\text{C}$) resultou em bom coeficiente de determinação ($R^2=0,77$), ou seja, 77% das variações do ângulo de fase podem ser explicadas pelas variações da percentagem de PEAD particulado, estado de envelhecimento e temperatura de ensaio. Do ponto de vista das

contribuições, neste caso se observou diminuição na influência preponderante da temperatura de ensaio (43,6%), porém o estado de envelhecimento teve maior participação (36,3%), seguido da percentagem de PEAD particulado (20,1%).

As análises estatísticas efetuadas para a rigidez e módulo de relaxação em baixas temperaturas resultaram em modelos de regressão com elevados coeficientes de determinação ($R^2_{\text{rigidez}}=0,95$ e $R^2_{\text{relaxação}}=0,987$). No entanto, em ambos os casos apenas a temperatura de ensaio apresentou contribuição significativa.

Logo, dentre os CAP's avaliados, o CAP 50/70 convencional modificado com 13% de borracha + 3% de PEAD particulado apresentou o melhor desempenho para a maioria das propriedades analisadas neste estudo.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Estudar o envelhecimento em longo prazo (PAV) e comparar com os valores antes e após o envelhecimento em curto prazo (RTFOT).
- Realizar o mesmo estudo com tempos de misturas diferenciados para detectar a influência desta no desempenho do material modificado.
- Realizar ensaios de caracterização, como difração de raio-x (DRX) e o de microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Estudar os efeitos dos CAP's modificados na fabricação de misturas asfálticas e posterior desempenho em serviço.
- Estudar as propriedades viscoelásticas de MAFs empregando os resíduos de borracha de pneus reciclados e PEAD.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 11341. **Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT NBR 6570. **Ligantes asfálticos - Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

ABNT NBR 15529. **Asfalto Borracha – Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por Viscosímetro Rotacional**. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT NBR 15235. **Materiais Betuminosos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASTHO T 313: **Standard Method of Test For Determining The Flexural Creep Stiffness Of Asphalt Binder Using The Bending Beam Rheometer (BBR)**. Washington, DC. 2012.

AASHTO T 315-12. **Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. Washington, DC. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D2872. **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**. West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM D6648. **Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)**. American Society for Testing Material, 2016.

ASTM D6373. **Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM D2196/2018E1. **Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)**. American Society for Testing Material, 2018.

ASTM D4402. **Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer**. American Society for Testing Material, 2015.

ASTM D7175. **Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. West Conshohocken, PA, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PALÁCIO - ABIPLAST. **Perfil 2017**. São Paulo, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PALÁCIO - ABIPLAST. **Perfil 2018**. São Paulo, 2019.

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

AHMEDZADE, P.; GÜNAY, T.; GRIGORYEVA, O.; STAROSTENKO, O. **Irradiated Recycled High Density Polyethylene Usage as a Modifier for Bitumen**. Journal Of Materials In Civil Engineering, [s.l.], v. 29, n. 3, p.04016233-04016233, mar. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001757](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001757)>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

ATTAELMANAN, M.; FENG, C. P.; AI, A. Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 5, p.2764-2770, maio 2011. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/hmec/pubs/module_f/lab_manual_asphalt.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2019.

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.

AIT-KADI, A.; BRAHIMI, H.; BOUSMINA, M. **Polymer blends for enhanced asphalt binders**. **Revista Polymer Engineering & Science**. v. 36, n. 12, p 1724-1733, Jun. 1996. Disponível em < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.10568/full>>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

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.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos rodoviários**. 5ª reimpressão. Coimbra. Almedina, 2016.

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.

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.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. 1º Edição. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015.

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: Relatório gerencial**. 22º. edição, Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2017. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso em: 04 de Maio de 2019.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do Envelhecimento Térmico e Fotoquímico em Ligantes Asfálticos, Mástique e Matriz de Agregados Finos**. Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/391-2016/4708-margareth-carvalho-coutinho-cravo>>. Acesso em: 05 de Maio de 2019.

CUADRI, A. A.; CARRERA, V.; IZQUIERDO, M. A.; GARCÍA-MORALES, M.; NAVARRO, F.J. **Bitumen modifiers for reduced temperature asphalts**: A comparative analysis between three polymeric and non-polymeric additives. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 51, p.82-88, jan. 2014. Disponível em <Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.009>>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

CUADRI, A. A.; ROMAN, C; GARCIA-MORALES, M.; GUIADO, F.; MORENO, E.; PARTAL, P. **Formulation and processing of recycled-low-density-polyethylene-modified bitumen emulsions for reduced-temperature asphalt technologies**. *Chemical Engineering Science*, [s.l.], v.156, p.197-205, dez. 2016. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.09.018>>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT 155/10 - ME. **Materiais asfálticos – Determinação da penetração –Método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias –IPR, 2010.

DNIT 095/06 – EM. **Cimento asfáltico de petróleo – Especificação de material**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias –IPR, 2006.

DNIT 111/09 - EM. **Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias –IPR, 2009.

DNIT 131/10 – ME. **Materiais asfálticos –Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias –IPR, 2010.

DANTAS NETO, S. A. **Avaliação das propriedades dos ligantes e das misturas asfálticas modificados com borracha granulada de pneus usados**. Tese (Doutorado) Geotecnia –Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004. Disponível em: <http://www.geotecnia.unb.br/result_geral.php?id_aluno=429>. Acesso em: 05 de Jun de 2019.

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).

FWA, T.f.. **Skid resistance determination for pavement management and wet-weather road safety**. *International Journal Of Transportation Science And Technology*, [s.l.], v. 6, n. 3, p.217-227, set. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.08.001>>. Acesso em: 20 Jun 2019.

GARCÍA-MORALES, M.; PARTAL, P.; NAVARRO, F. J.; GALLEGOS, C. **Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen**. Fuel, [s.l.], v. 85, n. 7-8, p.936-943, maio 2006. Disponível em <Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2005.09.015>>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

GARCÍA-TRAVÉ, G.; TAUSTE, R.; NAVARRO, F. N.; SÁNCHEZ, M. S.; GÁMEZ, M. C. R. **Use of Reclaimed Geomembranes for Modification of Mechanical Performance of Bituminous Binders**. Journal Of Materials In Civil Engineering, [s.l.], v. 28, n. 7, p.04016021/1 – 0401602/7, jul. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em <[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001507](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001507)>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

GE, D.; YAN, k.; YOU; Z.; Xu, H. Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 126, p.66-76, nov. Elsevier BV., 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.014>>. Acesso em: 20 Jun 2019.

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.

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. Disponível em: <<https://www.dropbox.com/s/2itt35b3ptw7sq/Livro%20STPR%2030.08.2018.pdf?dl=0>>. Acesso em: 08 de jul. 2019.

HINISLIOĞLU, S.; AĞAR, E. **Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix**. Materials Letters, v. 58, n. 3-4, p.267-271, jan. 2004. Disponível em <Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-577x\(03\)00458-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-577x(03)00458-0)>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Relatório de pneumáticos**: Resolução Conama nº 416/09: 20178 (ano base 2017) / Diretoria de Qualidade Ambiental. – Brasília: Ibama, 2018.75 p.

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.

KARAHRODI, M. H.; JAZANI, O. M.; PARAN, S. M. R.; FORMELA, K. SAEB, M.R. **Modification of thermal and rheological characteristics of bitumen by waste PET/GTR blends**. Construction And Building Materials, v. 134, p.157-166, mar. 2016. Disponível em <Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.134>>. Acesso

em: 18 de Jun. de 2019.

KING, G. N.; Muncy, H. W.; Prudhomme, J. B. Polymer Modification: **Binder's Effect on Mix Properties**. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists A, vol. 68, p. 32-69, 1999.

KUMAR, S.; SINGH, R. K. **Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, V. 28, nº , p. 667, 2011.

LIMA, P. **Sacola plástica é uma das maiores vilãs do meio ambiente**. Senado Federal do Brasil, 2016. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2016/04/19/sacola-plastica-e-uma-das-maiores-vilas-do-meio-ambiente>>. Acesso em 07 de junho de 2019.

LEITE, L. F. M. **Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros**. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros), Instituto de Macromoléculas. Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999. 47

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.899>>. Acesso em: 20 jun de 2019.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/128794>>. Acesso em: 14 de Jun de 2019.

MELLO, M. S. **Avaliação das propriedades reológicas e mecânicas de ligantes e misturas asfálticas irradiadas**. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Nuclear. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

NAVARRO, F. J.; PARTAL, P.; MARTÍNEZ-BOZA, F.; GALLEGOS, C. **Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens**. Fuel, [s.l.], v. 83, n. 14-15, p.2041-2049, out. 2004. Disponível em <Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.003>>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

NAVARRO, F.J.; PARTALA, P.; GARCÍA-MORALES, M.; MARTÍN-ALFONSO, M. J.; MARTÍNEZ-BOZAA, F.; GALLEGOSA, C.; BORDADOB, J. C. M.; DIOGOC, A. C. **Bitumen modification with reactive and non-reactive (virgin and recycled) polymers: A comparative analysis**. Journal Of Industrial And Engineering Chemistry, [s.l.], v. 15, n. 4, p.458-464, jul. 2009. Disponível em <Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2009.01.003>>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-18122015-105039/en.php>>.

Acesso em: 18 de Jun. 2019.

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

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 166 fl, 2004. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4898/1/2004_dis_jhmpinheiro.pdf>. Acesso em: 20 Jul 2019.

PAJARES, F. **Plástico ambientalmente correto**. Revista Visão Ambiental. Editora Atenas, Ano 1, nº5 março/abril 2010, São Paulo. Disponível em <https://issuu.com/karynabahiense/docs/rva_ed05>. Acesso em 19 de Jun. 2019.

PISOLEVE®. **A ecologia por trás da Pisolleve®**. Site Pisolleve®, Disponível em: <<https://www.pisoleve.com.br/a-ecologia-por-tras-da-pisoleve/>>. Acessado em: 26 jul. 2019.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2ª edição Rio de Janeiro, 2002. Disponível em:<<https://pt.scribd.com/doc/43164721/1>>. Acesso em: 14 de Jun de 2019.

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.

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.

RODRIGUES JÚNIOR, F. **Obtenção e caracterização de blendas de CAP 20 modificadas com poliestireno reciclado e resíduos de pneu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) -Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006. Disponível em <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2465>>. Acesso em: 18 de Jun de 2019.

SANCHES, F. G.; GRANDINI, F. H. B.; JUNIOR, O. B. **Avaliação da viabilidade financeira de projetos com utilização do asfalto-borracha em relação ao asfalto convencional**. 2012. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Produção Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012. Disponível em:<<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/750>>. Acesso em: 14 de Jun de 2019.

SILVA, L. S.; FORTE, M. C.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. **Polímeros como modificadores asfálticos**. Transportes, v. 10, n. 1, p.84-106, 2 jul. 2002. Lepidus Tecnologia. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v10i1.164>>. Acesso em: 04 de Maio de 2019.

SILVA, L. S. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2005. Disponível em <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7349/000498535.pdf>>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

SILVA, T. D.; MARTINS DE PAULA, H.; SILVA, D.; CARVALHO, M. I.; FONTE, J. T.; PEREIRA R. R. **Uso de granulado de borracha em substituição parcial ao agregado miúdo na produção de tijolos ecológicos.** Matéria (Rio de Janeiro), [s.l.], v. 22, n. 4, p.1-2, 2 out. 2017. Fap UNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0239>>. Acesso em: 20 Jul de 2019.

SOUZA, R. O. **Modification of asphalt mixtures by recycled tire crumbed rubber to achieve their higher performance.** Thesis (Doctoral) - Graduate School of Science and Engineering - Department of civil engineering, Chuo University, Tokyo - Japan, 2006.

WWF - FUNDO MUNDIAL PARA A NATUREZA. **Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização.** Gland, Suíça, 2019.

YAACOB, H.; MUGHAL, M.A.; JAYA, R.; HAININA, M. R.; JAYANTIB, D. S.; WANC, C. N. C. **Rheological properties of styrene butadiene rubber modified bitumen binder.** Jurnal Teknologi, [s.l.], v. 78, n. 7-2, p.121-126, 26 jul. 2016. Penerbit UTM Press. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.11113/jt.v78.9503>>. Acesso em: 18 de Jun de 2019.

YILDIRIM, Y. **Polymer modified asphalt binders.** Revista Internacional Construction and Building Materials. v, 21, n. 1, p.66-72, Jan. 2007. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>>. Acesso em: 18 de Jun. de 2019.

APÊNDICE A – REVISÃO DE CONCEITOS DE ESTATÍSTICA

A partir dos dados coletados e posteriormente tabulados foram realizadas Análises de Regressão Linear Múltipla. Essas análises permitiram determinar equações de regressão para previsão do ponto de amolecimento, módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$), ângulo de fase (δ), quociente $|G^*|/\text{Sen}(\delta)$, rigidez (S) e módulo de relaxação (valor-m). Também foi possível a determinação das contribuições da percentagem de borracha, percentagem de PEAD particulado, estado de envelhecimento dos CAP's e temperatura de ensaio em cada equação de regressão calculada.

a) Regressão Linear e Coeficiente de Determinação (R^2)

A regressão nasce da tentativa de relacionar um conjunto de observações de certas variáveis, designadas genericamente por X_k ($k=1\dots p$), com as leituras de uma certa grandeza Y . No caso da regressão linear, está subjacente uma relação do tipo:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \quad (\text{A.1})$$

Onde:

Y : variável dependente;

a, b_1, b_2, \dots, b_p : parâmetros da relação linear procurada;

X_1, X_2, \dots, X_p : variáveis independentes.

O objetivo pode ser explicativo (demonstrar uma relação matemática que pode identificar, mas não prova, uma relação de causa-efeito) ou preditivo (obter uma relação que permita, perante futuras observações das variáveis X_k , prever o correspondente valor de Y , sem necessidade de medir). Independentemente dos objetivos, as variáveis X_k são muitas vezes designadas por variáveis explicativas, uma vez que tentam explicar as razões da variação de Y .

Supondo que se dispõe de “ n ” conjuntos de medidas com as correspondentes observações, a utilização do modelo incluirá sempre uma parcela de erro. Utilizando o índice “ i ” ($i=1\dots n$) para indicar cada conjunto, se terá:

$$y_i = a + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_p X_{ip} + e_i \quad i=1 \dots n \quad (\text{A.2})$$

Independentemente das motivações, a versão da regressão linear que aqui se apresenta consiste em estimar os valores dos parâmetros a , b_1 , $b_2 \dots b_p$, por meio da minimização da soma dos quadrados dos desvios. Daí o nome “método dos mínimos quadrados” que às vezes se utiliza nomeadamente para a regressão simples ($p=1$). O termo multi-regressão é usado para explicar o caso $p>1$. Neste ponto, é conveniente definir:

$y = [y_1 y_2 \dots y_n]'$	vetor de leituras
$x_k = [x_{1k} x_{2k} \dots x_{nk}]'$	vetor das observações de cada variável X_k
$X = [x_1 x_2 \dots x_p]'$	matriz de observações (elementos x_{ik} , $i=1 \dots n$, $k=1 \dots p$)
$b = [a b_0]' = [a b_1 b_2 \dots b_p]'$	vetor de parâmetros
$e = [e_1 e_2 \dots e_n]'$	vetor de erros
$1 = [1 \dots 1]$	vetor unitário de dimensão n
$X_a = [1 x_1 x_2 \dots x_p]$	matriz ampliada de observações ($i=0 \dots n$, $k=0 \dots p$)

Com estas definições, é possível reescrever a Equação A.2 de forma compacta:

$$y = a \cdot 1 + X \cdot B_0 + e \quad (\text{A.3})$$

Ou

$$y = X_a \cdot b + e \quad (\text{A.4})$$

Escrevendo em forma de função, tem-se:

$$Y = f(X) + \varepsilon \quad (\text{A.5})$$

Onde:

Y: variável resposta ou dependente;

f: descreve a relação entre X e Y;

X: variável independente, concomitante, covariável ou variável preditora;

ε : erro aleatório.

O caso mais simples de regressão é quando se tem duas variáveis e a relação entre elas pode ser representada por uma linha reta. É a chamada regressão linear simples. Para a construção de um modelo de regressão, devem-se seguir três etapas, que são:

- I) Seleção das variáveis preditoras;
- II) Escolha do modelo de regressão;
- III) Abrangência do modelo.

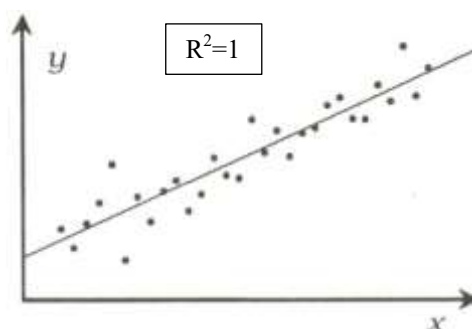
O grande problema em estudos observacionais é escolher um conjunto de variáveis que podem ou devem ser incluídas no modelo. Pode-se usar um modelo teórico, neste caso, com aproximações por modelos polinomiais. Geralmente é necessário restringir a abrangência do modelo para alguns valores ou região da(s) variável(is) preditora(s).

Para além de pressupostos gerais acerca da correta especificação do modelo e da medição sem erros das variáveis observadas, um pressuposto importante para todo o desenvolvimento é de que os erros do modelo têm média nula, não estão correlacionados e têm variância constante.

A não verificação desses pressupostos faz com que muitas das regressões deixem de fazer sentido, pois foram deduzidas a partir dessa hipótese.

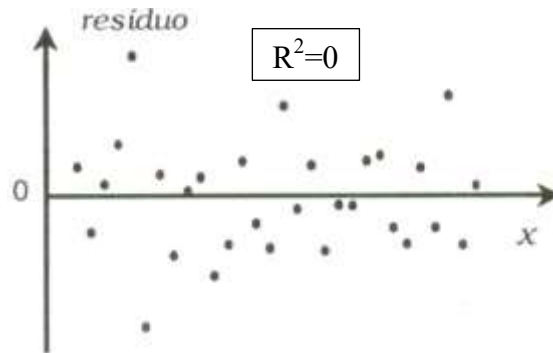
Uma condição adicional para os erros do modelo é de que estejam normalmente distribuídos. Não sendo essencial para a derivação das expressões de cálculo das estimativas dos parâmetros, este pressuposto é indispensável para todas as hipóteses e derivação de intervalos de confiança e, em geral, para toda a validação estatística dos resultados.

Figura A.1 – A variável preditora X é responsável por toda a variação nas observações Y_i



O coeficiente de determinação R^2 representa o quanto da variabilidade total dos dados é explicada pelo método da regressão. Quanto maior o R^2 , mais a variação total de Y é reduzida pela introdução da variável independente X no modelo.

Figura A.2 – A variável preditora X não ajuda na redução da variação Yi com a regressão linear



Junto com a análise de regressão linear, tem-se a Análise de Variância (ANOVA) para detecção de variáveis significativas na equação de regressão calculada (Teste F). Neste caso, são avaliadas duas hipóteses:

$$\begin{cases} H_0 : b_1 = b_2 = \dots = b_l = 0 \\ H_1 : b_1 \neq b_2 \neq \dots b_l \neq 0 \end{cases}$$

Se a hipótese nula (H_0) for verdadeira, todos os coeficientes serão nulos, não existem variáveis significativas na equação de regressão. Para calcular a ANOVA, os graus de liberdade deverão ter:

- a) Variáveis independentes: $k - 1$;
- b) Total: $kr - 1$;
- c) Resíduo: $k \times (r - 1)$.

k : número de variáveis independentes; r : número de elementos ou observações para cada variável independente (número de repetições).

O fator de correção (C) para $n = k \times r$, será:

$$C = \frac{(\sum Y)^2}{n} \quad (\text{A.6})$$

A soma do quadrado total:

$$SQ_{\text{Total}} = \sum Y^2 - C \quad (\text{A.7})$$

Soma dos quadrados das variáveis independentes:

$$SQ_{\text{Var_Ind}} = \frac{\sum (\text{Var_Ind})^2}{r} - C \quad (\text{A.8})$$

Soma dos quadrados dos resíduos:

$$SQ_{\text{Res}} = SQ_{\text{Total}} - SQ_{\text{Var_Ind}} \quad (\text{A.9})$$

Quadrado médio de variáveis independentes:

$$QM_{\text{Var_Ind}} = \frac{SQ_{\text{Var_Ind}}}{k - 1} \quad (\text{A.10})$$

Quadrado médio do resíduo:

$$QM_{\text{Res}} = \frac{SQ_{\text{Res}}}{k \times (r - 1)} \quad (\text{A.11})$$

Valor de F ($F_{\text{calculado}}$):

$$F = \frac{QM_{\text{Var_Ind}}}{QM_{\text{Res}}} \quad (\text{A.12})$$

O $F_{\text{calculado}}$ para os dados apresentados é comparado com o $F_{\text{significância}}$. Se $F_{\text{calculado}} > F_{\text{significância}}$, então existem variáveis significativas na equação de regressão. Apesar da detecção, o teste não informa quais seriam essas variáveis significativas (se existissem na equação de regressão).

Assim, para saber quais variáveis são significativas para um dado nível de significância, avalia-se o valor-p (valor-p). O valor-p representa a probabilidade de ser obtida uma observação da distribuição F com $(k - 1)$ e $[k \times (r - 1)]$ graus de liberdade maior ou igual ao valor observado pelo $F_{\text{calculado}}$. Se o valor-p calculado for menor que α (nível de significância), rejeita-se H_0 , caso contrário, se o valor-p for maior ou igual que α , aceita-se

H_0 . Assim, um valor-p pequeno indica uma forte justificativa (evidência) para a rejeição de H_0 .

b) Modelização para variáveis não-numéricas

A inclusão de categorias não-numéricas no modelo de regressão deve fazer-se recorrendo a variáveis binárias. No caso mais simples, em que há duas características (A e B), cria-se uma variável X_1 (“variável dummy”), com dois valores possíveis, correspondendo cada um a uma das categorias. Os dois valores costumam ser 0 e 1, mas podem ser usados qualquer par de números. Se houver “n” categorias, deverão criar-se as variáveis binárias necessárias para definir todas as categorias.

APÊNDICE B – ESTUDOS REALIZADOS PRELIMINARMENTE

Antes da definição deste estudo, estudos preliminares foram realizados com outros resíduos modificadores visando à modificação de CAP 50/70 convencional. Abaixo serão elencados tais resíduos e o porquê do não uso para realização deste estudo:

- O primeiro estudo visava a utilização de resíduo de alumínio proveniente de latinhas de refrigerantes e sucos. O produto derretido seria adicionado ao CAP aquecido. No entanto, o alumínio derretido solidifica-se rapidamente em contato com o ar, impossibilitando a produção dum CAP modificado com os equipamentos disponíveis atualmente no Laboratório de Pavimentos da Unila. Em outra tentativa, se tentou produzir um pó de alumínio a partir das latinhas, porém a indisponibilidade de equipamentos para trituração/moagem também impossibilitou tal alternativa.

- O segundo estudo visou a utilização de marmitas de isopor trituradas. Assim, isopor granular fino seria adicionado ao CAP aquecido, porém devido à temperatura de fusão do isopor ser muito diferente daquela dos materiais asfálticos, não foi obtida homogeneidade entre o isopor granulado adicionado à temperatura ambiente e o CAP aquecido. Também se tentou produzir uma liga com o aquecimento prévio do isopor granulado, porém a mesma formava uma espécie de resina totalmente colante, onde ao entrar em contato com qualquer superfície, se aderiria a mesma.

- O terceiro estudo testou a utilização de poliestireno proveniente de copos descartáveis. Esses copos foram triturados em pequenas partículas de aproximadamente 2×8 mm, porém ao adicioná-los ao CAP, não houve fusão do poliestireno tendo-se então um material heterogêneo que com o passar do tempo apresentava decantação do poliestireno e adesão deste no fundo do recipiente onde estava armazenado.

- O quarto estudo envolveu a utilização de sacolas plásticas e pode ser dividido em três partes. Na primeira parte, foi avaliada a utilização de sacolas mais rígidas de poliestireno, advindas do comércio varejista, em adição ao CAP. A adição de teores que alcançaram até 5% de sacolas, produziram CAP's modificados com menor grau de penetração, ou seja, houve aumento da consistência. Porém, os ensaios do ponto de amolecimento apresentaram temperaturas decrescentes, ao contrário do que deveria ocorrer haja vista o aumento da consistência do material modificado.

- Considerando a diminuição da consistência dos CAP's modificados indicada nos ensaios do ponto de amolecimento (menos suscetível a erro comparado ao ensaio de penetração), imaginou-se que as sacolas plásticas poderiam reduzir a viscosidade excessiva de um ligante asfalto-borracha com elevados teores de borracha moída de pneus. No entanto, ensaios laboratoriais realizados com sacolas plásticas trituradas de Polietileno de Elevada Densidade - PEAD (material menos rígido), indicaram pequeníssima redução da viscosidade excessiva para teores de adição de sacolas plásticas de no máximo 1%. Para maiores teores de adição de sacolas plásticas, ocorria um aumento da viscosidade do ligante asfalto-borracha. Assim, descartou-se a possibilidade de utilização das sacolas plásticas como elemento redutor da viscosidade excessiva.

- Desta forma, considerando o aumento observado da viscosidade dos ligantes asfalto-borracha-PEAD aliado a resultados de estudos encontrados em revisão bibliográfica sobre o tema, decidiu-se avaliar a modificação do CAP 50/70 convencional com adição de teores intermediários de borracha moída de pneus + PEAD de sacolas plásticas. Tal modificação poderia proporcionar ao CAP modificado resistência aos efeitos térmicos, aumento na viscosidade e maior elasticidade.