

# COMPORTAMENTO DE MÁSTIQUES ASFÁLTICOS A PARTIR DA ADIÇÃO DE DIFERENTES FÍLERES

*Behavior of asphaltic mastics from adding different fillers*

Larissa Ramos de Amaral<sup>1</sup>; Lorayne Cristina da Silva Alves<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Acadêmica, Departamento de Engenharia Civil, e-mail: l-ramos-a@hotmail.com

<sup>2</sup>Professora Mestra, Departamento de Engenharia Civil, e-mail: lorayne.alves@ufu.br

## Resumo

A condição de um pavimento interfere no conforto e na segurança dos usuários. Tendo isso em vista, os engenheiros de transportes buscam novos conhecimentos para melhorar a estrutura do pavimento frente às intempéries e as cargas por ele recebidas, de modo a trazer maior durabilidade ao pavimento. Assim, materiais como o mástique asfáltico, que consiste em uma composição de cimento asfáltico de petróleo com adição de fíler, vem sendo comumente estudado, de modo a se observar o efeito do fíler nas propriedades do ligante. O mástique possui resistência à água, ele é um componente que age na ligação entre os agregados da mistura asfáltica e, conseqüentemente no teor de asfalto e desempenho da mistura. O fíler é utilizado como material de enchimento dos vazios da mistura, alterando características como trabalhabilidade e elasticidade. Para este trabalho foi utilizado, na formulação do mástique asfáltico, o CAP 30/45 e, como fíler, o pó de basalto e o metacaulim. A partir de ensaios físicos, comparou-se as características específicas do mástique com adição de diferentes porcentagens de pó de basalto e de metacaulim. Notou-se que a adição de fíler na mistura fez com que o CAP 30/45 tornasse mais rígido e consistente. Contudo, fez com que a mistura tivesse menor trabalhabilidade, se tornasse menos dúctil e, se utilizado o metacaulim, como material de fíler, tornasse a mistura mais susceptível a variação de temperatura.

*Palavra-Chave: Mástique asfáltico. Fíler. CAP 30/45. Pavimentação.*

## Abstract

The condition of a floor interferes with the comfort and safety of users. With this in mind, transport engineers are looking for new knowledge to improve the weather structure of the pavement and the loads it receives to bring more durability to the pavement. Thus, materials such as asphalt mastic, which consists of a petroleum asphalt cement composition with the addition of filler, have been commonly studied in order to observe the effect of the filler on the properties of the binder. The mastic has water resistance, it is a component that acts in the bond between the asphalt mix aggregates and, consequently in the asphalt content and mixing performance. The filler is used as filler for the voids of the mixture, changing characteristics such as workability and elasticity. For this work was used, in the formulation of asphalt mastic, the CAP 30/45 and, as filler, the basalt powder and metakaolin. From physical tests, the specific characteristics of the mastic were compared with the addition of different percentages of basalt powder and metakaolin. Addition of filler to the mixture was found to make CAP 30/45 more rigid and consistent. However, it made the mixture less workable, made less ductile and, if metakaolin used as filler material, made the mixture more susceptible to temperature variation.

*Keyword: Asphalt mastic. Filler. CAP 30/45. Paving.*

# 1 Introdução

Os engenheiros da área de transportes, cada vez mais preocupados com a segurança e conforto dos usuários, além da durabilidade e economia no que se refere a pavimentação, buscam gradativamente conhecimentos para melhorar o desempenho das estruturas perante as cargas recebidas pelo pavimento. Tais conhecimentos buscam fazer com que o concreto asfáltico seja mais durável e resistente, diminuindo a necessidade de manutenção durante o tempo definido em projeto.

Segundo Barra (2005), na concepção das estruturas dos pavimentos, formados pelos arranjos granulares das misturas asfálticas, deve-se observar as características de formação geológica e pedológica dos materiais, assim como o tipo de cimento asfáltico de petróleo (CAP) característico a cada ambiente, sendo este parâmetro determinante para a definição da melhor alternativa ao pavimento quando se refere a comportamento mecânico.

Parte dos defeitos que surgem no pavimento deve-se a fadiga, que se inicia na formação das trincas, cuja consequência maior é a formação de buracos no asfalto, as chamadas “panelas”. Ademais, outra preocupação dos engenheiros de transportes é a deformação permanente, pois essa, por exemplo, facilita a perda de aderência da roda à camada de rolamento em períodos chuvosos (hidroplanagem), trazendo perigo aos usuários. Para isso a utilização de misturas asfálticas que ajudam minimizar esses processos é de grande significância.

Um material que está sendo estudado atualmente para a restauração desses pavimentos consiste no mástique asfáltico, cuja composição é formada de ligante asfáltico e elementos minerais. O mástique é um componente que age na ligação dos agregados, na alteração do volume de vazios e assim, conseqüentemente na compactação e trabalhabilidade das misturas asfálticas.

Segundo o Ehow Brasil (2017), o mástique possui características muito interessantes que o torna um material adequado para estrada. Isso se deve a sua resistência ao fogo, a água, bem como a condensação da água em vapor.

Barra et al. (2014) afirmam que é importante o estudo da adição de fíleres na mistura asfáltica, de modo a observar como estes interferem nas características de ligantes asfálticos em formulações de mástique. Assim, o presente trabalho tem como fonte de estudo a análise do comportamento de mástiques asfálticos, a partir da adição de pó de basalto e metacaulim ao cimento asfáltico de petróleo (CAP) 30/45.

## 2 Objetivo

Analisar o comportamento de mástiques asfálticos, a partir da adição de metacaulim e pó de basalto na proporção fíler/ligante de 0,6 e 1,2 em massa ao CAP 30/45.

### **3 Revisão bibliográfica**

#### **3.1 Mástique asfáltico**

O mástique asfáltico é formado pela composição de ligante asfáltico e elementos minerais. É um componente que age na ligação dos agregados, além de preencher os vazios existentes na estrutura mineral de modo a garantir, compacidade e trabalhabilidade às misturas asfálticas.

O mástique possui características como resistência ao fogo e a água, o que o torna um material interessante para o uso em pavimentos.

Segundo Fernanda (2013) a formação do mástique depende da granulometria dos fileres utilizados, ou seja, em caso de partículas maiores ( $> 40 \mu\text{m}$ ), estas tendem a preencher os vazios dos outros agregados da mistura asfáltica, enquanto que as partículas menores ( $< 20 \mu\text{m}$ ) misturam-se com o ligante, formando o mástique, diminuindo a suscetibilidade térmica, aumentando a viscosidade do ligante e o seu ponto de amolecimento.

Segundo Bardini (2019) o mástique quando na dosagem, influencia a lubrificação das partículas de agregados maiores e afeta os vazios do agregado mineral, as características de compactação e o teor ótimo do ligante.

Ademais, sua rigidez influencia a resistência à fadiga a temperaturas médias, bem como a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica quando susceptível a altas temperaturas.

Além disso, as propriedades reológicas do mástique afetam as propriedades mecânicas da mistura asfáltica, o que faz com que o estudo desse seja interessante.

#### **3.2 Fíleres**

O fíler, de acordo com Ecivil (2019), é o material obtido por meio da moagem fina de basalto, materiais carbonáticos, entre outros, cuja associação é ótima para aumentar a trabalhabilidade, diminuir a permeabilidade de argamassas e concretos, sendo usados também em asfaltos.

A DNER – EM 367/97 (1997) traz, como definição de material de enchimento (fíler), todo material que é passante, em pelo menos 65%, na peneira nº 200, de 0,075 mm de abertura de malha quadrada.

O fíler, segundo Bardini et al. (2019) é utilizado como material de enchimento para cobrir os vazios entre agregados miúdos e graúdos, de modo a modificar a trabalhabilidade, a resistência a água e ao envelhecimento da mistura. Ademais, ele se manifesta nas propriedades de interface fíler/ligante asfáltico, agindo, portanto, como material ativo, devido as suas características superficiais.

Dois materiais que podem ser empregados usualmente como fíler é o pó de basalto e o metacaulim. O metacaulim, de acordo com Medina (2011), é um material pozolânico, constituído basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa. Já o pó de basalto é o material advindo da moagem e peneiramento da rocha basáltica, que, segundo

Freitas (2019), se trata de uma rocha ígnea, formada pelo esfriamento e solidificação do magma pastoso. É uma rocha rica em silicatos de magnésio e ferro.

### **3.3 Ensaio de caracterização do filer**

#### **3.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), segundo a Eventus (2019), é uma técnica que investiga a morfologia e as alterações de superfície, como corrosão, forma e tamanho das partículas, análise de superfícies fraturadas, entre outros, com ampliações da ordem de centenas de milhares de vezes.

Ademais, essa técnica permite a realização de microanálise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), cuja funcionalidade, de acordo com a Cetene (2019), está na identificação e mapeamento dos elementos químicos que estão presentes na composição do material, uma análise qualitativa. O equipamento EDS é um Espectrômetro de Raio-X, que pode identificar a composição química das partículas a partir de 5 microns de tamanho.

### **3.4 Ensaio físicos do asfalto e do mástique asfáltico**

#### **3.4.1 Ensaio de penetração**

O ensaio de penetração consiste na medição da profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada, de 100 g, penetra na amostra, durante o tempo definido de 5 segundos, susceptível a uma temperatura de 25° C. Tal amostra também com volume padronizado.

A penetração é utilizada no Brasil para a classificação dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP). Assim, segundo a CNT (2019), esses são denominados de acordo com os intervalos de penetração aferidas no ensaio. Por exemplo, para um CAP 30/45, a agulha padrão deve penetrar na amostra a uma profundidade de 30 a 45 décimos de milímetro.

O ensaio de penetração mede a consistência do material (a dureza), de forma que, quanto menor for a penetração da agulha, maior a consistência da amostra instrumentada, o que significa que maior será sua resistência ao cisalhamento e o seu módulo de elasticidade.

#### **3.4.2 Ensaio de Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola**

O ensaio de ponto de amolecimento também é um ensaio de consistência, contudo, ele é voltado para o comportamento do ligante à temperatura máxima de serviço, enquanto o de penetração, à temperatura ambiente.

Nesse experimento é medido a temperatura ao qual a amostra sofre o amolecimento, isto é, quando ela atinge determinado nível de escoamento, sob certas condições específicas.

A temperatura resultante nesse ensaio relaciona-se com à máxima temperatura de serviço que o asfalto pode chegar, ou seja, a temperatura ao qual o asfalto começa a apresentar-se fluido, não desempenhando de maneira satisfatória sua função de camada de rolamento.

### 3.4.3 Ensaio de ductilidade

O ensaio de ductilidade, como o próprio nome faz referência, mede o quanto o material é dúctil. Isso significa que quanto maior a ductilidade do material, maior sua flexibilidade. Ademais, significa que quanto mais dúctil, maior a deformação sofrida pela amostra antes do rompimento. Segundo Machado (2013), a ductilidade é a capacidade de suportar grandes deformações inelásticas sem que haja perda significativa de resistência. Assim, material dúctil é um material que, ao ser distendido, sustenta grandes deformações inelásticas sem se quebrar.

### 3.4.4 Ensaio de recuperação elástica

O ensaio de Recuperação Elástica mede o quanto a amostra recupera, ao ser distendida até um certo comprimento normalizado.

## 4 Materiais e métodos

Os materiais para produção do mástique foram o CAP 30/45 e os fíleres de pó de basalto e metacaulim. Os mástiques asfálticos foram produzidos com a inserção de pó de basalto e metacaulim no ligante asfáltico 30/45, na proporção fíler/ligante de 0,6 e 1,2 em massa. Suas propriedades foram avaliadas através dos ensaios de penetração, ductilidade, ponto de amolecimento, recuperação elástica e absorção de água.

Os ensaios foram realizados no laboratório de pavimentação da Universidade Federal de Uberlândia e, nas caracterizações, foi empregado o microscópio eletrônico de varredura, pertencentes ao laboratório de multiusuários II da Engenharia Química.

### 4.1 Fíleres

O metacaulim utilizado tem as mesmas características daquele empregado em Alves (2018). A Tabela 1 apresenta a composição química do metacaulim, realizado pelo laboratório de estruturas da Universidade Federal do Paraná, em que é possível notar que a composição básica deste material consiste em aproximadamente 90% de sílica e alumina.

Tabela 1 – Composição química do metacaulim

SiO <sub>2</sub>	51,57%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,5%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8%
Outros	5,13%

Fonte: Adaptado de Metacaulim do Brasil (2013)

Além as informações apresentadas, o material ainda foi caracterizado através de imagens de MEV e pela identificação dos elementos através EDS. Ainda, foi realizado o ensaio de massa específica para os fíleres.

No difratograma do metacaulim, segundo Alves (2018), há a percepção de um padrão cristalino sem saliência aparente, o que sugere que as fases amorfas não estão em grande proporção no material. O quartzo se mostra como a principal fase mineral e nota-se picos de caulinita, muscovita e hematita.

Os resultados encontrados pelo difratograma para a amostra de basalto, segundo Dutra (2019), indicaram que em sua composição há, principalmente, a presença de Anortita ( $CaAl_2Si_2O_8$ ), além disso, estão presentes o quartzo ( $SiO_2$ ) e a Albita ( $NaAlSi_3O_8$ ).

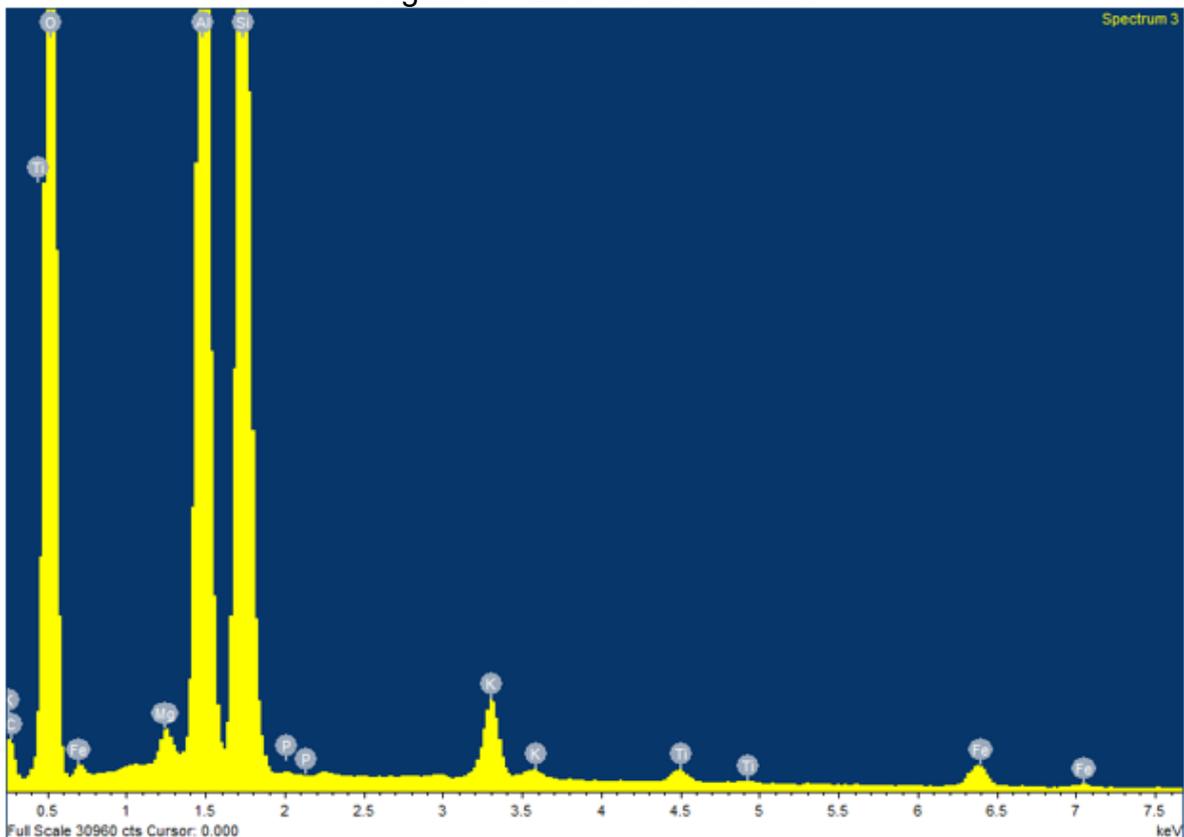
A Anortita e a Albita pertencem ao grupo de minerais feldspáticos, o plagioclásio, ao qual constitui uma série isomórfica completa, variando desde o termo mais sódico até o mais cálcico. Segundo Dutra (2019) ambos possuem dureza entre 6 a 6,5, contribuindo assim, para a resistência da rocha basáltica.

#### 4.1.1 MEV e EDS

Imagens de MEV foram utilizados para análise do formato e rugosidade das partículas dos fíleres. O EDS foi posteriormente utilizado para verificação dos elementos presentes nos fíleres.

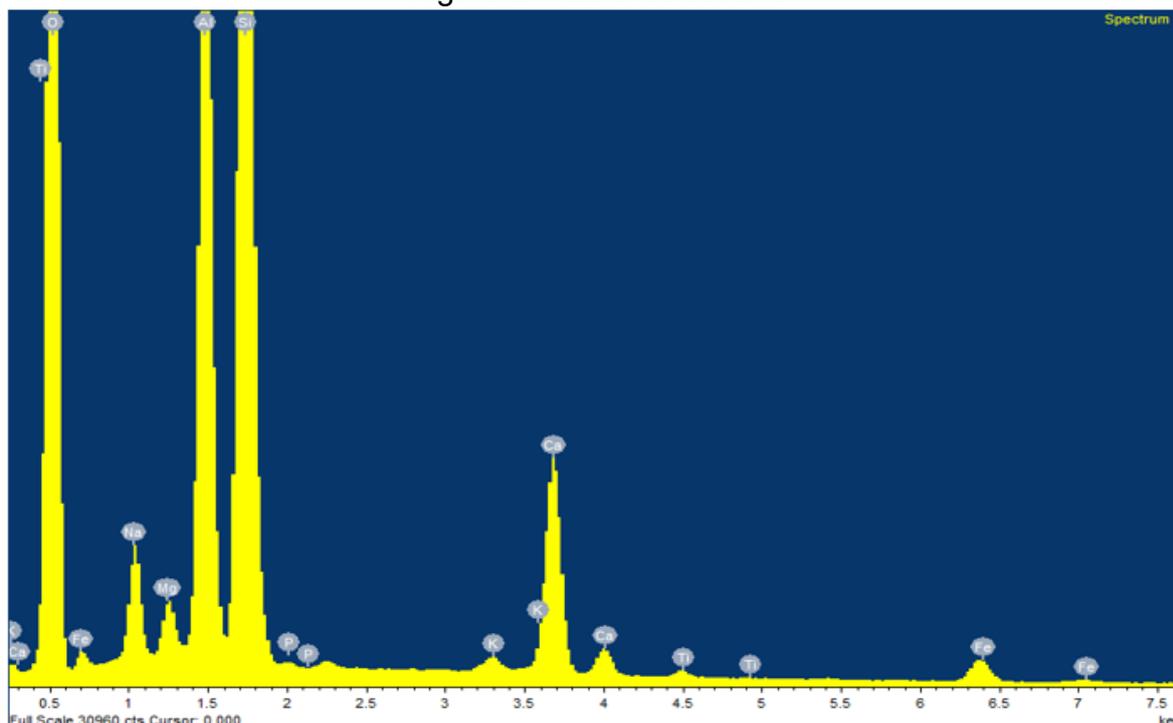
Na análise do EDS, tanto para o Metacaulim quanto para o basalto, notou-se que suas composições em sua maioria são formadas por oxigênio, Silício e Alumínio (Figuras 1 e 2).

Figura 1 – EDS do metacaulim



Fonte: Autor (2019)

Figura 2 – EDS do basalto



Fonte: Autor (2019)

#### 4.1.2 Massa específica

Os ensaios de massa específica dos fileres foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR 6508 (2014) e ASTM C-128-12 (2012).

Os resultados referentes ao ensaio de massa específica estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Massa específica dos fileres

Fíler	Resultado Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Metacaulim	2,592
Pó de basalto	2,989

Pôde-se observar que a massa específica real do basalto foi maior. Isso infere que a partir da mesma quantidade de massa utilizada, como foi o caso do experimento, o volume que o metacaulim ocupa na mistura é maior.

#### 4.2 Preparação dos mástiques asfálticos

A preparação dos mástiques asfálticos consistiu na mistura do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 30/45 com os fileres. Foram feitas 4 misturas, duas com o filer de pó de basalto e duas com o metacaulim.

Para fazer a mistura foi usado um misturador cujo a ponta foi inserida uma hélice (Figura 3). Além disso, foi utilizado um *dimmer* para controle da potência do aparelho, para fazer com que a furadeira girasse com uma velocidade constante e baixa, de modo a evitar a formação de bolhas de ar na mistura.

Figura 3- Aparelhagem utilizada na mistura



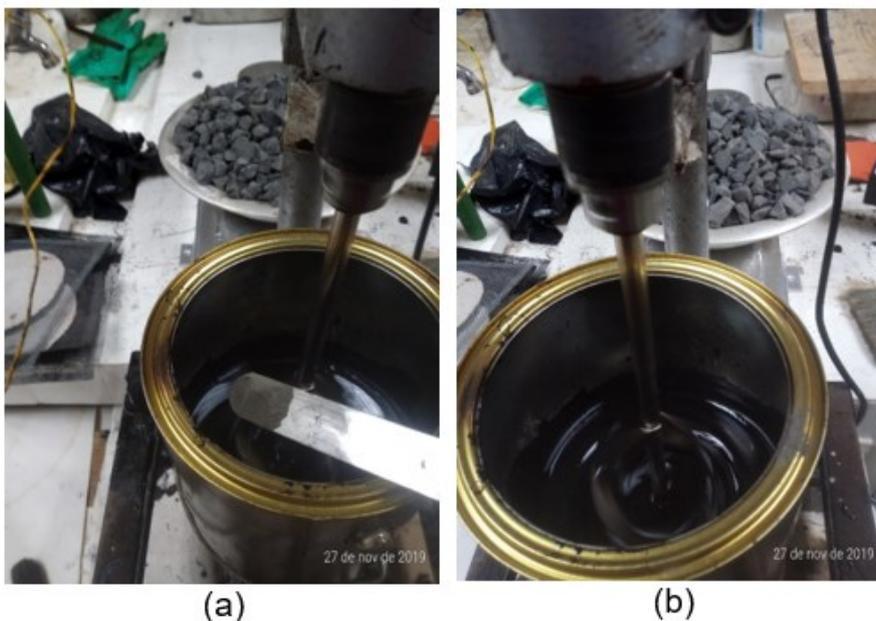
Fonte: Autor (2019)

O CAP foi deixado em estufa, a  $110^{\circ}\text{C}$ , até que se tornasse fluído. Posteriormente, ele foi aquecida até  $170^{\circ}\text{C}$ .

Após alcançada a temperatura, foi iniciada a mistura do CAP 30/45 e filer. A temperatura foi mantida entre  $155^{\circ}\text{C}$  a  $170^{\circ}\text{C}$  durante o processo de mistura.

O material foi misturado durante 1 hora, sendo o filer acrescentado aos poucos ao CAP durante 50 minutos, e os 10 minutos finais utilizados para completa homogeneização da mistura (Figura 4).

Figura 4- Preparação do mástique: (a) adição do filer ao CAP 30/45 e (b) mistura do ligante asfáltico com filer



Fonte: Autor (2019)

Os ensaios físicos no mástique asfáltico foram realizados após a mistura. As proporções fileres/asfalto foram de 0,6 e 1,2 em massa. As proporções foram feitas com relação a

massa dos componentes (por exemplo, se utilizasse 1 kg de ligante asfáltico era colocado 600 g de fíler).

### **4.3 Ensaio para determinação das propriedades físicas do ligante e dos mástiques asfálticos**

#### **4.3.1 Ensaio de Penetração**

Para a execução do ensaio foi utilizada a norma DNER-ME 003/99 (1999).

Inicialmente, o material (ligante puro ou mástique) foi colocado na estufa para aquecimento até que se tornasse fluído, de modo a se ter uma melhor trabalhabilidade. Após esse tempo, o material era despejado em uma cápsula, de modo a se ter uma altura de, no mínimo, 10 mm maior que a penetração esperada, como definido pela norma. Em seguida, para evitar o contato com o ambiente, devido a poeira e a entrada de bolhas de ar no material, a amostra era devidamente tampada.

A partir disso, a amostra ficava resfriando durante 90 minutos à temperatura ambiente e logo após, era colocada em uma bacia com água, de modo que a mesma ficasse submersa, estando a água na temperatura de ensaio, ou seja, 25° C ( $\pm 0,1^\circ$ ). A amostra era deixada durante o período também de 90 minutos.

Começava-se então a realização do ensaio com o penetrômetro.

O ensaio é realizado com a amostra totalmente submersa em um banho d'água. A amostra era colocada dentro de uma cuba de transferência, ao qual foi enchida pela água da bacia. Era feito então o posicionamento da agulha sobre a superfície de modo a somente encostar no material e então era liberada a agulha, durante 5 segundos, para penetração na amostra. A partir disso, podia-se aferir a profundidade ao qual a agulha penetrava na amostra. O ensaio foi realizado 3 vezes, na mesma amostra, porém em pontos diferentes, de modo que o resultado fosse a média aritmética entre as 3 aferições. A Figura 5 mostra o ensaio sendo realizado.

Figura 5 - Realização do ensaio de penetração



Fonte: Autor (2019)

Como a diferença entre o valor mais alto e o mais baixo de aferições foi menor que 2 décimos de milímetros, não foi necessária a repetição do procedimento.

Esse ensaio foi feito tanto para o CAP 30/45 puro, quanto para os 4 tipos de mástiques asfálticos (CAP 30/45+Fíler).

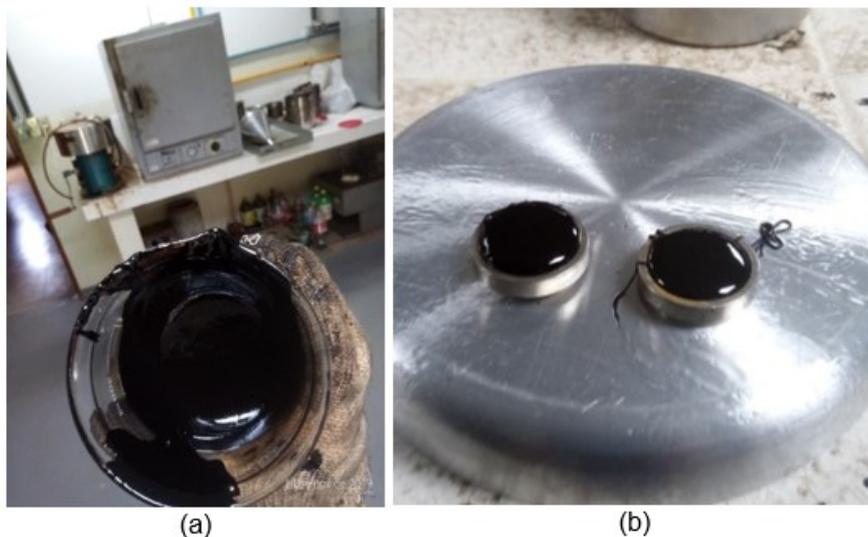
#### 4.3.2 Ensaio de Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola

Para a execução do ensaio foi utilizada a Norma DNIT – 131/2010 – ME (2010).

Primeiramente, os anéis metálicos e o material asfáltico para o ensaio foram colocados em estufa para aquecimento. Posteriormente, o ligante foi transferido para um béquer e aquecido até se tornar fluido o suficiente para obter uma melhor trabalhabilidade para preenchimento dos anéis.

Os anéis foram preenchidos de modo a se ter um pequeno excesso de material acima do topo dos anéis, segundo o descrito na norma (Figura 6). O material resfriou durante 30 minutos, a temperatura ambiente, e, logo em seguida, houve a retirada desse excesso de material, para deixar a amostra nivelada na altura das bordas dos anéis.

Figura 6 – Preparação da amostra para o ensaio de ponto de amolecimento: Material aquecido (a) e anéis preenchidos por material (b)



Fonte: Autor (2019)

A amostra ficou resfriando ao ar por mais 30 minutos e depois, foi colocada em um banho d'água por 15 minutos à temperatura de 25° C.

Enquanto a amostra resfriava, foram feitos testes para que o aquecimento da água do ensaio estivesse a uma razão de 5° C por minuto, valor este exigido por norma, por meio de um ebulidor e de um *dimmer* para ajuste de potência.

Após 15 minutos no banho d'água a amostra foi colocada em um suporte padronizado e, em seguida, ela foi colocada dentro de um béquer com água destilada até uma altura de 105 mm. Uma esfera de aço de diâmetro igual a 9,5 mm e peso de 3,5 g foi colocada sobre cada amostra do ligante asfáltico/mástique, no centro do anel.

A partir disso, com o ebulidor para o aquecimento da água dentro do béquer e o suporte com as amostras e o termômetro, iniciou-se o ensaio (Figura 7).

Figura 7 – Montagem da estrutura do ensaio



Fonte: Autor (2019)

A água foi sendo aquecida a uma razão de  $5^{\circ}\text{C}$  por minuto até o ponto na qual as amostras não suportam mais o peso das esferas e tocam a placa de referência do próprio suporte, como pode-se observar na Figura 8. A partir disso foi anotada a temperatura da água no momento do toque da mistura na placa de referência, valor correspondente ao ponto de amolecimento da amostra.

Figura 8 – Amostra ao tocar a placa de referência



Fonte: Autor (2019)

Como a diferença entre as temperaturas dos dois anéis foi menor que  $2^{\circ}\text{C}$ , e o procedimento foi realizado dentro do prazo de 240 minutos, contando do enchimento do anel até o final do ensaio, como prescreve a norma DNIT – 131/2010 – ME (2010), não foi preciso repetir o experimento.

Esse ensaio foi feito para o ligante puro e para os 4 tipos de mástiques asfálticos.

### 4.3.3 Ensaio de Ductilidade

O ensaio de ductilidade foi executado a partir da norma DNER-ME 163/98 (1998).

Inicialmente, se fez a preparação da amostra para ensaio. Tal preparação consistiu, de início, no aquecimento do material e, logo em seguida, do despejo desse material no molde do ensaio (processo denominado amalgamado).

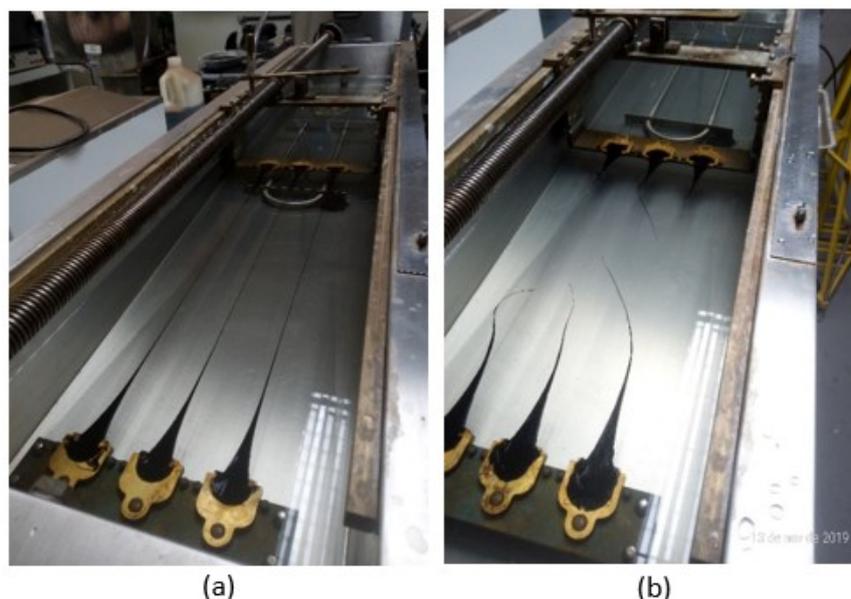
Como procedimento, a amostra foi deixada ao ar para resfriamento durante 35 minutos e posteriormente, foi colocada dentro da água por mais 35 minutos. Em seguida, fez-se a retirada do excesso de material, e a amostra novamente foi colocada em banho d'água por 90 minutos. Como descrito na norma DNER-ME 163/98 (1998), o ensaio foi realizado a temperatura da água a 25° C.

Além disso, enquanto acontecia o resfriamento do material, foram feitos testes para controlar a densidade da água e a velocidade do ductilômetro, para atender os requisitos da norma, ao qual exige que a distensão da amostra seja de 5 cm por minuto.

Após os 90 minutos de banho d'água, a amostra foi retirada do recipiente e colocada no ductilômetro e iniciou-se o ensaio.

A amostra foi então deixada sendo distendida até dar o mínimo valor descrito na ficha técnica para o CAP 30/45 utilizado no laboratório, que é de 60 cm (Figura 9).

Figura 9 – Amostra sendo alongada (a) e rompimento (b)



Fonte: Autor (2019)

Este experimento foi feito tanto para o CAP 30/45 em sua condição pura, quanto para os mástiques asfálticos.

### 4.3.4 Ensaio de Recuperação Elástica

O experimento teve como base de execução a Norma DNIT 130/2010 - ME (2010).

As etapas para a preparação da amostra são as mesmas do ensaio de ductilidade.

Durante a espera para resfriamento, foi controlada a densidade da água, muito importante para esse experimento, pois o material é cortado e deixado por 1 hora dentro do ductilômetro, de modo que ele não tenda ir para a superfície da água, nem para o fundo do aparelho.

O ensaio consistiu em alongar a amostra até 20 cm, como prescrito em norma, cortar o material ao meio com a ajuda de uma tesoura e deixá-lo em repouso por 1 hora, mantendo a temperatura constante (25° C).

Após, foi deslocado o aparelho em sentido contrário até que as pontas do material se tocassem, de forma a saber o quanto o material se recuperou.

Foi anotado o valor para cada amostra, sendo o resultado calculado por meio da Fórmula 1.

$$RE, \% = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100 \quad (1)$$

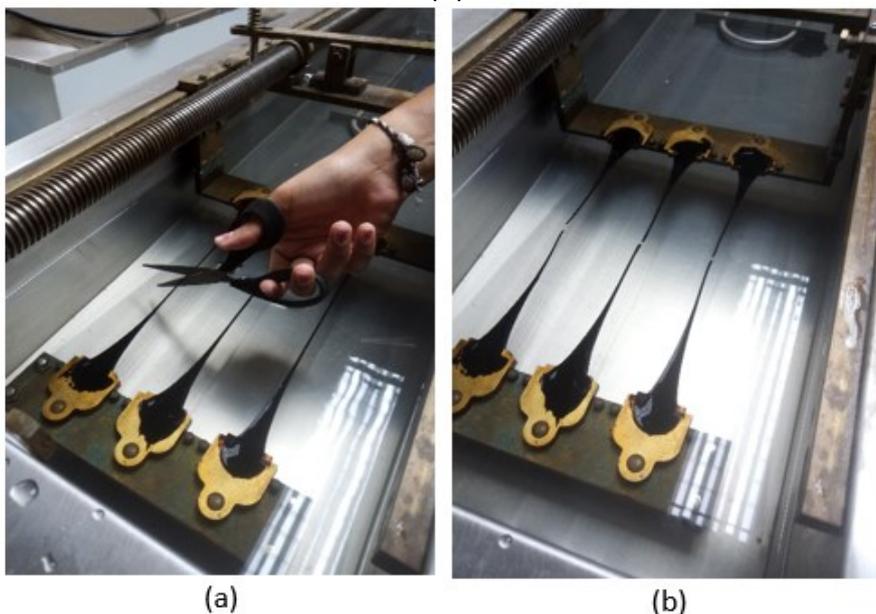
Sendo:

$L_1$  – Comprimento após a distensão da amostra (cm).

$L_2$  – Comprimento após a justaposição das Pontas (cm).

A partir do valor encontrado para cada amostra, se fez a média aritmética para obter o resultado final. A Figura 10 mostra a realização do ensaio.

Figura 10 – Ensaio de recuperação elástica: Corte do material (a) e amostra em repouso (b)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.5 Índice de Suscetibilidade Térmica (IP)

O índice de Suscetibilidade Térmica é calculado a partir do resultado de dois ensaios, o de penetração e o de ponto de amolecimento. Basicamente, ele consiste na medida da consistência do asfalto perante a variação de temperatura. Para o cálculo do IP é utilizada a Fórmula 2.

$$IP = \frac{500 \log P + 20 PA - 1951}{120 - 50 \log P + PA} \quad (2)$$

Sendo:

PA – Ponto de Amolecimento (° C).

P – Penetração (Décimos de milímetros).

#### 4.3.6 Absorção de água

O ensaio de porosidade foi realizado somente para o ligante asfáltico em sua condição pura e para os mástiques compostos por fíler a 120% já que o objetivo era comparar os valores extremos, ou seja, o CAP 30/45 com nenhum teor de fíler e o CAP30/45 com o maior teor de fíler.

O ensaio foi baseado na ABNT NBR 9778 (2005). Porém, foram realizadas modificações na metodologia proposta pela norma pois ela trata de ensaio de absorção de corpos de prova em concreto. A massa seca foi obtida deixando o material, durante 24 horas, na estufa na temperatura de 80° C. Na última hora, a temperatura foi aumentada de modo que o material ficasse mais fluido, para melhorar sua trabalhabilidade.

Posteriormente, o material foi despejado em um molde, como se pode ver na Figura 11, e deixado para resfriar durante 35 minutos. Logo em seguida, foi feita a pesagem para a massa seca.

Figura 11 – Molde do ensaio de absorção



Fonte: Autor (2019)

Após a amostra resfriar em temperatura ambiente, foi cortada o excesso de amostra do molde e em seguida, ela foi colocada dentro da água, a temperatura controlada de 25° C, durante 24 horas (Figura 12).

Depois de dada as horas do banho d'água, a amostra foi levada para a medição da massa imersa, por meio de uma balança hidrostática (Figura 12). Por fim, foi secada a superfície do material, para medir a massa do sólido saturado. A absorção, em porcentagem, foi calculada pela Fórmula 3.

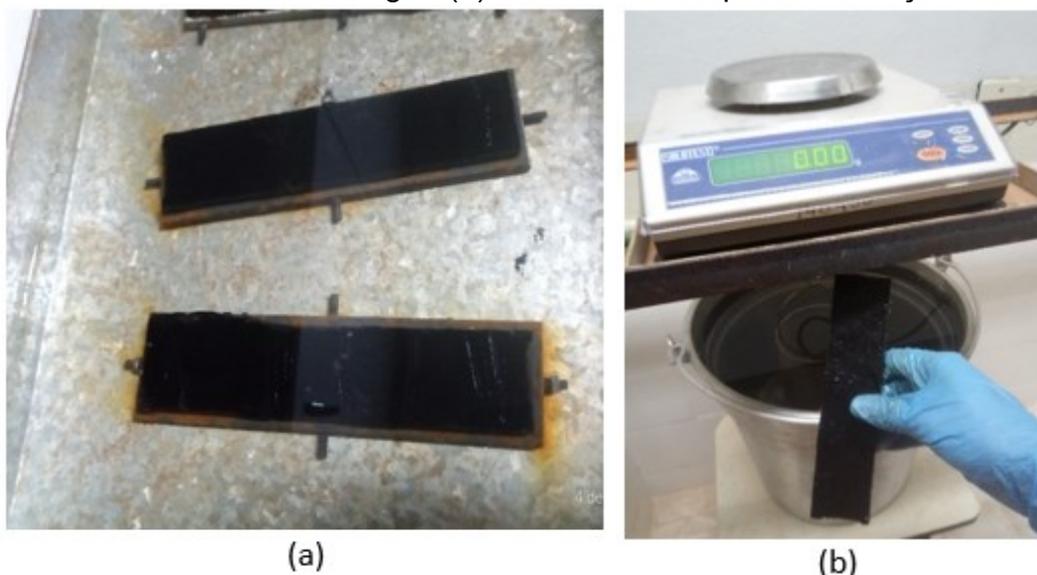
$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

$m_{sat}$  – Massa da amostra saturada (g).

$m_s$  – Massa da amostra seca (g).

Figura 12 – Amostra em banho d'água (a) e sendo levada para a balança hidrostática (b)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.7 MEV e EDS

As imagens do MEV foram feitas para o CAP 30/45 e para os mástiques compostos por fíler (pó de basalto e metacaulim) na porcentagem de 120%.

Não foram verificados os mástiques com adição de 60% de fíler, devido ao interesse em observar as amostras com valores extremos, ou seja, o ligante puro e o mástique composto por 120% de fíler.

Para essa etapa, foi necessária a metalização das amostras com ouro para facilitar a condução dos elétrons pela amostra. Isso se deve porque a varredura é feita a partir de um feixe de elétrons que interage com o material instrumentado de modo a gerar diversos tipos de sinais que são utilizados para a criação da imagem e análise qualitativa da amostra.

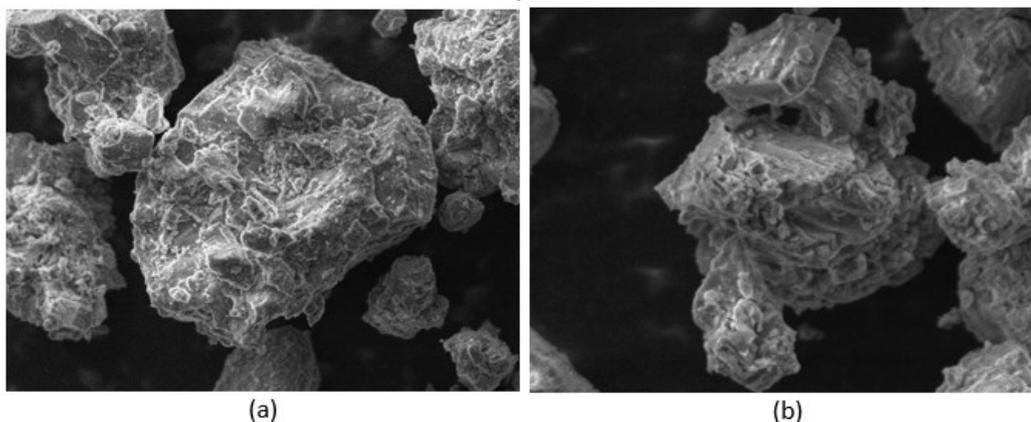
## 5 Resultados e Discussões

### 5.1 Caracterização dos Fíleres

#### 5.1.1 MEV e EDS

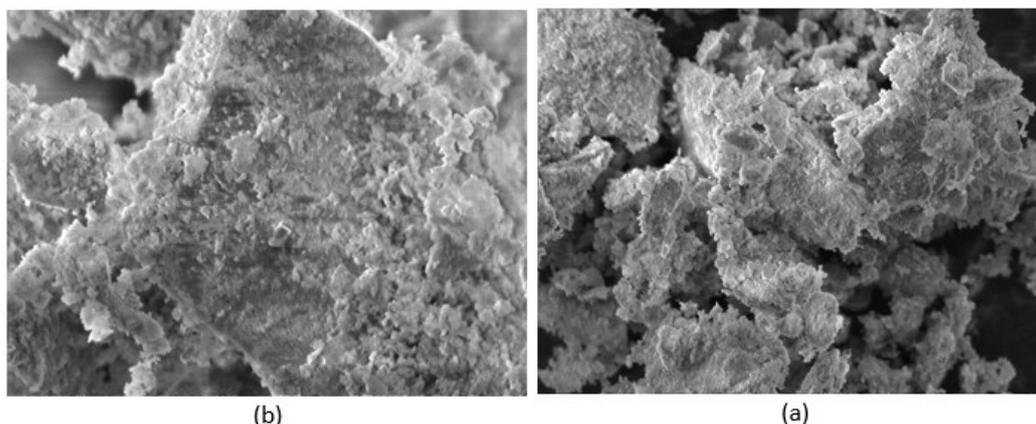
Nas Figuras 13 e 14 são apresentadas as imagens capturadas pelo MEV a ampliação de 5000 vezes e 10000 vezes para os fíleres de pó de basalto e metacaulim, respectivamente.

Figura 13 – Ampliação microscópica de 5000 vezes (a) e 10000 vezes (b) de uma amostra de pó de basalto



Fonte: Autor (2019)

Figura 14 – Ampliação microscópica de 5000 vezes (a) e 10000 vezes (b) de uma amostra de metacaulim



Fonte: Autor (2019)

Para o fíler de pó de basalto notou-se superfície mais arredondada, formas angulares mais definidas. Já o metacaulim apresentou em sua forma, características não muito definidas.

### 5.2 Ensaios no ligante e no mástique asfáltico

A partir da moldagem das amostras para realização dos ensaios observou-se a diminuição da trabalhabilidade dos mástiques de acordo com o aumento de fíler na mistura. Tal situação pôde-se perceber também ao se comparar os mástiques com o CAP puro, no qual, o CAP puro se apresentou com melhor trabalhabilidade que os mástiques. Contudo o mástique composto pelo pó de basalto teve melhor trabalhabilidade comparado com mástique de metacaulim.

Além disso, a partir dos resultados adquiridos pôde-se perceber um maior efeito da inserção do metacaulim que a do pó de basalto na mistura, explicando a pior trabalhabilidade da mistura com metacaulim.

### 5.2.1 Ensaio de Penetração

Os resultados dos ensaios de penetração para o CAP 30/45 puro, e do CAP mais fíler (pó de basalto e metacaulim), estão demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de penetração das amostras

Amostras	Resultados Penetração (0,1 mm)
CAP 30/45 puro	38,5
CAP 30/45 + Metacaulim (60%)	18,7
CAP 30/45 + Metacaulim (120%)	9,0
CAP 30/45 + Pó de Basalto (60%)	27,0
CAP 30/45 + Pó de Basalto (120%)	15,2

Ao acrescentar fíler ao CAP 30/45 ele ganhou rigidez e maior foi sua consistência (dureza). Esse efeito foi mais evidente para os maiores teores de fíler na amostra.

Como pode ser observado, o fíler que mais enrijeceu a amostra foi o metacaulim em sua proporção fíler/ligante de 1,2. Evidenciou-se o maior efeito da inserção do metacaulim como fíler do que o de pó de basalto.

Asfaltos mais duros normalmente são utilizados em locais com tráfego intenso e de temperaturas elevadas, pois ajudam no combate ao afundamento.

### 5.2.2 Ensaio de Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola

Os resultados do ensaio de ponto de amolecimento estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de ponto de amolecimento das amostras

Amostras	Resultados PA (°C)	Desvio Padrão
CAP 30/45 puro	51,1	0,1414
CAP 30/45 + Metacaulim (60%)	55,9	0,1414
CAP 30/45 + Metacaulim (120%)	61,4	0,5656
CAP 30/45 + Pó de Basalto (60%)	54,8	0,1414
CAP 30/45 + Pó de Basalto (120%)	60,8	0,3535

Com a adição dos fíleres notou-se um acréscimo na temperatura aferida. Tal situação significa que, em condição de serviço, o asfalto pode estar susceptível a maiores temperaturas.

O fíler que mais alterou essa condição da amostra foi o metacaulim. Além disso, notou-se que com o aumento da inserção de fíler na mistura a temperatura aferida é maior.

### 5.2.3 Ensaio de Ductilidade

O ensaio de ductilidade para cada amostra teve como resultado os expressos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de ductilidade das amostras

Amostras	Resultados Ductilidade (cm)	Desvio Padrão	Porcentagem em relação ao mín (%)
CAP 30/45 puro	60,0	0	100
CAP 30/45 + Metacaulim (60%)	35,3	1,2583	58,8
CAP 30/45 + Metacaulim (120%)	13,6	0,7211	22,6
CAP 30/45 + Pó de Basalto (60%)	48,5	1,0535	80,8
CAP 30/45 + Pó de Basalto (120%)	8,3	0,1154	13,8

O mástique de pó de basalto com proporção fíler/ligante de 0,6 em massa foi o que apresentou maior ductilidade comparado com sua proporção fíler/ligante de 1,2 em massa e o fíler de metacaulim. Isso significa que o CAP com pó de basalto à proporção de 0,6 suporta maiores deformações até o seu rompimento, ao contrário do CAP com adição de fíler basalto à proporção de 1,2.

Porém, não se pode afirmar que o pó de basalto em questão de ductilidade é o melhor, pois quando do aumento da sua concentração na mistura na proporção fíler/ligante de 1,2 em massa, quando comparado com o de metacaulim na proporção de 1,2 em massa, seu resultado foi pior.

#### 5.2.4 Ensaio de Recuperação Elástica

A recuperação elástica é um ensaio definido para CAPs modificados e não se tem especificação brasileira para CAP convencional.

Porém, a título de comparação, o ensaio foi realizado e os resultados podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de recuperação elástica das amostras

Amostras	Resultado RE %
CAP 30/45 puro	12
CAP 30/45 + Metacaulim (60%)	11
CAP 30/45 + Metacaulim (120%)	7
CAP 30/45 + Pó de Basalto (60%)	11
CAP 30/45 + Pó de Basalto (120%)	5

Com a inserção de fíler na mistura, foi observado um decréscimo da recuperação elástica, em relação ao CAP puro. Tal fato significa que quando o material é susceptível a uma carga que gera uma deformação, quando da retirada dessa carga, ele recupera menos a deformação sofrida a partir da sua forma inicial.

Entre os fíleres o que obteve pior resultado de recuperação elástica foi o mástique de pó de basalto com teor fíler/ligante de 1,2. Assim, ele é um material menos elástico, e não se recupera bem a deformação ocasionada por esforços.

#### 5.2.5 Índice de Suscetibilidade Térmica (IP)

Os resultados do IP estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do IP das amostras

Amostras	Resultado IP
CAP 30/45 puro	-1,48
CAP 30/45 + Metacaulim (60%)	-1,76
CAP 30/45 + Metacaulim (120%)	-1,84
CAP 30/45 + Pó de Basalto (60%)	-1,35
CAP 30/45 + Pó de Basalto (120%)	-1,20

Os resultados de índice de susceptibilidade térmica sofreram alterações significativas com a adição dos fíleres em comparação ao CAP puro.

A adição de maior proporção de fíler/ligante resultou em uma maior influência sobre a susceptibilidade térmica do mástique.

Os resultados do índice de susceptibilidade térmica para o metacaulim diminuíram comparado com o CAP puro, já para o de pó de basalto, os resultados foram maiores em relação ao CAP em sua condição pura.

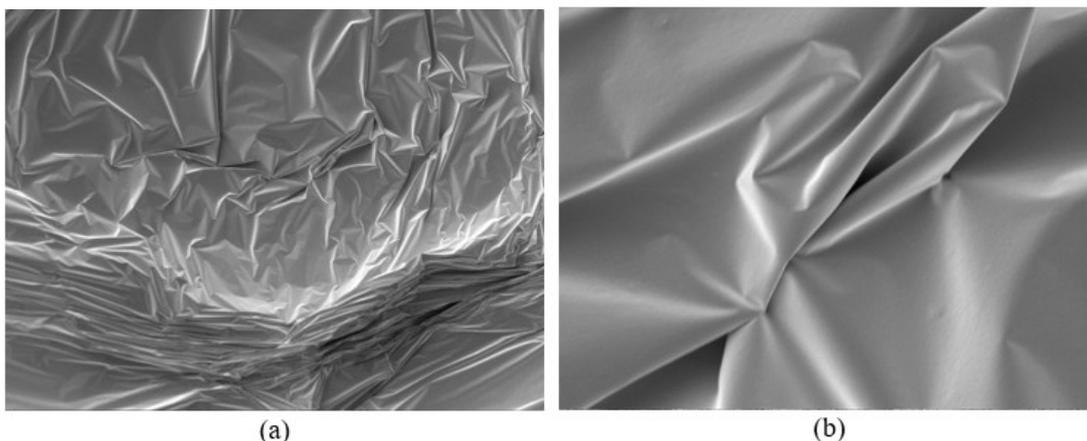
#### 5.2.6 Absorção de água

Os resultados deram bem próximos de 0, o esperado, pois em teoria o CAP é impermeável.

#### 5.2.7 MEV e EDS

A Figura 15 mostra as características do ligante com ampliação de 500 vezes e 5000 vezes. Pode-se perceber no ligante uma característica de plasticidade marcante.

Figura 15 – Ampliação microscópica do CAP 30/45 em 500 vezes (a) e 5000 vezes (b)

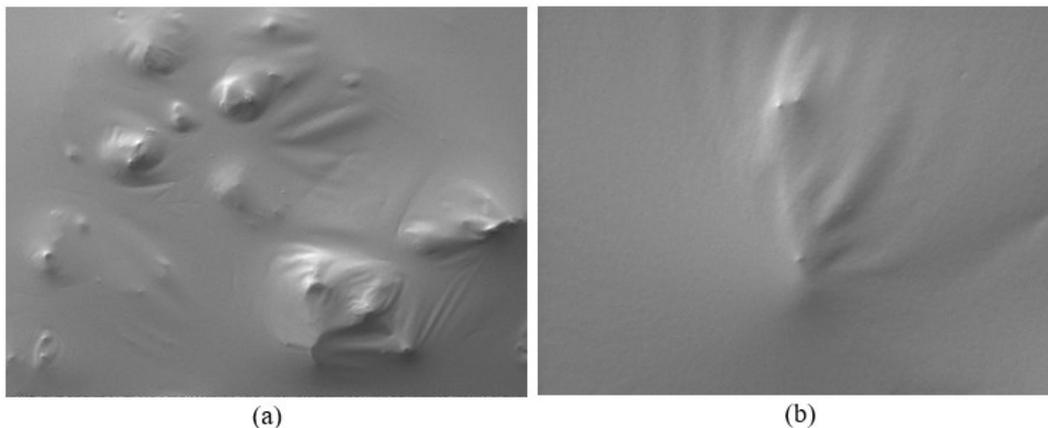


Fonte: Autor (2019)

Na análise do EDS para o CAP puro notou-se que sua composição consiste em Sílicio como principal, sendo o carbono e o oxigênio elementos secundários.

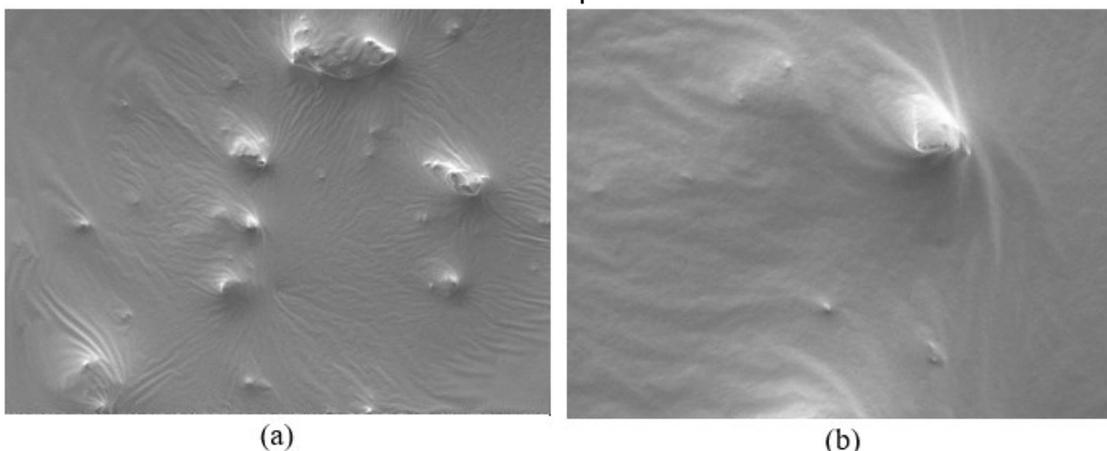
As Figuras 16 e 17 apresentam as imagens capturadas pelo MEV a ampliação de 1000 e 5000 vezes para mástiques de metacaulim 120% e pó de basalto 120%, respectivamente.

Figura 16 – Ampliação microscópica de 1000 vezes (a) e 5000 vezes (b) do CAP 30/45 mais 120% de metacaulim



Fonte: Autor (2019)

Figura 17 – Ampliação microscópica de 1000 vezes (a) e 5000 vezes (b) do CAP 30/45 mais 120 % de pó de basalto



Fonte: Autor (2019)

Para os mástiques asfálticos, nota-se aglomerações das partículas finas, envolvidas por uma película de ligante, o que pode ser indício de boa interação do CAP com os fíleres. Essa interação foi mais evidente no CAP mais o pó de basalto.

Na análise do EDS para o ligante mais com adição de metacaulim, pôde-se observar a composição dos elementos químicos, em sua maioria, de Silício, carbono e oxigênio. Já para o mástique de fíler basalto sua composição em sua maioria se resumiu em Carbono, Silício, oxigênio e ferro.

## 6 Conclusão

A partir do desenvolvimento dessa pesquisa, pôde-se observar que, quanto maior a adição de fíler à mistura, menor a penetração e, por conseguinte, maiores as temperaturas para o ponto de amolecimento. Tais resultados demonstram que o fíler fez com que o CAP ganhasse rigidez e uma maior consistência. Contudo, apesar do asfalto conseguir suportar temperaturas de serviço mais elevadas, ele ficou mais sensível a variação de temperatura.

Com relação a ductilidade e recuperação elástica, constatou-se que, quanto maior o acréscimo de fíler na mistura asfáltica, menor foram os resultados. Assim, infere-se que

menor foi a coesão e o quanto o material suporta deformações até sua quebra, ou seja, o material se tornou mais frágil. Com relação a porosidade não houve alteração significativa.

Ademais, comparando os fíleres, verificou-se que o metacaulim foi o fíler que mais enrijeceu a amostra. A adição de fíler de pó de basalto a proporção fíler/ ligante de 0,6 ao CAP 30/45 foi aquele que deu menor consistência a mistura. Contudo, o metacaulim foi o pior resultado com relação a sensibilidade a variação de temperatura. Em contrapartida, o basalto foi o que teve melhor trabalhabilidade, porém, com menor temperatura em serviço. Isso foi percebido também durante a realização dos experimentos.

Ao analisar a ductilidade e recuperação elástica, o que menos recuperou foi o mástique asfáltico com adição de fíler de basalto a proporção fíler/ ligante de 1,2, o que é coerente com os valores da bibliografia, pois seu resultado perante as deformações até seu rompimento foi baixa.

De modo geral, observou-se que o metacaulim foi mais eficiente nas alterações das propriedades do asfalto do que o fíler de pó de basalto.

## Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, C128-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.

BARDINI, V. S. S; KLINSKY, L. M. G; JÚNIOR, J. L. F. A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2007\(01\)%2009.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2007(01)%2009.pdf)>. Acesso: 26 de nov. 2019.

BARRA, B.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; BERNUCCI, L. **Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, p. 995-1002. 2014.

BARRA, B. S. (2005). Avaliação do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas Densas Utilizando Materiais do Estado do Pará com o Emprego de Pó Calcário. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 177p. 2005.

CETENE. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Disponível em: <<https://www.cetene.gov.br/pdf/mev.pdf>>. Acesso: 23 de nov. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 367/97: Material de enchimento para misturas betuminosas.** Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 003/99**: Material betuminoso – determinação da penetração. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 163/98**: Materiais betuminosos – determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 130/2010 – ME**. Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 131/2010 – ME**. Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DUTRA, L. R. Influência da degradação do agregado na permeabilidade de lastro ferroviários. Relatório Final de Iniciação Científica. Edital n. 5/2017 FAPEMIG/UFU, 2018.

ECIVIL. Filler. Disponível em: <<https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-filler.html>>. Acesso: 29 de nov. 2019.

EHOWBRASIL. O que é mastique asfáltico. Disponível em: <[https://www.ehow.com.br/mastique-asfaltico-info\\_289203/](https://www.ehow.com.br/mastique-asfaltico-info_289203/)>. Acesso: 25 de set. 2019.

EVENTUS. Microscopia eletrônica de varredura e eds da fase alfa e beta hidróxido de níquel hospedada na superfície da argila esmectita volclay. Disponível em: <<http://www.eventus.com.br/micromat/poster/PT.44.pdf>>. Acesso: 23 de nov. 2019.

FREITAS, Eduardo de. Tipos de Rochas; *Brasil Escola*. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/tipos-rochas.htm>>. Acesso: 24 de nov. 2019.

GOUVEIA, F. P. (2013). Efeito da Adição de Fíler Gesso nas Propriedades dos Ligantes Asfálticos e Concretos Asfálticos. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-003 A/13. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159p.

LIGA CONSULTORIA. O que é o Método de Difração de Raios-x e a sua Aplicação na Indústria. Disponível em: <<https://www.ligaconsultoriajr.com.br/single-post/metodo-drx>>. Acesso: 29 de nov. 2019.

MACHADO, I. G. **Falhas de Estruturas de Aço Soldadas Devido a Reduzida Ductilidade**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, Vol 18, N° 04, p. 391-403, Out/Dez 2013.

MEDINA, E. A. (2011). **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção civil e Urbana) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 134 p.

UNISINOS. MEV- Microscópio eletrônico de varredura. Disponível em: <<http://unisinobr.itf/ittfossil/equipamentos/mev-microscopio-eletronico-de-varredura>>. Acesso: 26 de nov. 2019.