

## ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMERO RECICLADO DO TIPO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

Victor Celestino Schwandt (IC) e Patrícia Barboza da Silva (Orientador)

**Apoio: PIBIC Mackenzie**

### RESUMO

No Brasil, a maior parte do transporte de bens e cargas é feita através de rodovias e, ainda, mais da metade das rodovias do país estão em más condições, o que gera maiores gastos e diminui a segurança, comodidade e efetividade do transporte. Com o objetivo de mitigar tais efeitos, as modificações de asfaltos com polímeros, por exemplo, vêm se tornando crescente. Nesta pesquisa, utilizou-se o polietileno de alta densidade (PEAD) proveniente da reciclagem de marcadores de quadro branco. Tal polímero é um dos mais encontrados nos resíduos sólidos urbanos devido ao seu uso em embalagens de curta vida útil. Esta pesquisa possui como principal objetivo caracterizar ligantes asfálticos modificados com PEAD reciclado. Para isso, foram elaboradas amostras de CAP 50/70 e CAP 30/45 com adição de PEAD reciclado em diferentes teores (4,5% e 6,5%) e durante dois tempos de mistura diferentes (60 min e 90 min), em temperatura média de mistura calculada a partir da viscosidade de 160°C para o CAP 30/45 e 150°C para o CAP 50/70. Posteriormente, as amostras foram submetidas aos ensaios de Penetração, Viscosidade Brookfield e Ponto de Amolecimento para a coleta de dados e para a comparação dos resultados. O aumento do teor de PEAD se revelou satisfatório quanto a melhora do comportamento das amostras e o maior tempo de mistura aparentou não ser benéfico.

**Palavras-chave:** Asfalto Modificado. PEAD Reciclado. Asfalto Modificado com Polímero.

### ABSTRACT

In Brazil, most of the transportation of goods and cargo is carried out by highways, and more than half of the country's highways are in poor condition, which generates higher expenses and is necessary for the safety, convenience, and effectiveness of transportation. To mitigate such effects, modifying asphalts with polymers, for instance, is becoming more and more common. In this research, it was used high-density polyethylene (HDPE) from the recycling of whiteboard markers. This polymer is one of the most found in urban solid waste due to its use in short-life packaging. This research has as main objective to characterize modified asphalt binders with recycled HDPE asphalt. For this purpose, 50/70 CAP and 30/45 CAP were prepared with the addition of recycled HDPE at different levels (4.5% and 6.5%) and during two different mixing times (60 min and 90 min), in average mixing temperature coming from the viscosity of 160 °C for the 30/45 CAP and 150 °C for the 50/70 CAP. Subsequently, they were submitted to Penetration, Brookfield Viscosity, and Softening Point tests for data

collection and for comparison of results. The increase in the HDPE content showed good results in terms of sample behavior and the longer mixing time did not appear to be beneficial.

**Keywords:** Modified Asphalt. Recycled HDPE. Polymer Modified Asphalt.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo levantamentos da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), mais da metade das rodovias pavimentadas no Brasil apresentam-se em más condições de conservação, com buracos, ondulações e outras patologias, proporcionando um baixo conforto ao rolamento. O estudo, ainda, concluiu que a má qualidade do pavimento é oriunda de falta de investimento e utilização de metodologias ultrapassadas.

Sabe-se que o principal modo de transportes de bens no Brasil é o rodoviário (BERNUCCI *et al.*, 2008), sendo assim, a falta de conservação das rodovias causa maiores gastos com combustíveis e manutenção dos veículos, além de interferir na segurança dos usuários. Por esse motivo, os bens produzidos no país perdem competitividade comercial devida à ineficiência na conservação de sua principal matriz modal.

A maior parte dos defeitos encontrados nos pavimentos são os trincamentos por fadiga e as deformações permanentes nas trilhas de rodas, cujas principais causas são, respectivamente, a menor capacidade de recuperação elástica e a baixa resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas, sendo essas características dependentes da suscetibilidade térmica do ligante asfáltico empregado, além do tipo de granulometria utilizada na mistura asfáltica que irá possibilitar a formação de um esqueleto de agregados minerais (NEVES FILHO, 2004).

Visando a melhoria das propriedades dos ligantes asfálticos, para melhorar o desempenho das misturas asfálticas nas quais forem empregados, Bernucci *et al* (2008) afirmam que a utilização de adições para a modificação das propriedades dos asfaltos tem se apresentado crescentes graças às mudanças de volume de tráfego, alterações de peso por eixo, aplicações em rodovias ou pistas especiais e, ainda, por conta de adversidades climáticas. Além disso, os asfaltos que utilizam modificadores, especialmente polímeros de vários tipos, têm melhora significativa de desempenho.

Uma parte relevante dos serviços de pavimentação concerne à manutenção e reforço de rodovias e trazem consigo a preocupação com a segurança e o conforto ao rolamento, independente das ações climáticas. Tendo isso em vista, a maior utilização de asfaltos modificados em camadas de pavimentos seria benéfica para mitigar os gastos com manutenções recorrentes e o custo de interrupção de certas áreas de tráfego, uma vez que pode aumentar a vida de serviço do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Atualmente, a técnica de modificação de asfaltos se mostra amplamente presente em sua produção e tem sido utilizada com o intuito de melhorar certas características das misturas asfálticas convencionais (CASTAÑEDA *et al.*, 2018).

Diante de vários estudos, alguns polímeros apresentaram melhores resultados e aparentam ser a melhor opção para modificar o asfalto, sendo utilizados para diminuir deformações permanentes e a ocorrência de ruptura por fadiga térmica e devida às tensões aplicadas ao pavimento. Contudo, alguns desafios precisam ser superados como o aumento no custo, problemas de compatibilidade e trabalhabilidade a diferentes temperaturas (BECKER *et al.*, 2001).

Assim, para o processo de modificação dos asfaltos, polímeros são utilizados com o objetivo de aumentar as propriedades elásticas do asfalto, como o copolímero de estireno butadieno (SBS) e borracha de butadieno estireno (SBR), enquanto outros contribuem mais efetivamente para a melhora da rigidez, resistência mecânica e resistência às temperaturas extremas, como o polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) (QUINTANA *et al.*, 2007).

Com isso em vista, o presente estudo busca verificar se a utilização de polímeros reciclados do tipo polietileno de alta densidade (PEAD) na modificação de asfaltos pode ser tecnicamente viável para utilização em pavimentação.

A realização de estudos sobre outros tipos de polímeros para serem aplicados em modificações de ligantes asfálticos podem contribuir para a melhoria dos pavimentos, diminuindo os custos com manutenção e aumentando, então, a qualidade e eficiência do transporte no país. Além disso, a viabilidade do processo contribuiria positivamente para o meio ambiente, uma vez que daria destino à polímeros provenientes de reciclagem.

O polietileno de alta densidade é o polímero mais encontrado nos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, representando aproximadamente 20% da massa total dos RSU coletados no país, segundo Romão (2009). Tal polímero é amplamente utilizado em embalagens de shampoo, amaciante e químicos em geral (VASCONCELOS, 2020) e, deste modo, por compor produtos de curta vida útil, se torna um dos polímeros mais consumidos e, portanto, um dos mais descartados.

O Brasil possui um alto índice de reciclagem mecânica de polímeros, inferior apenas a outros cinco países europeus (Romão, 2009). Spinacé (2005), por sua vez, conclui que a aplicações de longa vida útil como pavimentação e construção civil são convenientes para reduzir o descarte dos polímeros reciclados, além de que a reciclagem destes é importante para minimizar o impacto causado pela disposição destes materiais em aterros.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 PAVIMENTOS

O pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semiespaço considerado teoricamente como infinito (infraestrutura ou terreno de fundação) a qual é designada de subleito, destinado técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (DNIT, 2006).

Os pavimentos podem ser classificados, basicamente, em três tipos: rígidos, semirrígidos e flexíveis. Bernucci *et al.* (2008) define os pavimentos rígidos, também chamados de pavimentos de concreto de cimento Portland, como aqueles cujo revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland, sendo sua espessura determinada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes.

De acordo com DNIT (2006) o pavimento semirrígido caracteriza-se por uma base em material granular tratada com adição de aglomerante hidráulico e revestimento de uma camada asfáltica.

Já os pavimentos flexíveis, ou pavimentos asfálticos, são aqueles que possuem o revestimento composto por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. Esses podem ser constituídos por quatro camadas, sendo elas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Nos pavimentos flexíveis, segundo DNIT (2009) base é a camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente. A sub-base é a camada de pavimentação, complementar à base e com as mesmas funções desta. O subleito é maciço teoricamente infinito que serve de fundação para um pavimento enquanto o reforço do subleito é uma camada constituída de materiais granulares grosseiros, compactada, para oferecer mais suporte ao subleito.

O revestimento asfáltico é a camada de rolamento, composta pela associação de agregados e materiais asfálticos, sobre a qual circulam os veículos. Portanto, essa é a camada responsável por resistir às ações do tráfego e transmitir os esforços de forma atenuada para as demais camadas, sem sofrer grandes deformações. Além disso, deve resistir às ações do clima e oferecer o conforto para rolamento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As misturas asfálticas empregadas em camadas de revestimento podem ser produzidas tanto em uma usina específica (mistura usinada) – fixa ou móvel, como, também,

podem ser preparadas na própria pista utilizando tratamentos superficiais que consistem em aplicação de ligantes asfálticos e agregados sem mistura prévia (aplicação por penetração), com posterior compactação que promove o recobrimento parcial e a adesão entre agregados e ligantes (BERNUCCI *et al.*, 2008).

## 2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS PARA PAVIMENTAÇÃO

Na maioria dos países do mundo a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico. Seu uso intensivo se dá por conta da forte ligação entre os agregados proporcionada por ele, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável, é impermeabilizante, durável e resistente ao intemperismo de ácidos e sais, além de poder ser aquecido ou emulsionado e ter ou não a utilização de aditivos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter outros materiais como oxigênio, nitrogênio e enxofre (BERNUCCI *et al.*, 2008). Junto com o asfalto, outros materiais são utilizados, muitas vezes como agregados, para a realização da pavimentação. Esses materiais podem ser naturais, isto é, são produzidos por intemperismos ou por processos de britagem, como pedregulhos, seixos, areia e brita, ou podem ser artificiais, sendo produtos de alteração física e química ou de processos industriais como escória de alto forno, argila expandida e argila calcinada (DNIT *et al.*, 2006).

### 2.2.1 Asfalto de baixa penetração

Utilizado em revestimento asfáltico de localidades com maior incidência de cargas elevadas e maior volume de tráfego devido a sua menor suscetibilidade térmica e sua consistência elevada. Os ligantes asfálticos de baixa penetração (alta dureza) contribuem para obter estruturas de pavimento de elevada rigidez para áreas com alto fluxo de tráfego pesado (CERATTI *et al.*, 2015).

### 2.2.2 CAP TLA

O CAP TLA (Trinidad Lake Asphalt) é um asfalto natural encontrado em um lago que se localiza em Trinidad (República de Trinidad e Tobago) que contém cinza e areia em sua composição. Esse asfalto é peletizado e comercializado com o fim de ser adicionado aos asfaltos convencionais e alterar suas propriedades reológicas. Sua utilização é recomendada

em locais de médio e alto tráfego e apresenta características como: menor sensibilidade às variações térmicas, boa resistência à solvente (diesel) e elevada resistência à deformação permanente quando utilizado em revestimentos até a temperatura de 70°C (CERATTI *et al.*, 2015).

### **2.2.3 Asfalto modificado por polímero**

Ceratti *et al.* (2015) define asfalto modificado por polímero como um material composto por CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e polímeros, sendo o teor, geralmente, de 3 a 8% (massa/massa). Essa modificação tem sido a alternativa utilizada para amenizar algumas falhas comuns dos pavimentos, como trincamento por fadiga ou por efeito de baixas temperaturas ambientes e deformações permanentes, sendo os principais agentes modificadores os copolímeros de estireno – butadieno – estireno (SBS), estireno – (etilenocobutileno) – estireno (SEBS), etilenoacetato (EVA) e etilenoglicidilacrilato (Elvaloy®).

Em geral, os benefícios esperados pelo uso de polímeros na modificação do asfalto são: obter uma mistura com maior trabalhabilidade à baixas temperaturas, alcançar misturas mais rígidas em altas temperaturas evitando deformações permanentes, aumentar a estabilidade das misturas, aumentar a resistência ao desgaste, fadiga, oxidação e envelhecimento e reduzir os custos do ciclo de vida. Uma pequena adição de um polímero pode acarretar mudanças significativas nas propriedades reológicas do asfalto (BECKER *et al.*, 2001).

Quando os polímeros são adicionados ao asfalto, as propriedades do asfalto modificado serão dependentes das características dos polímeros, das características do asfalto, das condições de mistura, da compatibilidade do polímero com o asfalto, da proporção, etc. (BECKER *et al.*, 2001).

## **2.3 TIPOS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS**

### **2.3.1 Mistura usinada a quente**

Essas misturas podem ser subdivididas, conforme sua granulometria, em graduação densa, graduação aberta e graduação descontínua. A graduação densa tem a curva granulométrica contínua de modo a ter um esqueleto mineral com poucos vazios, enquanto a graduação aberta tem curva granulométrica com poucos agregados da fração fina, permitindo vazios entre as partículas tornando o material drenante. Já a graduação descontínua possui quantidade elevada de grãos de dimensões maiores o que torna o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Neste tipo de revestimento, a mistura dos agregados e ligantes ocorrem em uma usina estacionária. Trata-se do produto da mistura convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante. No Brasil, o tipo mais empregado é concreto asfáltico (CA) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

### **2.3.2 Mistura a frio**

Esse tipo de revestimento consiste em misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturados com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) à temperatura ambiente. Pode ser utilizado para revestir vias urbanas e rodovias de baixo volume de tráfego. No tocante a graduação, essa pode ser densa ou aberta. Os aspectos funcionais variam de acordo com o tipo de graduação escolhida, isto é, de acordo com o volume de vazios que, caso seja maior que 12%, a mistura será permeável e servirá como camada drenante. Ao contrário, poderá ser usado como revestimento, sendo impermeável (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As vantagens da técnica de misturas a frio estão ligadas principalmente ao uso de equipamentos mais simples, trabalhabilidade à temperatura ambiente, boa adesividade com quase todos os tipos de agregados britados, possibilidade de estocagem e flexibilidade elevada (BERNUCCI *et al.*, 2008).

### **2.3.3 Mistura reciclada**

Entende-se por reciclagem de pavimentos o processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, com acréscimo de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, CAP (cimento asfáltico de petróleo) ou EAP (emulsão asfáltica) novos, quando necessários (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Após a fresagem, os agregados de uma mistura envelhecida mantêm as suas características físicas e de resistência, porém o ligante asfáltico torna-se mais viscoso. É possível reaproveitar totalmente o material triturado ou cortado e recuperar as características do ligante com a adição de agentes de reciclagem ou rejuvenescedores. A reciclagem pode ser feita tanto a quente (utilizando CAP) quanto a frio (utilizando EAP) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

## 2.4 TIPOS DE POLÍMERO

Young (2011) define polímeros como substâncias compostas por moléculas que possuem grandes sequências de uma ou mais espécie de grupos de átomos ligados entre eles, normalmente, por ligação covalente. Esses são divididos em três grupos, os termoplásticos, termorrígidos e elastômeros.

Os termoplásticos se tornam líquidos com a aplicação de calor e são facilmente moldáveis (YOUNG *et al.*, 2011). A influência de termoplásticos no asfalto é evidenciada pelo aumento na rigidez, menor formação de afundamentos em trilhas de rodas em altas temperaturas, melhora o rendimento em baixas temperaturas e diminui a incidência de trincamentos devido à mudança de temperatura, sendo o polietileno (PE) um dos polímeros mais utilizados (CASTAÑEDA *et al.*, 2018). São exemplos: polietileno, polipropileno e PVC.

Os elastômeros podem ter suas dimensões substancialmente alteradas quando são aplicadas tensões e retornam às suas dimensões originais quando se deixa de aplicar a tensão (QUINTANA *et al.*, 2007). Esses polímeros, quando adicionados ao asfalto, evitam trincamentos em baixas temperaturas, melhora o desempenho em altas e baixas temperaturas, aumenta a consistência e a viscosidade, aumentando assim a durabilidade (CASTAÑEDA *et al.*, 2018). Por exemplo: SBR, SBS e GCR.

Os termorrígidos enrijecem em baixas temperaturas e não permitem um novo modelamento, e em temperaturas elevadas se decompõem ou degradam (QUINTANA *et al.*, 2007). Esses polímeros não se fundem e resistem a qualquer mobilidade térmica (BERNUCCI *et al.*, 2008). São exemplos de polímeros termorrígidos: resina epóxi, poliéster e poliuretano.

## 2.5 POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

O polietileno possui diversas vantagens, como a facilidade no seu processamento, o fato de não ser higroscópico, seu preço reduzido e ser o único não tóxico dentre os termoplásticos. Esse polímero possui 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 (CANDIAN *et al.*, 2007).

As propriedades mais relevantes do PEAD são: elevadas resistências química, mecânica e ao trincamento por fadiga, além de rigidez elevada, elevada resistência a abrasão, (CANDIAN *et al.*, 2007), possui alta recuperação elástica e flexibilidade (QUINTANA *et al.*, 2007), o que lhe possibilita maior vida útil.

Os compósitos termoplásticos possuem várias características atrativas como o potencial de produção a baixo custo, fácil controle de qualidade e a possibilidade de reciclagem de matéria prima (MULINARI, 2009).

Em testes de modificação de asfalto, o polietileno (PE) apresentou como vantagem: alta resistência a temperatura, resistência ao envelhecimento, custo baixo (BECKER *et al.*, 2001). Sendo o polietileno de alta densidade (PEAD) utilizado quando a aplicação exige rigidez elevada e resistência à altas temperaturas de serviço (CASTAÑEDA *et al.*, 2018).

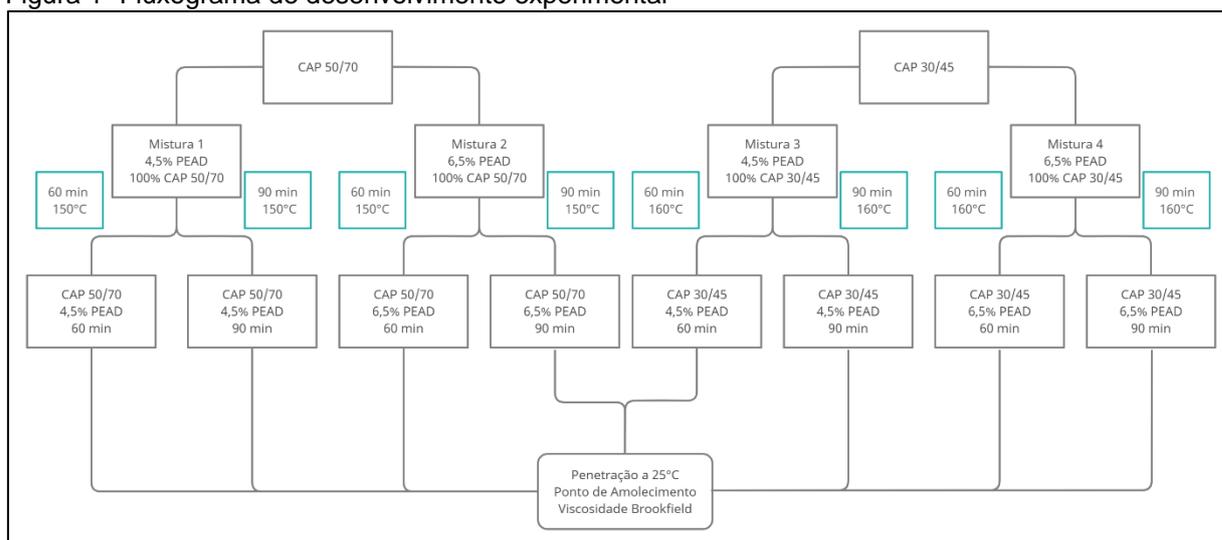
### 3. METODOLOGIA

Este estudo foi realizado no âmbito teórico e experimental. A seção teórica foi desenvolvida a partir de revisão bibliográfica a respeito de temas relevantes ao desenvolvimento da pesquisa como conceitos e materiais de pavimentação, misturas asfálticas, polímeros e asfalto modificado.

Na pesquisa experimental, foram realizados procedimentos para a mistura do polímero reciclado PEAD em dois tipos de asfaltos, CAP 30/45 e CAP 50/70, utilizando dois teores para adição, 4,5% e 6,5%, variando também o tempo de mistura em 60 e 90 minutos.

Sobre os asfaltos já modificados, foram realizados ensaios de penetração a 25°C, ponto de amolecimento e viscosidade Brookfield de modo a verificar de que maneira o teor de PEAD, bem como o tempo de mistura para a modificação interferem no comportamento do asfalto. A Figura 1 apresenta o fluxograma do experimento.

Figura 1- Fluxograma de desenvolvimento experimental



Fonte: Autor (2021).

### 3.1 MATERIAIS

Para a realização da pesquisa foram utilizados ligantes asfálticos do tipo CAP 50/70 e CAP 30/45, gentilmente cedidos pela empresa Stratura Asfaltos.

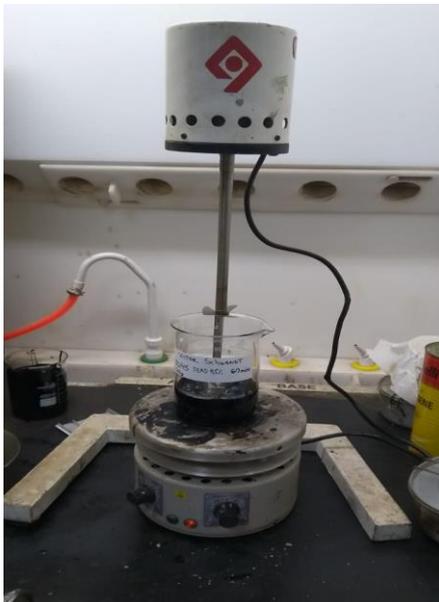
O polímero polietileno de alta densidade (PEAD) teve sua reciclagem realizada no laboratório da Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da UPM, pela reciclagem de canetas para lousa branca que seriam descartadas.

### 3.2 MODIFICAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Para a modificação dos ligantes asfálticos foram utilizados dois teores de PEAD (4,5% e 6,5%), para cada um dos ligantes estudados, sendo efetuada a mistura em dois tempos diferentes, 60 e 90 minutos.

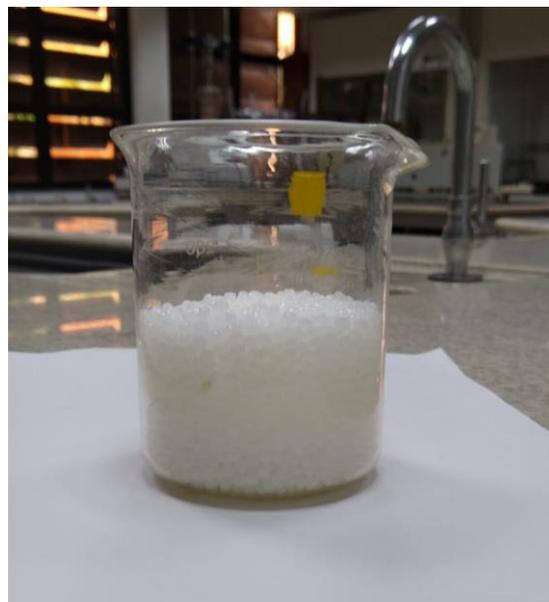
A modificação foi realizada utilizando misturador mecânico e manta aquecedora de modo a manter o ligante asfáltico em sua temperatura de mistura obtida pela curva de viscosidade dos ligantes estudados, sendo estas temperaturas de 150°C e 160°C respectivamente para o CAP 50/70 e o CAP 30/45.

Figura 2 – Misturador mecânico e manta aquecedora



Fonte: Autor (2021).

Figura 3 – PEAD reciclado em grãos



Fonte: Autor (2021).

### 3.3 ENSAIOS REALIZADOS SOBRE OS LIGANTES MODIFICADOS

Após a modificação dos ligantes foram realizados, em cada um dos materiais obtidos, considerando os diferentes teores de PEAD e os tempos de misturas para os dois ligantes empregados no estudo, os seguintes ensaios:

- a) Penetração a 25°C, conforme NBR 6576 (ABNT, 2007);
- b) Ponto de amolecimento, conforme NBR 6560 (ABNT, 2016);
- c) Viscosidade Brookfield nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, conforme NBR 15184 (ABNT, 2004).

## 4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Neste item, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados sobre as amostras de asfalto modificado com PEAD, bem como as discussões acerca destes resultados.

### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NAS AMOSTRAS DE CAP 50/70 MODIFICADOS COM PEAD

A Tabela 1 apresenta os resultados de todos os ensaios realizados com os materiais obtidos pela adição de PEAD no CAP 50/70 empregado na pesquisa.

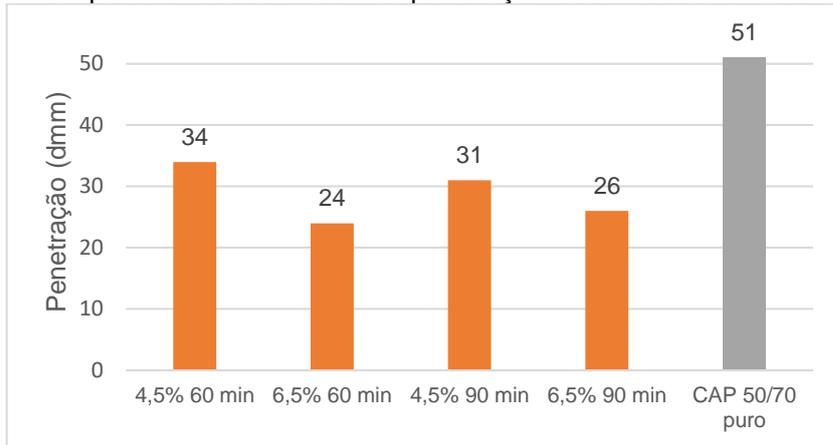
Tabela 1 - Resultados dos ensaios na amostra de CAP 50/70 e nos materiais obtidos com a adição de PEAD no CAP 50/70

Ensaio	CAP 50/70	4,5% PEAD 60 min	4,5% PEAD 90 min	6,5% PEAD 60 min	6,5% PEAD 90 min
Penetração, dmm	51	34	31	24	26
Ponto de amolecimento, °C	50	56	55	65	59
Visc. Brookfield (135°C, 20 rpm), cP	332,5 (sp21)	922 (sp21)	975 (sp21)	1988 (sp27)	1163 (sp27)
Visc. Brookfield (150°C, 50 rpm), cP	154 (sp21)	451 (sp21)	464 (sp21)	895 (sp27)	550 (sp27)
Visc. Brookfield (177°C, 100 rpm), cP	58,5 (sp21)	153 (sp21)	128 (sp21)	238 (sp27)	170 (sp27)

Fonte: Autor (2021).

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios de Penetração a 25°C realizados nas amostras de CAP 50/70 modificados com PEAD nos teores de 4,5% e 6,5%, em tempos de mistura de 60 e 90 minutos.

Figura 4 – Gráfico comparativo dos resultados de penetração das amostras de CAP 50/70



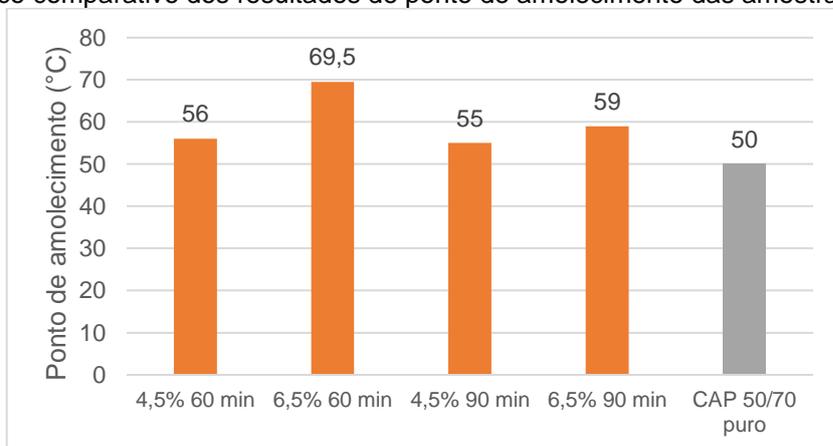
Fonte: Autor (2021).

Considerando os resultados apresentados na Figura 4, é possível observar que as amostras com teores de 4,5% e 6,5% de PEAD apresentaram um resultado de penetração menor quando comparado ao CAP puro. Além disso, a amostra com 6,5% de PEAD foi a que apresentou menor resultado de penetração, cerca de 53% abaixo do CAP 50/70 puro e 29,5% abaixo da amostra que empregou 4,5% de PEAD, indicando que a adição do PEAD aumentou a consistência do CAP 50/70 empregado na pesquisa.

Em relação ao tempo de mistura para a incorporação do PEAD no CAP 50/70, verificou-se, a partir dos resultados, que o aumento do tempo de mistura de 60 minutos para 90 minutos não causou variação significativa na consistência do material, sendo uma diminuição na penetração de 9% para o teor de 4,5% de PEAD e aumento de 8% para o teor de 6,5%.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de Ponto de amolecimento realizados nas amostras de CAP 50/70 modificados com PEAD nos teores de 4,5% e 6,5%, em tempos de mistura de 60 e 90 minutos.

Figura 5 - Gráfico comparativo dos resultados de ponto de amolecimento das amostras de CAP 50/70



Fonte: Autor (2021).

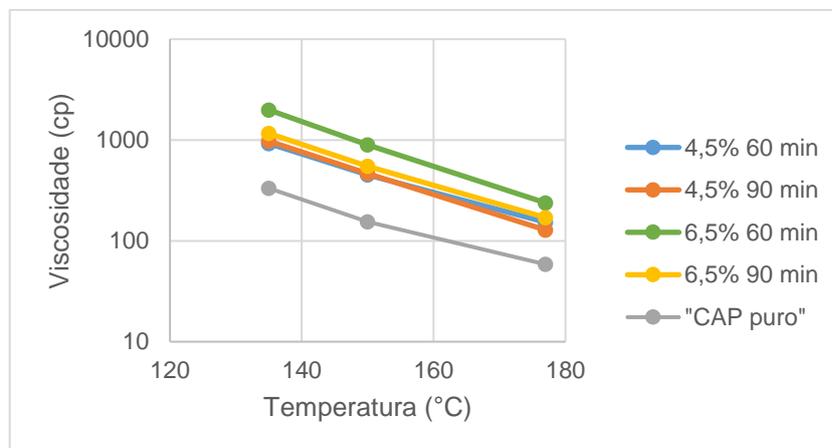
A partir dos resultados apresentados na Figura 5, observa-se que os materiais obtidos pela adição de PEAD apresentam aumento no ponto de amolecimento quando comparados ao CAP 50/70 sem adição.

Além disso, o aumento do teor de PEAD de 4,5% para 6,5% gera um acréscimo de até 24% na temperatura necessária para atingir o ponto de amolecimento, indicando que a adição do PEAD no CAP 50/70 utilizado na pesquisa diminuiu a suscetibilidade do material à elevação de temperatura.

Também é possível observar que o aumento do tempo de mistura promoveu a diminuição do ponto de amolecimento em ambos os teores de PEAD adicionados, sendo a diminuição mais significativa, de cerca de 15%, para o CAP 50/70 com adição de 6,5% de PEAD. Dessa forma, pode-se dizer que, para o CAP 50/70 empregado, o aumento no tempo de mistura prejudicou a suscetibilidade térmica.

Na Figura 6 são apresentadas as curvas de Viscosidade Brookfield versus temperatura para as amostras de CAP 50/70 modificados com PEAD nos teores de 4,5% e 6,5%, em tempos de mistura de 60 e 90 minutos.

Figura 6 - Gráfico comparativo dos resultados de viscosidade das amostras de CAP 50/70



Fonte: Autor (2021).

Observando os resultados apresentados na Figura 6, verifica-se que o CAP 50/70 modificado com 6,5% de PEAD e tempo de mistura de 60 minutos foi a mistura que apresentou a viscosidade Brookfield mais elevada em relação as outras misturas avaliadas neste ensaio. Para as outras 3 amostras obtidas não houve variação significativa no resultado deste ensaio quando comparadas entre si.

Quanto ao CAP 50/70 sem adição, foi possível verificar que a adição de PEAD em ambos os teores estudados aumentou a viscosidade Brookfield, o que pode indicar um

comportamento do ligante asfáltico que irá diminuir a ocorrência de deformações permanentes quando empregado em misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos.

#### 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NAS AMOSTRAS DE CAP 30/45 MODIFICADOS COM PEAD

A Tabela 2 apresenta os resultados de todos os ensaios realizados com os materiais obtidos pela adição de PEAD no CAP 30/45 empregado na pesquisa.

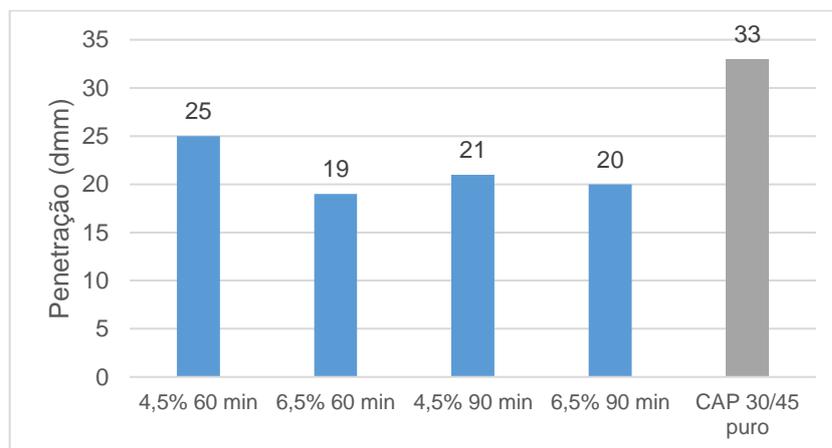
Tabela 2 - Resultados dos ensaios na amostra de CAP 30/45 e nos materiais obtidos com a adição de PEAD no CAP 30/45

Ensaio	CAP 30/45	4,5% PEAD 60 min	4,5% PEAD 90 min	6,5% PEAD 60 min	6,5% PEAD 90 min
Penetração, dmm	33	25	21	19	20
Ponto de amolecimento, °C	54,6	58	64	62	61
Visc. Brookfield (135°C, 20 rpm), cP	472 (sp21)	1500 (sp21)	1310 (sp21)	2550 (sp27)	2388 (sp27)
Visc. Brookfield (150°C, 50 rpm), cP	228 (sp21)	674 (sp21)	629 (sp21)	1155 (sp27)	1105 (sp27)
Visc. Brookfield (177°C, 100 rpm), cP	82 (sp21)	217 (sp21)	229 (sp21)	320 (sp27)	348 (sp27)

Fonte: Autor (2021).

A Figura 7 apresenta os resultados dos ensaios de Penetração a 25°C realizados nas amostras de CAP 30/45 modificadas com PEAD nos teores de 4,5% e 6,5%, em tempos de mistura de 60 e 90 minutos.

Figura 7 - Gráfico comparativo dos resultados de penetração das amostras de CAP 30/45



Fonte: Autor (2021).

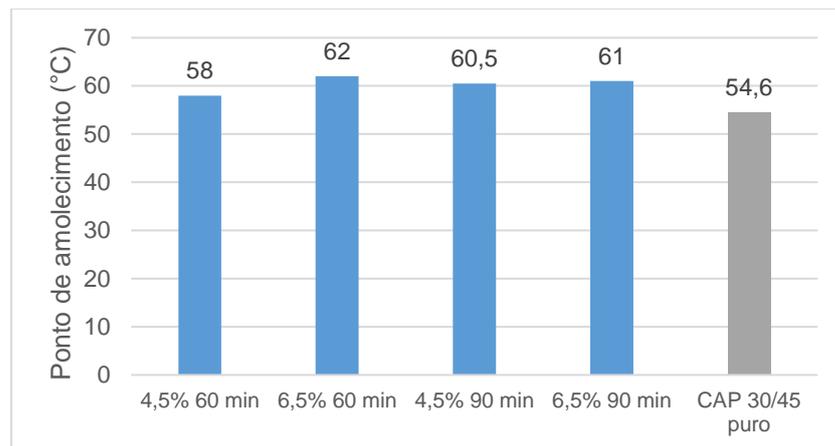
Assim como os resultados apresentados pelas amostras de CAP 50/70 modificadas por PEAD, também para as amostras de CAP 30/45 com adição de PEAD, os resultados dos

ensaios de penetração diminuíram em comparação com o obtido no CAP 30/45 puro. Também, nesse caso, a amostra com 6,5% de PEAD foi a que apresentou menor resultado de penetração, cerca de 42,5% abaixo do CAP 30/45 puro e 24% abaixo da amostra que empregou 4,5% de PEAD, indicando que a adição do PEAD aumentou a consistência do CAP 30/45 empregado na pesquisa.

Comportamento semelhante ao do CAP 50/70 pôde ser observado para as amostras de CAP 30/45 no tocante ao tempo de mistura para a incorporação do PEAD, ou seja, não ocorreu variação significativa da consistência quando se leva em consideração a variação neste parâmetro.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de Ponto de amolecimento realizados nas amostras de CAP 30/45 modificados com PEAD nos teores de 4,5% e 6,5%, em tempos de mistura de 60 e 90 minutos.

Figura 8 - Gráfico comparativo dos resultados de ponto de amolecimento das amostras de CAP 30/45



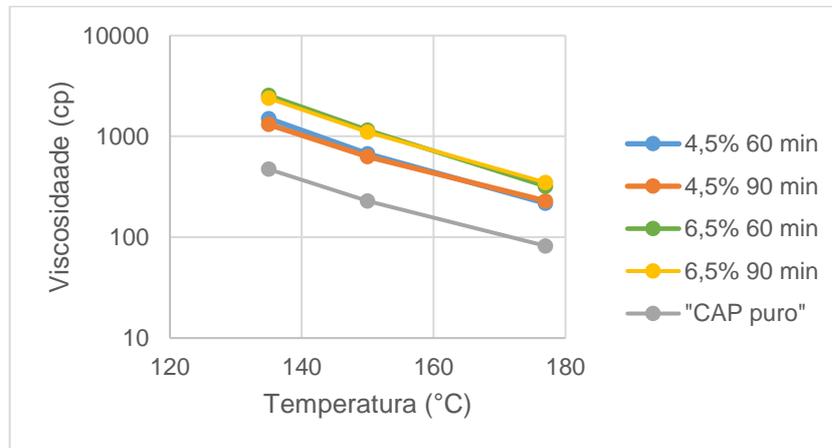
Fonte: Autor (2021).

Em relação ao ponto de amolecimento, como é possível observar na Figura 8, verifica-se que houve um aumento no ponto de amolecimento na amostra com teor de 4,5% e 90 minutos quando comparada à amostra de 60 minutos. Contudo, na mistura de teor de 6,5% de PEAD, o comportamento observado para o CAP 50/70 se repetiu, o aumento no tempo de mistura diminuiu o ponto de amolecimento, indicando ter sido prejudicial à suscetibilidade térmica da amostra.

Já no caso do teor de PEAD as misturas com CAP 30/45 apresentaram diminuição da suscetibilidade térmica do material com aumento no ponto de amolecimento, principalmente quando se comparam as amostras com tempo de mistura de 60 minutos, tendo um aumento de 7% com a adição de 6,5% de PEAD em relação à amostra que empregou 4,5% de PEAD, sendo ainda maior, cerca de 13,5%, quando comparada ao CAP 30/45 puro.

Na Figura 9 são apresentadas as curvas de Viscosidade Brookfield versus temperatura para as amostras de CAP 30/45 modificadas com PEAD nos teores de 4,5% e 6,5%, em tempos de mistura de 60 e 90 minutos.

Figura 9 - Gráfico comparativo dos resultados de viscosidade das amostras de CAP 30/45



Fonte: Autor (2021).

Como é possível constatar na Figura 9, o tempo de mistura não influenciou nos resultados de viscosidade Brookfield das amostras estudadas. Quanto à adição de PEAD ao CAP 30/45 utilizado, verificou-se que quanto maior o teor, maior a viscosidade Brookfield obtida na amostra.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu verificar que as adições de 4,5% e 6,5% de PEAD, tanto no CAP 50/70 quanto no CAP 30/45 estudados, apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios realizados, principalmente quando comparadas aos cimentos asfálticos sem adição de PEAD. Em todos os casos foi observada diminuição da suscetibilidade térmica e aumento de consistência, indicando que o uso deste tipo de material em misturas asfálticas pode diminuir a ocorrência de deformações permanentes, sendo então tecnicamente viável a sua aplicação em camadas de pavimentos.

Nos ensaios de penetração a 25°C e ponto de amolecimento, o aumento do teor de polímero PEAD se apresentou benéfico, aumentando a consistência e diminuindo a suscetibilidade térmica, em ambos os cimentos asfálticos estudados.

Em relação a viscosidade Brookfield, o acréscimo de polímero, em todos os casos, causou o aumento da viscosidade da amostra, sendo mais significativo quanto maior a quantidade de polímero PEAD.

Em relação ao tempo de mistura, não foi possível observar alterações significativas no comportamento das amostras, em nenhum dos casos estudados. Para melhor avaliação da relevância do tempo de mistura no comportamento das amostras, deveriam ser realizados mais ensaios utilizando misturador capaz de manter a temperatura estável de toda a amostra durante o período considerado.

Desta forma, considerando os resultados obtidos no desenvolvimento da presente pesquisa, interpreta-se que a combinação mais adequada, tanto para o CAP 50/70 quanto para o CAP 30/45 aqui empregados, é a adição do teor de 6,5% de PEAD com 60 minutos de tempo de mistura para incorporação, uma vez que o aumento do teor de PEAD foi benéfico em todos os ensaios realizados e o aumento do tempo não apresentou variação significativa nos resultados.

Por fim, verificou-se que asfaltos modificados com polímero reciclado do tipo PEAD podem ser uma alternativa viável para obtenção revestimentos asfálticos mais resistentes, o que é uma demanda crescente com o aumento no volume de tráfego nas malhas rodoviárias e, ainda, pode ser utilizado para restaurar pavimentos danificados na malha existente. Além disso, por se tratar de polímero reciclado, a modificação traria benefícios quanto a reutilização de polímeros descartados, diminuindo os impactos do descarte e o custo.

## 6. REFERÊNCIAS

10 fatos revelados pela Pesquisa CNT de rodovias 2019 no Brasil. 2019. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/10-fatos-revelados-pela-pesquisa-cnt-de-rodovias-2019-no-brasil>. Acesso em 15 de mar. de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560: Ligantes asfálticos: Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola**. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

BECKER, Yvonne; MENDEZ, Maryro P.; RODRIGUEZ, Yajaira. **Polymer modified asphalt**. In: Vision tecnologica. Los Teques, 2001.

BERNUCCI, Liedi Légi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

CANDIAN, Livia Matheus. **Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais**. São Carlos, 2007.

CASTAÑEDA, Henry Yecid Bustos et al. **Fundamentos micro y macroscópicos de la modificación del asfalto convencional con polímeros: una revisión.** INVENTUM, v. 13, n. 24, p. 58-77. Bogotá, 2018.

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

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte Rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília, 2017.

DNIT. **Manual de pavimentação.** Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. **Pavimentação – Sub-base ou base de brita graduada simples - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2009.

MULINARI, Daniella Regina. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar.** Guaratinguetá, 2009.

NEVES FILHO, Cláudio Luiz Dubeux. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha.** São Paulo, 2004.

QUINTANA, Hugo Alexánder Rondón; RINCÓN, Edgar Rodríguez; ANSELMÍ, Luis Ángel Moreno. **Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PEAD) y poliestireno (PS).** Revista Ingenierías Universidad de Medellín, v. 6, n. 11, p. 91-104. Medellín, 2007.

ROMÃO, Wanderson; SPINACÉ, Márcia AS; PAOLI, Marco-A. De. **Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem.** Polímeros, v. 19, p. 121-132. Campinas, 2009.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; DE PAOLI, Marco Aurelio. **A tecnologia da reciclagem de polímeros.** Química nova, v. 28, n. 1, p. 65-72. Campinas, 2005.

VASCONCELOS, Leandra Libório Costa et al. **Mistura asfáltica com resíduos de PEAD.** Manaus, 2020.

YOUNG, Robert J.; LOVELL, Peter A. **Introduction to polymers.** CRC press. London, 2011.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Presbiteriana Mackenzie pela bolsa de Iniciação Científica e à empresa Stratura Asfaltos pelo fornecimento dos asfaltos para o estudo.

Contatos: eng.victorcs@gmail.com e patricia.silva1@mackenzie.br