

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**EDUARDA FONTOURA**

**INCORPORAÇÃO DE FLOCOS RECICLADOS DE  
POLIETILENO EM LIGANTE ASFÁLTICO**

Porto Alegre  
Dezembro 2019

**EDUARDA FONTOURA**

**INCORPORAÇÃO DE FLOCOS RECICLADOS DE  
POLIETILENO EM LIGANTE ASFÁLTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de  
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia  
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito**

Porto Alegre  
Dezembro 2019

**EDUARDA FONTOURA**

**INCORPORAÇÃO DE FLOCOS RECICLADOS DE  
POLIETILENO EM LIGANTE ASFÁLTICO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2019

**ORIENTADOR**

**Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (UFRGS)**  
Ph.D. pela University of Nottingham

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. William Fedrigo (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eng. Carolina Macedo (PUCRS)**  
Eng. pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha mãe, Eleuza, por todo o apoio e motivação dado em toda minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Muitas pessoas foram importantes durante toda a jornada de graduação e aqui irei fazer um breve, mas verdadeiro agradecimento a elas.

Em primeiro lugar a minha mãe Eleuza e meus irmãos Eluiza e Guilherme que além de todo o apoio e amor dado durante toda a minha vida me deram todo o suporte para que pudesse realizar a graduação, tanto financeiramente como emocionalmente. Não posso deixar também de agradecer aos meus padrastos Daniel que não está mais presente fisicamente, mas que sempre contribuiu e apoiou minhas escolhas e estará comigo eternamente e Fernando por me incentivar na profissão e amparar minha mãe na minha ausência.

Aos amigos que ganhei na faculdade e no Centro Acadêmico (CECIV) e que foram minha família em Porto Alegre meu muito obrigada, vocês não dividiram apenas as horas de estudo e trabalhos em grupo, mas também as alegrias e frustrações que a faculdade e a vida proporcionam. Mesmo que cada um siga caminhos diferentes espero que continuemos juntos.

Agradeço também aos amigos que fiz no LAPAV, não vou mencionar todos, pois em mais de três anos tive a oportunidade de conviver com tantas pessoas maravilhosas e que contribuíram de diversas formas na minha vida que seria injusto esquecer alguém. Bolsistas, mestrandos, doutorandos, técnicos e estagiários meu muito obrigada, sem vocês os dias realizando ensaios e as pausas para o café não seriam as mesmas, e provavelmente este trabalho não estaria aqui.

Por último, mas não menos importante agradeço as políticas afirmativas de cotas que para uma estudante do ensino público e que dificilmente teria condições de arcar com a universidade privada foram realmente muito importantes ou melhor essenciais para que pudesse realizar o tão sonhado ensino superior.

Que nada nos limite. Que nada nos defina. Que nada nos  
sujeite. Que a liberdade seja a nossa própria substância,  
já que viver é ser livre.

*Simone de Beauvoir*

## RESUMO

É crescente a preocupação com o crescimento da produção de resíduos sólidos, principalmente os plásticos. Diversas áreas de conhecimento vêm desenvolvendo práticas que incorporem a reutilização e/ou reciclagem de embalagens plásticas, na pavimentação isto não é diferente. Autores propõe que utilizar resíduos de determinados tipos de polímeros podem trazer benefícios principalmente em relação à deformação permanente das misturas asfálticas por trazer acréscimos à sua rigidez. Este trabalho estudou a modificação de um cimento asfáltico de petróleo, tipo CAP 50/70, com adição de resíduos plásticos nos teores de 0,5% PEAD (polietileno de alta densidade), 0,5% PEBD (polietileno de baixa densidade), 1,0% PEAD, 1,0% PEBD e 2% PEAD/PEBD na proporção 80/20 de acordo com a massa de ligante. A incorporação ocorreu utilizando-se um moinho piloto de alto cisalhamento. Os resultados dos ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade Brookfield e Separação de Fase mostraram que o procedimento de mistura foi eficiente, porém não foi capaz de promover a total interação entre os flocos de polietileno e o ligante, observação feita principalmente no teor de 2,0% PEAD/PEBD. A inserção de resíduos diminuiu a penetração encontrada em todos os teores em comparação ao CAP 50/70 sem modificação e ao serem comparados com os valores mínimos especificados para os AMP 55/75 e AMP 60/85 as amostras com 1,0% de PEAD e 2,0% PEAD/PEBD não se enquadraram. Diferente do esperado, a temperatura do ponto de amolecimento não apresentou acréscimos significativos, mas todos os teores ficaram dentro do especificado para o CAP 50/70. Quanto a viscosidade, observou-se que os teores 0,5%PEAD, 0,5%PEBD e 1,0%PEBD não apresentaram diferenças significativas, o mesmo vale para as amostras sem resíduo e com 1,0% PEAD ao serem comparadas entre si. Em relação ao ensaio de separação de fase os resultados ficaram dentro do limite de 3°C de diferença entre as amostras de topo e base, indicando que mesmo com a dificuldade de incorporação o material pode ser utilizado. Ainda são necessários ensaios que avaliem a morfologia dos materiais e em amostragens em maiores volumes. No entanto, já é possível sugerir a utilização de aditivos que melhorem a interação polietileno-ligante para que a dispersão do material não gere problemas futuros. Destaca-se também a importância de análises químicas para compreender quais os reais benefícios da modificação proposta.

Palavras-chave: Resíduos plásticos. Cimento asfáltico de petróleo. Caracterização de ligante asfáltico.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Amostras de microtomografia.....	16
Figura 2 – Tipos de polímeros .....	17
Figura 3 – Propriedades do ligante modificado com PEBD.....	19
Figura 4 – Resíduos de polietileno tipo flocos.....	20
Figura 5 – Reator utilizado para modificação do CAP e em detalhe o cabeçote cisalhante.....	21
Figura 6 – Amostras para ensaio de separação de fase antes e após o condicionamento	22
Figura 7 – CAP com adição de 0,5 % de PEAD, 1,0% de PEAD e 2% de PEAD/PEBD	23
Figura 8 – Penetração (dmm) para o ligante com e sem resíduos plásticos.....	24
Figura 9 – Ponto de amolecimento (°C) para o ligante com e sem resíduos plásticos....	25
Figura 10 – Viscosidade Brookfield em função da temperatura para o ligante com e sem resíduo plástico.....	27
Figura 11 – Comparação múltipla de médias para a viscosidade.....	28



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de polímeros e suas vantagens e desvantagens.....	14
Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas do material.....	15
Tabela 3 – Resultados de estabilidade de estocagem.....	17
Tabela 4 – Propriedades do CAP 50/70.....	20
Tabela 5 – Índice de suscetibilidade térmica.....	26
Tabela 6 – Resultados separação de fase.....	28

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMP – Asfalto Modificado por Polímero

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CEMPRE – Compromisso Empresarial Para Reciclagem

IST – Índice de suscetibilidade térmica

NBR – Norma Brasileira

PE – Polietileno

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PET – Polietileno Tereftalato

PP – Polipropileno

PPC – *Polypropylene Chips*

PVC – Cloreto de Povilina

RPE – Resíduo de Polietileno

SBF – *Silo Bag Flakes*

SBP – *Silo Bag Pallets*

SBR – Borracha de Estieno - Butadieno

SBS – Estieno - Butadieno

SIS – Isopreno - Estieno

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
2.1 Polímeros.....	13
2.2 Resíduos plásticos incorporados em misturas asfálticas.....	14
2.3 Processos de incorporação de resíduos plásticos em misturas asfálticas.....	17
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1 Materiais.....	20
3.2 Procedimento de mistura.....	20
3.3 Caracterização do CAP modificado.....	22
3.4 Ensaio de separação de fase.....	22
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>23</b>
4.1 Incorporação dos resíduos.....	23
4.2 Caracterização do ligante .....	23
4.2.1 Penetração.....	23
4.2.2 Ponto de amolecimento.....	24
4.2.3 Índice de suscetibilidade térmica.....	25
4.2.4 Viscosidade Brookfield.....	26
4.3 Separação de fase.....	27
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>29</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

## 1. INTRODUÇÃO

O plástico é um dos resíduos mais prejudiciais ao meio ambiente já que a sua decomposição leva milhares de anos. Existem diversos tipos de polímeros e os mais encontrados no mercado são os do tipo termoplásticos, que devido a sua estrutura molecular possibilitam inúmeras fundições. Fazem parte deste grupo o cloreto de polivinila (PVC), o polietileno de alta densidade (PEAD), o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polietileno tereftalato (PET) entre outros. Devido à alta utilização destes materiais, eles acabam sendo os que geram um grande percentual de resíduos, ocasionando muitas vezes descartes inadequados. O Brasil é o quarto maior produtor de resíduo plástico, com 11.355.220 milhões de toneladas por ano, das quais apenas 145.043 toneladas são recicladas (Kaza *et al.*, 2018).

Em 2015, o CEMPRE (Compromisso Empresarial Para Reciclagem) divulgou, em um levantamento sobre reciclagem, que PEAD (plásticos de embalagens de detergentes, tambores para tintas e etc.) e PEBD (plásticos utilizados em sacolas de supermercado, filmes para embalar alimentos entre outros) correspondem a 17,4% e 10,6%, respectivamente, do total de resíduos de plástico reciclados.

A engenharia civil tem um papel muito importante no desenvolvimento das cidades, mas ao mesmo tempo gera muitos problemas ambientais. Não se pode mais pensar em engenharia sem buscar alternativas sustentáveis e que proporcionem um melhor aproveitamento dos resíduos produzidos tanto na própria engenharia, como fora dela.

No âmbito acadêmico, vários estudos visam a reciclagem de diversos resíduos sólidos. Na pavimentação, os ligantes modificados por polímeros são uma alternativa sustentável e proporcionam melhorias nas características do material. A incorporação de materiais plásticos nas misturas asfálticas auxilia na impermeabilização, diminui a suscetibilidade a mudanças de temperatura e reduz o desgaste por abrasão (Botaro *et al.*, 2006).

Kalantar *et al.* (2012) sugerem que a aplicação de resíduos plásticos em misturas asfálticas pode ser uma solução viável para a melhoria de características no mesmo nível que o polímero virgem traz e ainda tem benefícios econômicos já que é uma forma mais barata de obter o material. Em seus estudos, Sahu and Singh (2016) concluíram que um pavimento executado com cimento asfáltico de petróleo (CAP) modificado pode proporcionar maior resistência para rodovias de tráfego pesado e apresenta uma superfície que suporta melhor as variações climáticas. Em estudo semelhante, Attaelmanan *et al.* (2011) demonstram que a

incorporação de PEAD no ligante asfáltico fornece maior resistência à deformação permanente devido a sua alta estabilidade e gera valores maiores de módulo de resiliência a temperatura de 25 °C.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade da incorporação de resíduos plásticos do tipo PEAD e PEBD em um ligante asfáltico convencional do tipo 50/70 utilizando-se um moinho de alta taxa de cisalhamento.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste tópico são apresentadas algumas referências e estudos já realizados com resíduos plásticos incorporados em ligantes e misturas asfálticas. Também são apresentadas as formas de realizar a inserção do material e as vantagens do processo em via úmida.

### **2.1. Polímeros**

O termo polímero é utilizado para designar compostos de pesos moleculares múltiplos. Hoje são considerados polímeros as moléculas relativamente grandes e com estrutura no qual são encontradas unidades químicas simples repetidas (Machado, 2007).

A modificação de ligantes asfálticos com borracha surgiu no ano 1843 onde o principal objetivo da mistura era dar destino para o resíduo existente (Thomson, 1964). Contudo, apenas no início do século XX é que foram iniciados os estudos de asfaltos modificados, sendo que nos anos de 1970 a modificação com materiais plásticos já se apresentava com interesse econômico.

Atualmente, muitos materiais são utilizados como modificadores, sendo empregados teores de 3% a 6%, em relação ao peso, (Lesueur, 2009). No Brasil, os polímeros mais utilizados são o copolímero estieno e butadieno (SBS) e a borracha de estieno e butadieno (SBR), em geral, eles são escolhidos de acordo com o seu custo e benefício para o projeto viário (Silva, 2005).

Na Tabela 1 adaptada de Kalantar *et al*, (2012), são apresentadas as vantagens e desvantagens de alguns dos principais resíduos plásticos e que eventualmente podem ser utilizados como modificadores de ligantes.

**Tabela 1:** Tipos de polímeros e suas vantagens e desvantagens (adaptado de Kalantar *et al*, 2012).

Polímero	Vantagens	Desvantagens
Polietileno (PE)	Resistência a altas temperaturas Resistência ao envelhecimento Módulo elevado Baixo custo	Dificuldade de dispersão no ligante Problemas de instabilidade Necessidade de porcentagem elevadas Sem recuperação elástica
Polipropileno (PP)	Não modifica a viscosidade, mesmo com elevado teor Baixa penetração Amplia a faixa de plasticidade e resistência aglutinante	Problemas de segregação Não altera propriedades elásticas e mecânicas Baixa resistência a fissuras de fadiga
Cloreto de Povilina (PVC)	Menor disposição a fissuras	Age como filler
Estieno - Butadieno (SBS)	Alta flexibilidade a baixas temperaturas Melhor fluência e resistência a deformação a altas temperaturas Boa elasticidade	Alto custo Reduz resistência à penetração Alta viscosidade a altas temperaturas Baixa resistência ao calor e oxidação
Isopreno-Estieno (SIS)	Alta resistência ao envelhecimento Melhor adesividade com o agregado Boa estabilidade se em baixas proporções	Precisa de um asfalto com alto teor aromático e baixo teor de asfalteno

## 2.2. Resíduos plásticos incorporados em misturas asfálticas

Diferentes estudos abordam a utilização de resíduos plásticos em misturas asfálticas, mas não basta adicionar o material e esperar que as melhorias ocorram, é necessário conhecer o tipo de polímero utilizado, o comportamento da cadeia química, como se comportam em diferentes temperaturas e após o resfriamento além da forma como o mesmo irá se dispersar no CAP. Em seus estudos. Awwad e Shbeeb (2007) buscavam avaliar qual tipo de polietileno era adequado para modificar misturas asfálticas. As misturas foram desenvolvidas com PEAD e PEBD nos estados, moídos e não moídos e então comparadas com uma mistura sem modificação. Na Tabela 2. são apresentadas as características físicas e mecânicas dos

polímeros. Seguindo a metodologia Marshall de dosagem, as duas misturas foram realizadas com sete teores de polietileno (6, 8, 10, 12, 14, 16 e 18 % em relação ao peso do CAP).

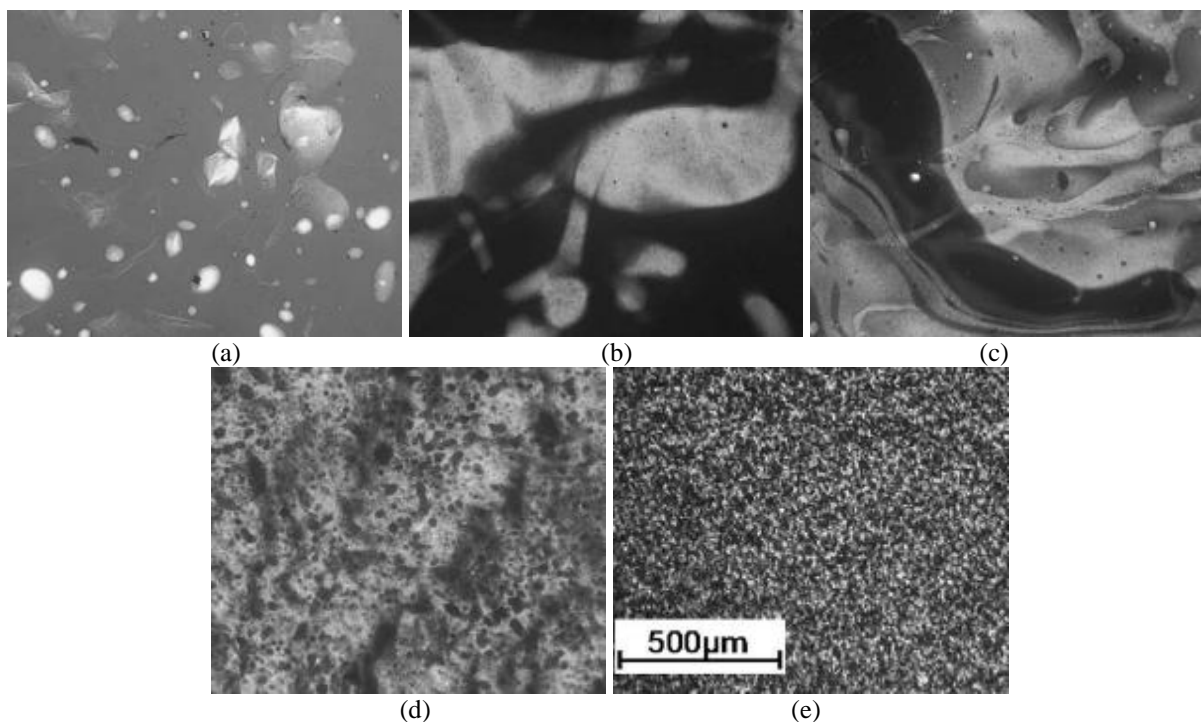
Os autores observaram que os resultados encontrados para PEAD foram melhores ao serem comparados aos de PEBD. Em comparação com a mistura sem modificador, os resultados de estabilidade e volume de vazios de agregado mineral foram maiores, trazendo benefícios em relação à deformação permanente. Além disso, utilizar o resíduo moído proporcionou uma melhor aderência ao agregado utilizado nas misturas propostas.

**Tabela 2:** Propriedades físicas e mecânicas do material (Awwad e Shbeeb, 2007).

Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Alongamento à tração (%)	Temperatura de amolecimento (°C)	Temperatura máxima de operação (°C)
PEBD	0,92	600	110	71
PEAD	0,95	900	125	82

A partir de análises de reologia, onde são estudadas as características da estrutura do ligante utilizado com o material modificador, Fuentes-Audén *et al.* (2008) estudaram um resíduo de polietileno (RPE). O material foi misturado ao CAP de forma mecânica a 180 °C em cinco teores (2, 5, 15, 25 e 50%). Na análise da compatibilidade do ligante com o polímero, a partir da estrutura morfológica apresentada no ensaio de microtomografia, é possível perceber que nos teores mais baixos (Figura 1 (a), (b) e (c)) os domínios plásticos ficam dispersos homogeneamente no ligante, enquanto que nos teores mais elevados (Figura 1 (d) e (e)) ocorre o contrário, ou seja, o CAP forma gotículas dispersas em uma fase polimérica. Esse comportamento é explicado pelo processo de destilação que a matriz química sofre devido ao enriquecimento da fase betuminosa pelo asfalto do polímero que é acentuado ao aumentar a concentração de resíduo no material.

Ainda naquele trabalho, análises dos demais ensaios demonstraram uma melhora nas características mecânicas do CAP, o que pode levar a um bom desempenho em relação à deformação permanente, mas causar danos de fadiga. Os autores concluíram também que teores acima de 5% não seriam indicados para aplicação em pavimentos, porém poderiam ser utilizados em membranas de impermeabilização.

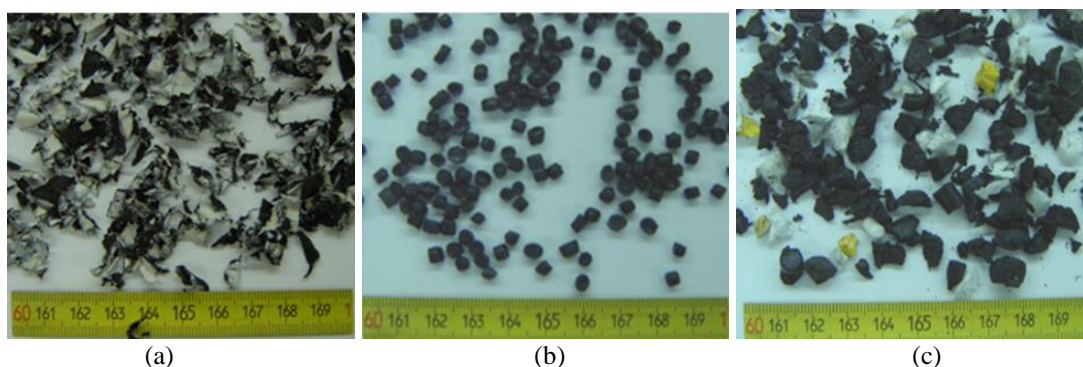


**Figura 1:** Amostras de microtomografia: a) 2% RPE; b) 5% RPE; c) 15% RPE; d) 25% RPE; e) 50%RPE (Fuentes-Audén *et al.*,2008).

Em estudos semelhantes, Khan *et al.* (2016) compararam PEAD, PEBD e borracha moída. Os resultados mostraram que os três materiais são satisfatórios como modificadores, sendo o PEBD ideal para todas as temperaturas e a borracha indicada para pavimentos com elevadas temperaturas. Ainda neste estudo, os autores concluíram que ao utilizar estes materiais a melhora no comportamento elástico do ligante gera uma elevação na vida útil do pavimento.

Angelone *et al.* (2016), realizaram um estudo utilizando silos de armazenamento (compostos basicamente por polietileno de alta e baixa densidade e polipropileno) descartados quando já não possuem condições de trabalho. O material foi incorporado em três teores (2, 4 e 6%) e em três formatos, conforme apresentado na Figura 2. Os *flakes* e as pelotas de polietileno foram denominados como SBF (*silobag flakes*) e SBP (*silobag pellets*) e respectivamente os *chips* de polietileno, denominados de PPC (*polypropylene chips*). Os resíduos de 2 a 10 mm de tamanho foram incorporados em relação ao peso total da mistura, sendo o SBF em caráter adicional e o SBP e PPC em substituição aos agregados de granulometria semelhante.





**Figura 2:** Tipos de polímeros: a) SBF; b) SBP; c) PPC (Angelone *et al.*, 2016).

Os ensaios de deformação permanente demonstraram que todas as misturas utilizando o resíduo apresentaram resultados melhores ao serem comparados com uma mistura de controle sem o material. As misturas com *flakes* e pelotas apresentaram uma suscetibilidade térmica reduzida com menores valores de módulo dinâmico ( $E^*$ ) a baixas temperaturas e maiores valores a temperaturas elevadas, o que indica um bom comportamento a fadiga. No comparativo entre os teores e formatos o teor de 2% SBF foi considerado o de melhor desempenho.

Com o propósito de dar uma alternativa aos resíduos plásticos produzidos na Irlanda, Casey *et al.* (2008) apresentaram um estudo com diversos tipos de polímeros, entre eles, o PEAD e o PEBD foram os que se mostraram mais compatíveis com o ligante utilizado. Os resultados de estabilidade à estocagem, apresentados na Tabela 3, realizados para os teores de 3% e 5%, mostraram que o teor mais elevado apresentava uma dissociação significativa demonstrada pela diferença entre os valores de ponto de amolecimento do topo e da base. Assim, os autores concluíram que utilizar teores elevados necessitariam de algum aditivo químico que possibilitasse uma maior homogeneidade na mistura.

**Tabela 3:** Resultados de estabilidade à estocagem (adaptado de Casey *et al.* 2008).

Material	Topo da amostra			Base da amostra		
	Ponto de amolecimento (°C)	Penetração (dmm)	Viscosidade a 150 °C (Pas)	Ponto de amolecimento (°C)	Penetração (dmm)	Viscosidade a 150 °C (Pas)
3% PEBD	47,2	84	2,3	47,2	88	2,4
5% PEBD	52,2	87	4,1	43,0	114	2,4
3% PEAD	50,5	98	2,8	49,9	106	2,5
5% PEAD	58,0	83	4,2	43,8	107	3,1

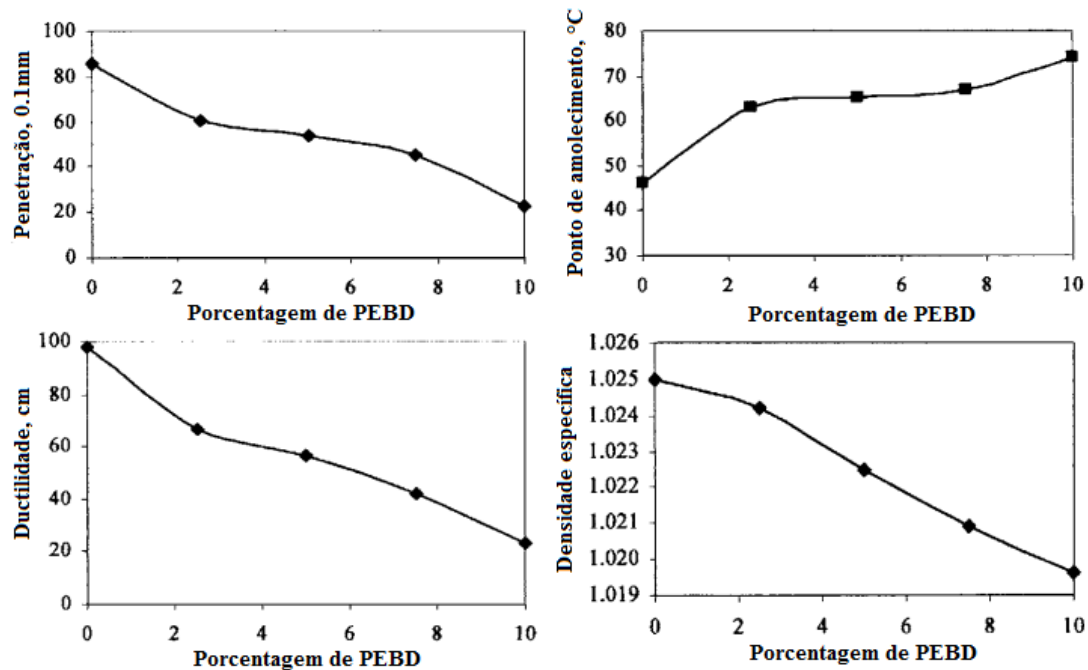
### 2.3. Processos de incorporação de resíduos plásticos em misturas asfálticas

Existem dois processos usuais para realizar a incorporação dos resíduos nas misturas asfálticas, adicionando o material nos agregados ou modificando o ligante (Kalantar *et al.*,

2012). O primeiro método consiste na aplicação da chamada via seca, onde o material é adicionado previamente nos materiais secos (agregados) e após o ligante asfáltico é acrescentado na mistura. Esse processo foi utilizado por Awwad e Shbeeb (2007), Vasudevan *et al.* (2010), Sahu e Singh (2016), Angelone *et al.* (2016) e Macedo (2018). Neste último, o teor de 5% de resíduo (uma combinação de PEAD e PEBD) incorporado na mistura apresentou resultados satisfatórios em relação ao comportamento mecânico, com valores de módulo de resiliência e resistência à tração superiores aos da mistura de referência.

A possibilidade de substituir os agregados por polímeros foi estudada por Zoorob e Suparma (2000). A mistura contendo resíduos plásticos, sendo grande parte do tipo PEBD, apresentou uma redução na densidade em comparação com uma mistura de controle. Tal redução foi de 2,37 g/cm<sup>3</sup> para 1,99 g/cm<sup>3</sup>, indicando uma possível vantagem já que o volume total da mistura reduz podendo diminuir os custos de transporte. Além disso, os autores concluíram que o processo em via seca foi eficiente no caso da impossibilidade de modificação do ligante na usinagem.

O processo em via úmida consiste em adicionar o resíduo no ligante asfáltico. Neste processo, é necessário utilizar equipamentos adequados e temperaturas relativamente elevadas para que o resíduo seja incorporado, tornando a composição homogênea. Punith e Veeraragavan (2007) realizaram a modificação de um ligante asfáltico com PEBD fazendo uso de um agitador mecânico de alta velocidade, a mistura era realizada a 3500 rpm a temperaturas que variaram de 160 °C a 190°C de acordo com o teor de resíduo utilizado (2,5%, 5%, 7,5% e 10%). Os resultados apontaram reduções da penetração e ductilidade e aumentos do ponto de amolecimento e densidade específica (Figura 3). A análise dos ensaios de imersão e ebulição demonstrou que o processo foi eficiente ao melhorar a capacidade de resistência à umidade. Além disso, nos resultados de módulo de resiliência e resistência à tração o teor de 5% foi o que apresentou os melhores resultados.



**Figura 3:** Propriedades do ligante modificado com PEBD (adaptado de Punith e Veeraragavan, 2007).

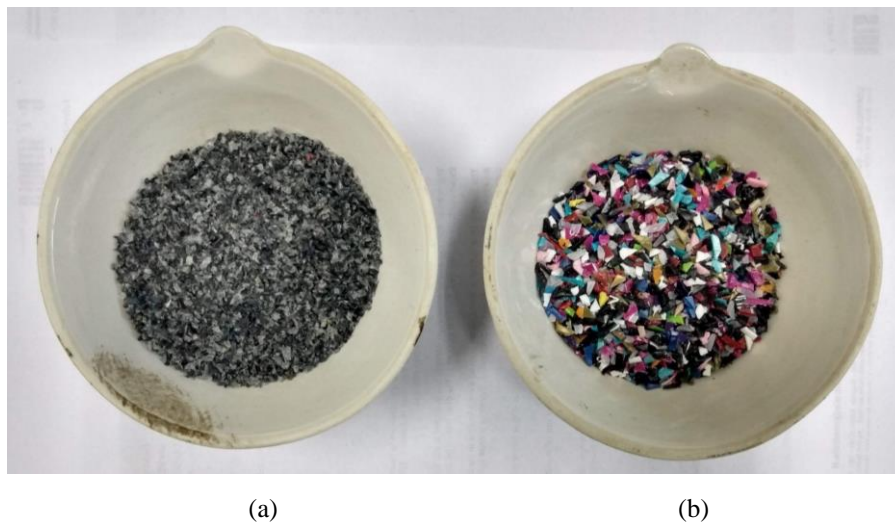
Swami *et al.* (2012) apresentaram um estudo onde o processo de incorporação de 10% de resíduos foi realizado entre 160 °C e 170 °C por aproximadamente 30 minutos de forma manual. Utilizando resíduos de sacolas plásticas picados em tamanhos entre 2,36 mm e 4,75 mm, os resultados demonstraram que a modificação do CAP melhorava consideravelmente as características do mesmo. Foi observado um acréscimo do ponto de amolecimento pode levar a uma mistura que suporte melhor as altas temperaturas em rodovias com climas quentes. Também se verificou o decréscimo da penetração, fato que levaria a uma maior capacidade de carga do pavimento. Os autores ainda apontaram que, dependendo do teor utilizado, a quantidade de ligante necessária na mistura poderia ser menor, contribuindo para uma economia no projeto final.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação dos teores de 0,5% de PEBD, 0,5% de PEAD, 1% de PEBD, 1% de PEAD e 2% de PEAB/PEBD em relação ao peso de ligante, foram realizadas por meio dos ensaios de caracterização de ligante (Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade Brookfield e de Separação de Fase). Adicionalmente, foram realizadas análises estatísticas para avaliar as diferenças entre os teores propostos nos resultados de viscosidade.

### 3.1. Materiais

Para a elaboração deste trabalho foram utilizados resíduos plásticos de polietileno de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD), limpos e no formato de flocos (Figura 4). Com o intuito de obter um maior controle sobre a granulometria, os flocos foram peneirados e separados, sendo utilizado apenas o passante na peneira de 2,36 mm.



**Figura 4:** Resíduos de polietileno tipo flocos: (a) PEBD e (b) PEAD.

O ligante asfáltico utilizado para a incorporação foi o convencional do tipo 50/70, cujas propriedades físicas são apresentadas na Tabela 4. Optou-se por utilizar este ligante por ainda ser o mais comum em utilização nas obras viárias do país e por não possuir nenhum modificador.

**Tabela 4:** Propriedades do CAP 50/70

Propriedade	Método	Especificação	Resultado
Massa específica	NBR 6296	-	1,009
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560	46	48
Penetração (0,1mm)	NBR 6576	50 - 70	61
Viscosidade Brookfield a 135°C (cP)	NBR 15184	Min. 274	327,5
Viscosidade Brookfield a 150°C (cP)	NBR 15184	Min. 112	165
Viscosidade Brookfield a 177°C (cP)	NBR 15184	57 - 285	61,5

### 3.2. Procedimento de mistura

O processo de incorporação dos resíduos de PEAD e PEBD escolhido foi por meio do uso de um moinho de alta taxa de cisalhamento, conforme já tratado nos itens anteriores. Para isso

utilizou-se um reator de aço, da marca SEMCO modelo ME1001 (Figura 5). O material era misturado por meio do cabeçote cisalhante com aberturas de aproximadamente 1,5 mm, visando que tais aberturas reduzissem o tamanho das partículas do material, contribuindo assim para a homogeneidade da mistura.

O teor de resíduo proposto inicialmente foi de 2% de uma mistura de PEAD e PEBD na proporção de 80/20. Esse teor foi determinado com base nas referências estudadas, que indicam que o teor ideal seria abaixo dos 5%. A proporção escolhida foi a mesma estudada por Macedo (2018), que obteve resultados positivos elevando a porcentagem de PEAD em relação ao PEBD.

Inicialmente, o CAP foi pré-aquecido em estufa por aproximadamente uma hora a 150 °C, para evitar que o material perdesse muita temperatura ao ser colocado na cuba do reator. Já na cuba do equipamento, os teores de PEAD e/ou PEBD foram incorporados aos poucos ao ligante, que estava a 180 °C e com o agitador a 4000 rpm. O uso de tal temperatura e velocidade baseou-se em estudo de Silva (2005), que utilizou o mesmo equipamento.



**Figura 5:** Reator utilizado para modificação do CAP e em detalhe o cabeçote cisalhante.

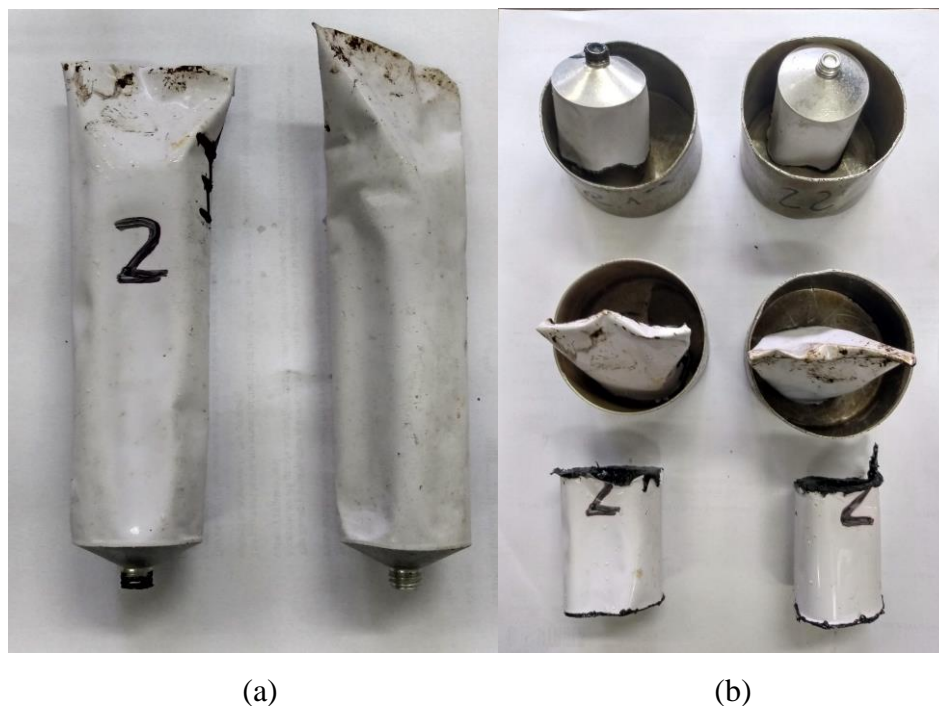


### 3.3. Caracterização do CAP modificado

Com o intuito comparar as propriedades do CAP com e sem resíduos plásticos, nos teores propostos, foram realizados ensaios de caracterização. Os ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento (Método Anel e Bola) e Viscosidade Rotacional seguiram os procedimentos descritos nas normas ABNT NBR 6576 (2007), NBR 6560 (2008) e NBR 15184 (2004) respectivamente.

### 3.4. Ensaio de separação de fase

O ensaio de separação de fase foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 15166 (2004). O método tem como objetivo avaliar a estabilidade à estocagem a quente de ligantes modificados por polímero por meio da separação de fases a partir do armazenamento em condições estáticas. As amostras de aproximadamente 50 gramas de ligante são colocadas em tubos metálicos e armazenadas na vertical em estufa por 48 horas a 163 °C. Após este período as mesmas são condicionadas em refrigerador a uma temperatura de aproximadamente -6,7 °C por no mínimo 4 horas. O resultado é dado por meio do ensaio do ponto de amolecimento do topo e base dos tubos (Figura 6) e a análise é realizada a partir da diferença entre os mesmos.



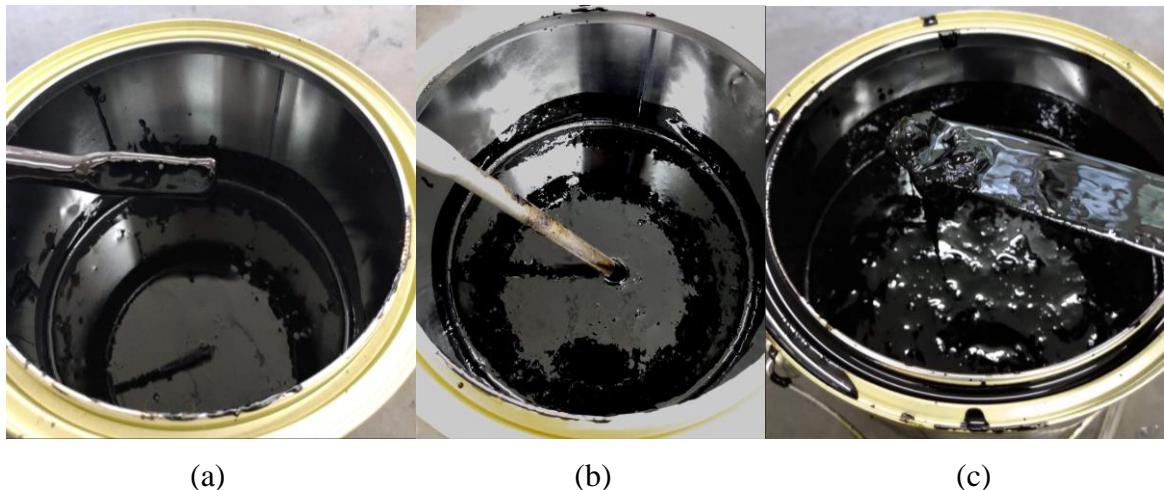
**Figura 6:** Amostras para ensaio de separação de fase: (a) antes do condicionamento e (b) após o condicionamento.

## 4. RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos para os teores de resíduos plásticos.

### 4.1. Incorporação dos resíduos

Ao se passar aproximadamente uma hora e meia do processo de mistura notou-se que o polímero não estava misturando de forma adequada, com a formação grumos do material que ficavam flutuando no ligante. Todos os teores testados apresentaram este mesmo problema, entretanto o material com 2% de PEAD/PEBD foi o que apresentou o pior resultado (Figura 7). Acredita-se que isto tenha ocorrido devido a interação dos dois materiais com o ligante, pois, mesmo que apresentem propriedades semelhantes, as densidades e temperaturas de amolecimento dos polímeros são diferentes.



**Figura 7:** CAP com adição de: (a) 0,5 % de PEAD, (b) 1,0% de PEAD e (c) 2% de PEAD/PEBD.

Considerando esse efeito de segregação do material, para a realização dos ensaios, os ligantes já modificados eram agitados manualmente por alguns minutos para minimizar problemas na homogeneidade das amostras de ensaio.

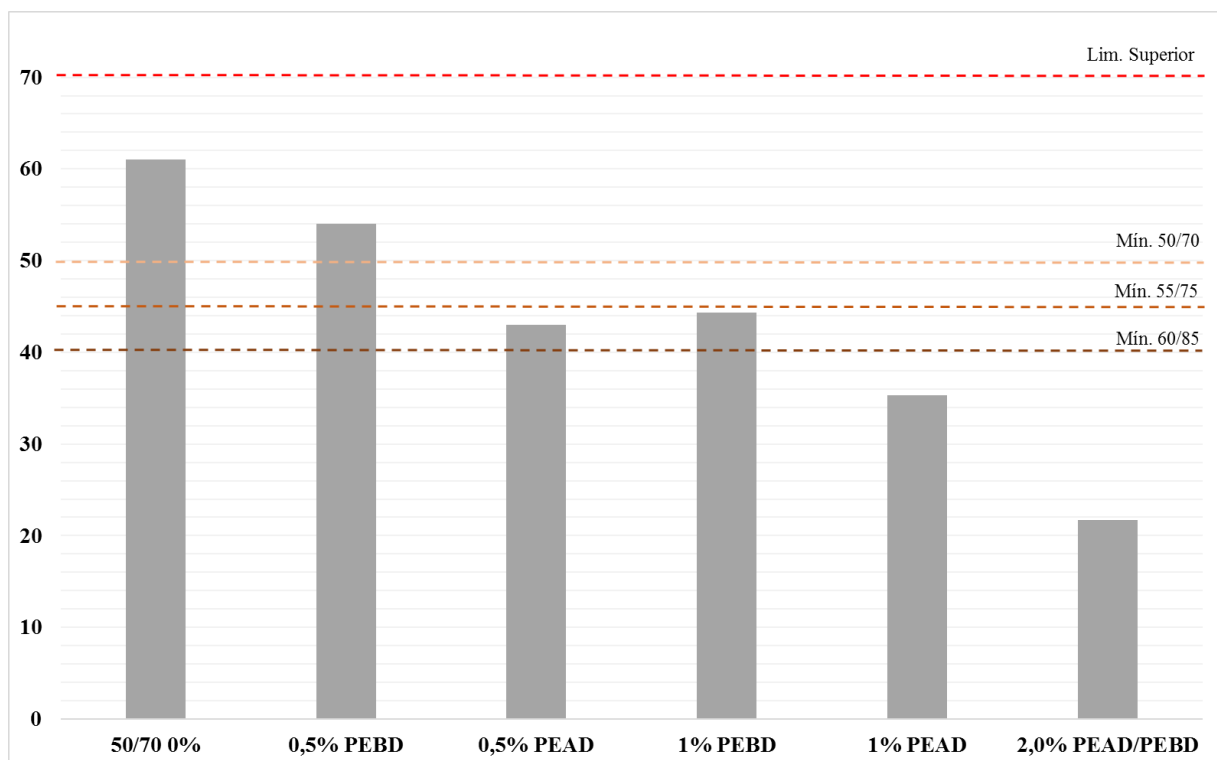
### 4.2. Caracterização do ligante

A seguir são apresentados os valores encontrados para o CAP sem modificador e com os teores de 0,5% PEBD, 0,5% PEAD, 1% PEBD, 1% PEAD e 2% PEAD/PEBD.

#### 4.2.1 Penetração

Na Figura 8, são apresentados os resultados de penetração obtidos para todos os teores propostos e as faixas de limites para os seguintes ligantes: AMP 60/85 e AMP 55/75, ambos modificados por polímeros elastômeros, e para o CAP 50/70.

As amostras compostas por 1,0% PEAD e 2,0% PEAD/PEBD ficaram abaixo dos limites mínimos recomendados para todos os ligantes. Os teores de 0,5% PEAD e 1% PEBD ficaram acima do limite mínimo do AMP 60/85, já o teor de 0,5% PEBD foi o único que se enquadrou em todos os limites mínimos recomendados.



**Figura 8:** Penetração (dmm) para o ligante com e sem resíduos plásticos.

A utilização dos resíduos causou uma diminuição considerável na penetração do CAP, este resultado já era esperado, uma vez que a literatura aponta que a inserção de polímero no CAP causa um aumento na rigidez do mesmo. Considerando a modificação proposta, o teor de 0,5% PEBD seria adequado por se enquadrar nos limites tanto do ligante convencional como nos modificados, porém vale ressaltar que os teores de 0,5% PEAD e 1% PEBD ainda poderiam ser utilizados por estarem dentro da faixa de aceitação do AMP 60/85.

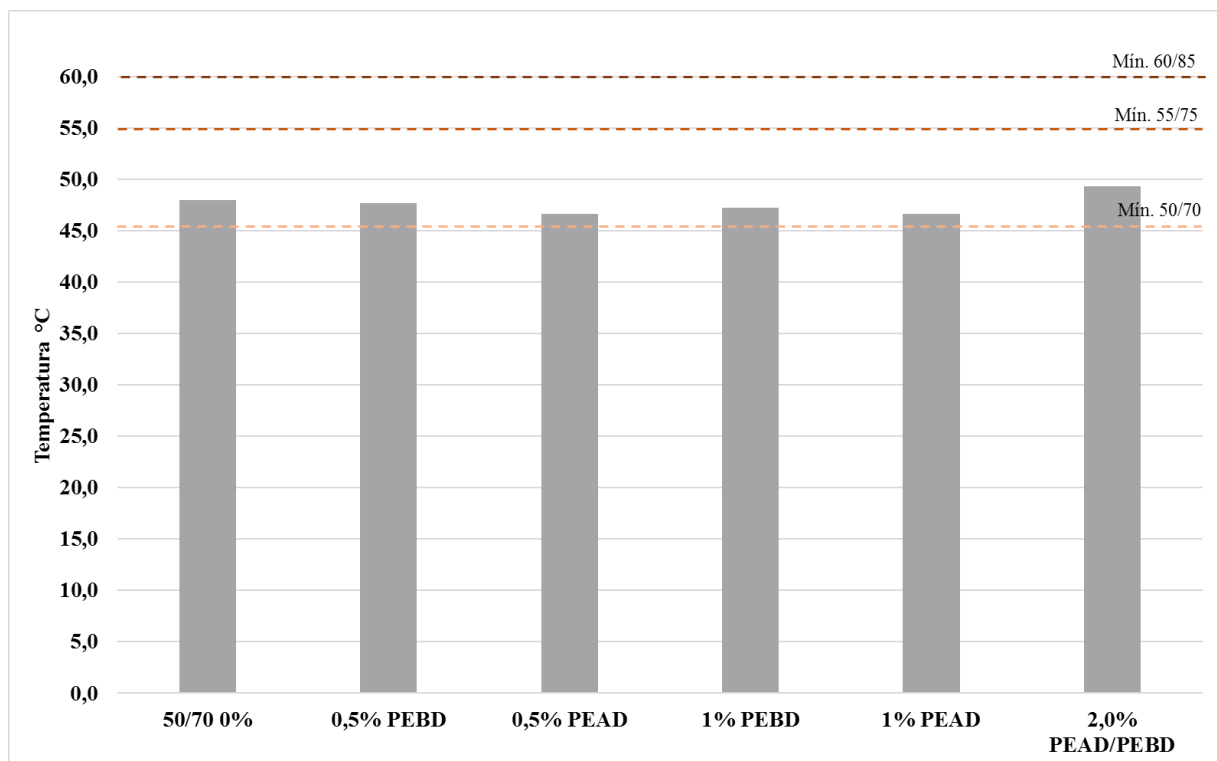
#### 4.2.2 Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento das amostras ensaiadas é apresentado na Figura 9. Os resultados mostram que todos os teores apresentaram uma temperatura de ponto de amolecimento



superior a 46 °C, valor mínimo recomendado para o CAP 50/70. No entanto nenhum deles chegou aos valores estabelecidos para os AMP 60/85 e 55/75. Considerando os teores separadamente o que apresentou a maior temperatura foi o de 2% PEAD/PEBD, sendo superior inclusive à amostra sem resíduos plásticos.

Esperava-se que a temperatura de amolecimento fosse elevada com a inserção dos resíduos e, ainda que essa temperatura tenha aumentado com o aumento do teor de plástico, isso não foi observado de forma considerável. O principal motivo para os resultados encontrados não estarem conforme o esperado pode ser a falta de homogeneidade do CAP com os resíduos testados, devido à baixa quantidade necessária de material para preencher os anéis do ensaio, é possível que os valores tenham sido influenciados pela presença de mais ou menos plástico, mesmo em amostra com o mesmo teor.



**Figura 9:** Ponto de amolecimento (°C) para o ligante com e sem resíduo plástico.

#### 4.2.3 Índice de Suscetibilidade térmica

Utilizando os resultados de penetração e ponto de amolecimento, a partir da norma DNIT 095/2006 – EM, foram calculados os índices de suscetibilidade térmica (IST) apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Índice de suscetibilidade térmica.

Teor	0,5% PEAD	0,5% PEBD	1,0% PEAD	1,0% PEBD	2,0% PEAD/PEBD
IST	-2,4	-1,6	-2,7	-2,2	-2,9

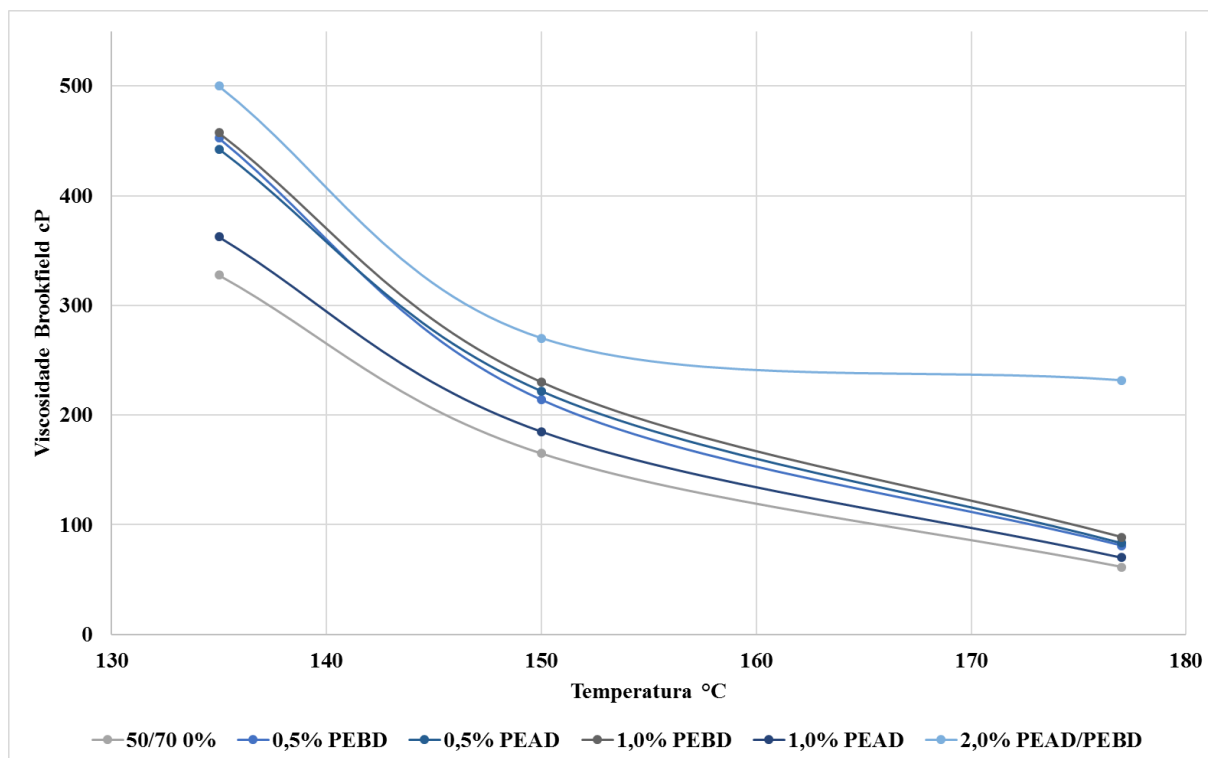
A norma estabelece um intervalo de -1,5 a 0,7 para ligantes convencionais. Segundo Bernucci *et al.* (2008), valores maiores que 1,0 indicam que o CAP já estaria modificado, já valores menores que -2,0 indicam que o CAP é sensível a mudança de temperatura. Neste sentido, todos os teores apresentaram resultados fora do intervalo indicado para o CAP 50/70, além disso todos apresentaram valores negativos indicando sensibilidade de temperatura o que provavelmente tem relação com os polímeros utilizados, já que ambos apresentam características diferentes no quesito temperatura.

#### 4.2.4 Viscosidade Brookfield

Os resultados de viscosidade são apresentados na Figura 10. Como já se esperava, a viscosidade reduziu com o aumento da temperatura, independentemente do teor de resíduo. As curvas para 0,5% PEBD, 0,5% PEAD e 1,0% PEBD apresentaram valores bem semelhantes, principalmente a 177 °C. A amostra com 2% PEAD/PEBD foi a que apresentou os maiores valores de viscosidade.

As especificações para viscosidade do CAP 50/70 apresentam apenas valores mínimos, neste sentido, todos os teores levaram a valores maiores. Para os ligantes modificados (AMP 55/75 e AMP 60/95), os valores especificados são máximos (1000 cP, 2000 cP e 3000 cP de acordo com a temperatura), portanto, os valores apresentados também se enquadrariam para estas condições.

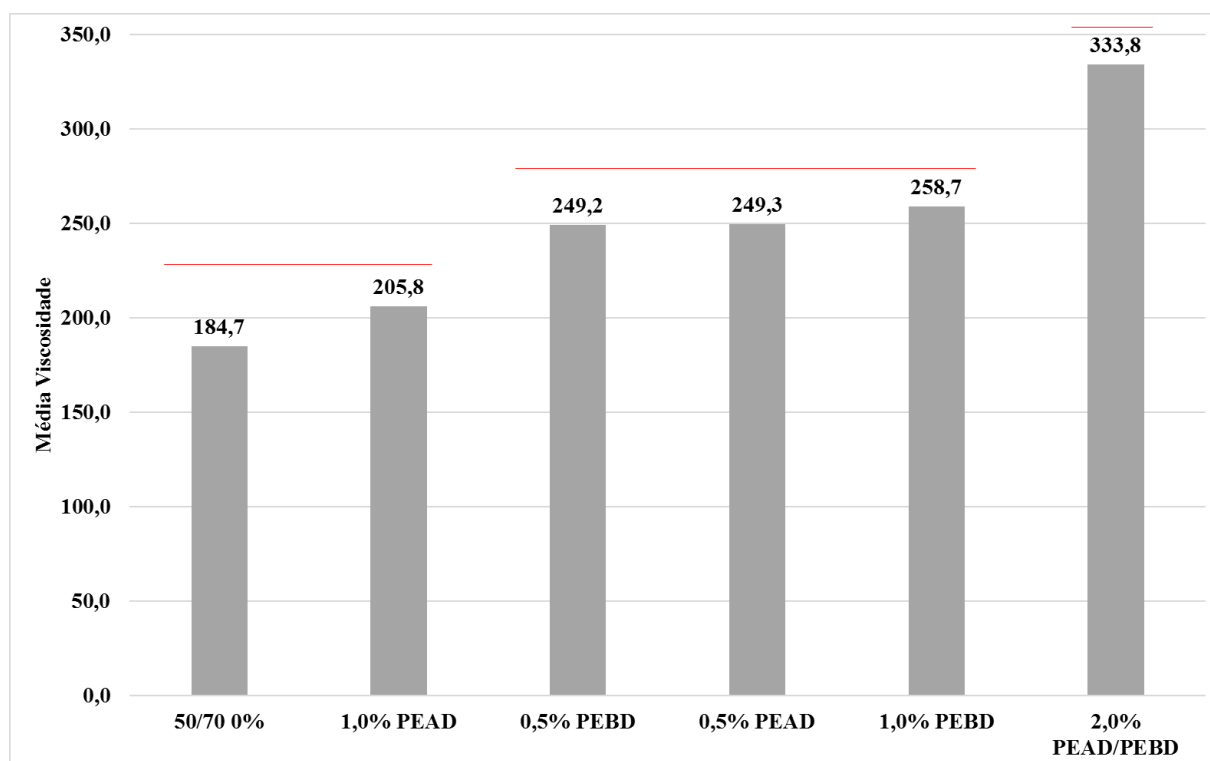
Com o intuito de entender melhor a influência dos resíduos na viscosidade do CAP foi realizada uma análise estatística com os resultados encontrados. Foi aplicado o teste valor-P pelo método ANOVA sem repetição e a comparação múltipla de médias por meio do método de DUNCAN, ambos calculados utilizando o Excel. A hipótese testada busca responder qual teor seria mais indicado e se a variação do mesmo é numericamente significativa.



**Figura 10:** Viscosidade Brookfield em função da temperatura para o ligante com e sem resíduo plástico.

O teste de probabilidade considera que a variável tratada neste caso como Material é significativa se apresentar valor-P menor que 0,05. O valor encontrado foi de 0,0015, indicando que a inserção dos resíduos é significativa para a viscosidade.

Como o ensaio de viscosidade foi realizado sem duplicatas, para empregar o método de DUNCAN a média foi calculada com os valores das três temperaturas testadas. A Figura 11 apresenta o resultado obtido a partir do limite de aceitação de 50,32, ou seja, as médias ao serem comparadas se enquadram no mesmo grupo quando a diferença entre elas não ultrapassa este limite. Os resultados mostram que os teores de 0,5% PEBD, 0,5% PEAD e 1,0% PEBD não teriam diferença entre si por apresentarem a mesma resposta média, o mesmo vale para o CAP sem resíduo e o teor de 1% PEAD. Estes resultados poderiam significar que de forma prática não teria diferença colocar 0,5% PEBD, 0,5% PEAD ou 1,0% PEBD no CAP, assim como 1,0% PEAD não teria variação considerável para o CAP convencional. No entanto, vale destacar que, devido à falta de replicadas, estes resultados não podem ser considerados conclusivos, pois ainda podem haver diferenças devido a dispersão do material em cada amostra ensaiada, o que neste caso não foi considerado na análise.



**Figura 11:** Comparação múltipla de médias para a viscosidade.

### 4.3. Separação de fase

Todos os teores propostos com exceção ao de 2% PEAD/PEBD completaram os ciclos do ensaio e os resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 6:** Resultados da separação de fase.

Material	Temperatura do ponto de amolecimento (°C)		
	Topo	Base	Diferença
0,5% PEAD	48,3	47,4	0,90
0,5% PEBD	46,75	45,8	0,95
1,0% PEAD	48,1	46,9	1,20
1,0% PEBD	49,05	46,9	2,15

A amostra relativa ao topo do tubo contendo 2% PEAD/PEBD não pode ser analisada pois o resíduo plástico ficou todo aglomerado nesta região, impossibilitando o preenchimento dos anéis para o ponto de amolecimento.

A norma utilizada não menciona qual deve ser a diferença máxima entre as temperaturas de topo e base para que o ensaio seja aceito, porém a DNER-ME 384/99 – Estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero, que possui procedimento semelhante ao realizado, considera que a diferença máxima não pode ultrapassar 3 °C para amostras em duplicata.

Assim, todas as amostras ensaiadas estariam dentro deste limite e, portanto, poderiam ser utilizadas. Vale salientar que, ainda que a diferença não tenha sido ultrapassada, é necessário realizar outros ensaios para avaliar a estrutura do material para que o mesmo possa ser utilizado em misturas asfáltica, por exemplo.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A proposta deste trabalho era realizar a modificação de um CAP 50/70 com diferentes teores de PEAD e PEBD por meio do uso de um moinho de alta taxa de cisalhamento. Neste sentido, o objetivo foi alcançado.

Ainda que os resultados tenham caráter sintéticos da caracterização das propriedades dos ligantes obtidos nas combinações testadas, demonstrou-se que os teores de 0,5% PEBD, 0,5% PEAD e 1,0% PEBD obtiveram valores mais adequados e próximos aos ligantes com os quais foram comparados. O teor de 2,0% PEAD/PEBD apresentou problemas de homogeneidade, o que impossibilitou a realização do ensaio de separação de fase e, portanto, necessita de uma maior atenção em relação a forma de incorporação.

A partir das análises estatísticas, compreendeu-se que a variação dos teores de 0,5% PEAD e 0,5% PEBD não apresentou variação considerável indicado a necessidade de melhor avaliação da viabilidade de utilizar um ou outro resíduo. Constatou-se também, o teor de 1,0% PEAD não apresentou a melhor resposta em comparação com o CAP sem modificação, mesmo possuindo a densidade mais próxima a do CAP. Estes fatos sugerem que é necessário realizar estudos em relação a química do processo de incorporação, para entender melhor as reações que ocorrem entre os materiais.

Algumas perguntas ainda precisam ser respondidas para que a viabilidade da utilização de resíduos de polietileno seja realmente possível, a seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, como forma de ampliar a discussão da interpretação dos resultados nesta pesquisa:

- Realizar mais observações do ensaio de viscosidade para que a análise estatística tenha respostas mais confiáveis;
- Análises de reologia do material, para avaliar a estrutura química das composições propostas;

- Avaliar se a pré-mistura do resíduo com uma fração de ligante, semelhante ao que se realiza com a borracha, pode trazer melhorias na homogeneidade do material, principalmente para teores mais elevados de resíduo;
- Utilizar algum aditivo ou agente de compatibilidade durante o procedimento de mistura que possibilite uma maior interação química do ligante com o polietileno;
- Avaliar como a modificação em via úmida interage com os agregados por meio da dosagem de uma mistura asfáltica;
- Por último, sugere-se que sejam realizados estudos econômicos em relação a diferença entre os CAP já modificados e a modificação com resíduos plásticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2004) *NBR 15166 – Asfalto modificado – Ensaio de separação de fase*. Associação Brasileira de Normas técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) *NBR 15184 – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional*. Associação Brasileira de Normas técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2008) *NBR 6560 – Determinação do ponto de amolecimento – Método anel e bola*. Associação Brasileira de Normas técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2007) *NBR 6576 – Determinação da penetração*. Associação Brasileira de Normas técnicas, Rio de Janeiro.
- Angelone, S., Cauhapé Casaux, M., Borghi, M., & Martinez, F. O. (2016). Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(5), 1655–1665.
- Attaelmanan, M., Feng, C. P., & Ai, A. H. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2764–2770.
- Awwad, M. T., & Shbeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. *American Journal of Applied Sciences*, 4(6), 390–396.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2008) Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros. 1ª ed. (3ª reimpr.) Rio de Janeiro: PETROBRÁS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO, 2008 (reimpr. 2010)
- Botaro, V.R.; Castro, S.R.; Junior, F.R.; Cerantola, A.E (2006). “Obtenção e caracterização de blendas de asfalto CAP 20, modificado com poliestireno reciclado, resíduos de pneu e lignina organossolve”. REM: R. Esc.Minas, Vol. 59, pp. 117-122.

- CEMPRE. Review. (2015). Disponível em: < [http://cempre.org.br/artigo\\_publicacao/artigos](http://cempre.org.br/artigo_publicacao/artigos)>. Acesso em: 23 ago. 2019, 14:20. São Paulo.
- Casey, D., McNally, C., Gibney, A., & Gilchrist, M. D. (2008). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1167–1174.
- DNER (1999) Método de ensaio 384 - *Estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- Fuentes-Audén, C., Sandoval, J. A., Jerez, A., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F. J., Partal, P., & Gallegos, C. (2008). Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen. *Polymer Testing*, 27(8), 1005–1012.
- Kalantar, Z. N., Karim, M. R., & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*, 33, 55–62.
- Kaza, S., Yao L., Bhada-Tata P. e Van Woerden V. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *Urban Development Series*. Washington, DC: World Bank
- Khan, I. M., Kabir, S., Alhussain, M. A., & Almansoor, F. F. (2016). Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction. *Procedia Engineering*, 145, 1557–1564.
- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1–2), 42–82.
- Macedo, C. (2018). *Estudo Experimental Da Incorporação De Resíduos Plásticos nas Misturas Asfálticas*. Trabalho de conclusão de curso. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- Machado, R. Z. (2007). *Asfalto Modificado Com Polímero Sbs Para / Pavimentos Drenantes*.
- Punith, V. S., & Veeraragavan, A. (2007). Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Polyethylene as Additive. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 500–507.
- Sahu, A. K., & Singh, R. K. (2016). *Application of Waste Plastic Materials in Road Construction*. 2nd International Seminar On —Utilization of Non-Conventional Energy Sources for Sustainable Development of Rural Areas.
- Silva, L. S. da. (2005). *Contribuição ao Estudo Do Envelhecimento de Ligantes Asfálticos. Influência da Adição de Polímeros e Comportamento Frente a Radiação UV*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Swami, V.; Jirge, A.; Patil, K.; Patil, S.; Salokhe, K. (2012) Use of waste plastic in construction of bituminous road. *Journal of Engineering*, Vol 04, No 05, pp. 2351-2355
- Zoorob, S. E., & Suparma, L. B. (2000). Composites Laboratory design and investigation of the properties of

continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt).  
In *Cement & Concrete Composites* (Vol. 22). Retrieved from [www.elsevier.com/locate/cemconcomp](http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp)

Thomson D. C. (1964), "Rubber modifiers", em *Bituminous Materials: Asphalts, Tars and Pitches*, A. J. Hoiberg Ed., Vol. 1, New York: Interscience Publishers, 375-414.

Vasudevan, R.; Chandra Sekar, A. R.; Sundarakannan, B.; Velkennedy, R. (2010). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements. India.