

Efeito do tipo e da proporção de filer no comportamento do mástique asfáltico

Effect of fillers type and proportion on asphalt mastic behavior

Ana Luiza Rezende Rodrigues¹; Rodrigo Pires Leandro².

¹ Laboratório de Pavimentação, FECIV/UFU, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. e-mail: analurodrigues98@gmail.com;

² Laboratório de Pavimentação, FECIV/UFU, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. e-mail: rodrigo.leandro@ufu.br.

RESUMO

O sistema rodoviário é o modal mais importante do país e os pavimentos asfálticos desse sistema devem atender às solicitações do tráfego e do clima, além de fornecer conforto e segurança ao usuário. A vida útil desse tipo de estrutura é dependente da correta escolha dos materiais, das espessuras e da rigidez de cada uma das camadas para uma determinada condição de contorno. A resposta mecânica das misturas asfálticas é influenciada pelo mástique asfáltico, definido como a mistura entre o filer e o ligante asfáltico. O mástique age alterando o volume de vazios no agregado mineral, a lubrificação entre as partículas de maior dimensão e, consequentemente, nas características de compactação e no teor de asfalto das misturas. O filer é um material de enchimento, caracterizado por ser a parcela que passa pela peneira nº 200, atua na mistura asfáltica preenchendo os vazios e alterando algumas características dos ligantes asfálticos como viscosidade, elasticidade e suscetibilidade térmica. A relação entre os benefícios de adição de filer e a quantidade do material na mistura não são lineares e elevadas quantidades de filer afetam negativamente a trabalhabilidade, a flexibilidade e a durabilidade da mistura asfáltica. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi analisar os efeitos de dois diferentes tipos de fileres no comportamento de mástiques asfálticos com utilização de um ligante modificado por polímero. Para isso, foram realizados ensaios físicos para avaliar as características do ligante e dos mástiques. Os ensaios foram realizados no asfalto e nos mástique fabricados com pó de basalto e com metacaulim para relações filer/asfalto de 0,6 e 1,2. Pode-se verificar que as adições dos fileres agiram tornando o mástique mais rígido, mais viscoso, menos elástico e menos suscetível à temperatura. Além disso, o metacaulim atuou alterando mais intensamente o comportamento do ligante asfáltico que o filer derivado do pó de basalto.

Palavras-chave: mástique asfáltico, filer, ligante, mistura asfáltica.

ABSTRACT

The road system is the most important modal in the Brazil and the asphalt pavements of this system must meet the demands of traffic, weather and provide comfort and safety to the user. The useful life of this type of structure depends on the correct choice of materials, thickness and stiffness of each layer for a given boundary condition. The mechanical response of asphalt mixtures is influenced by the asphalt mastic, which is defined as the mix between the filler and the asphalt binder. The mastic acts by altering the void volume in the mineral aggregate, the lubrication between the larger particles and, consequently, the compaction characteristics and the asphalt content of the mixtures. The filler is characterized by being the portion that passes through the sieve nº. 200, which acts in the asphalt mixture filling the voids and activating the mastic and changing some characteristics of asphalt binders such as viscosity, elasticity and thermal susceptibility. The relationship between the benefits of filler addition and the amount of material in the mix is not linear, as high amounts of filler negatively affect the workability, flexibility and durability of the asphalt mix. In this context, the main objective of this work was to analyze the effects of different types of fillers on the behavior of asphalt mastics. For this, physical tests were performed to evaluate the characteristics of the binder and of the mastics. The tests were made with basalt powder and metakaolin for 0.6 and 1.2 filler/asphalt. It can be seen that the additions of the fillers acted making the mastic more rigid, more viscous, less elastic and less susceptible to temperature. In addition, metakaolin had a greater effect on asphalt binder behavior than basalt powder derived binder.

Keywords: asphalt mastic, filler, binder, asphalt mixture.

1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é o principal sistema logístico do país e concentra a maior parte do transporte de cargas. Deste modo, os pavimentos asfálticos desse sistema devem ser projetados para as solicitações do tráfego e do clima, atendendo às necessidades dos usuários quanto à segurança e ao conforto.

As cargas dinâmicas provocadas pelo tráfego geram tensões que solicitam o revestimento asfáltico por compressão, tração e cisalhamento quando esta camada é utilizada em estruturas flexíveis. A repetição das tensões e deformações de compressão e de cisalhamento são responsáveis pelas deformações permanentes que, acumuladas ao longo do tempo, formam as trilhas de roda. Concomitantemente, as solicitações por flexão geram tensões e deformações de tração no fundo do revestimento asfáltico que, quando atuantes de forma repetida, provocam o trincamento por fadiga do concreto asfáltico. Nesse cenário, as misturas de revestimentos asfálticos devem ser formuladas e projetadas de maneira a minimizar os principais fenômenos contribuintes para a redução da vida útil dos pavimentos asfálticos: trincamentos por fadiga e deformação permanente.

Uma mistura asfáltica é constituída pela mistura de ligante asfáltico, agregados e filer. A formulação dessa mistura é uma tarefa complexa que tem como objetivo balancear a susceptibilidade do concreto asfáltico aos dois principais causadores de defeitos em pavimento asfálticos por meio da escolha de um teor de asfalto de projeto para uma distribuição granulométrica pré-definida. Na escolha desse teor de asfalto, as principais características controladas são o volume de vazios de ar (V_a), a relação asfalto vazios (RBV) e o volume de vazios na mistura de agregado mineral (VAM). Nessa situação, a associação dos fileres com o ligante asfáltico disponível representa a formação do chamado mástique asfáltico. O mástique exerce efeito na lubrificação entre os agregados de maior dimensão, no volume de vazios na mistura de agregado mineral e, conseqüentemente nas características de compactação e do teor de asfalto de projeto. A qualidade desse mástique é dependente do tipo e da quantidade do asfalto e do filer.

O filer é definido como o material passante na peneira nº 200 e que preenche os vazios entre os agregados graúdos nas misturas asfálticas aumentando a sua densidade, estabilidade e rigidez, além de alterar as propriedades dos ligantes asfálticos. As partículas menores de 0,020 mm incorporam o ligante asfáltico e formam o mástique. A qualidade do mástique relaciona-se diretamente com a qualidade da mistura asfáltica e sua trabalhabilidade. Já as partículas maiores que 0,040 mm tem função de preencher os vazios, fechando a mistura e modificando a sua resistência à água e ao envelhecimento (BARDINI [1]).

Entretanto, a relação entre os benefícios de adição de filer e a quantidade de ligante asfáltico disponível não são lineares. A quantidade elevada de filer em uma mistura asfáltica atua de maneira negativa no que diz respeito a sua trabalhabilidade, flexibilidade e durabilidade. Os fileres alteram a rigidez do mástique e conseqüentemente o comportamento da mistura asfáltica quanto à deformação permanente às elevadas temperaturas e à fadiga às temperaturas intermediárias (BARDINI *et al.*, [2]). A fadiga é decorrente do desenvolvimento e crescimento de microfissuras no mástique e está relacionada às características do ligante asfáltico, às propriedades do filer e à interação físico-química entre os dois, sendo esta última influenciada pela finura e características de superfície do filer.

Nesse cenário, caracteriza-se a complexidade e a importância do mástique asfáltico para a definição do comportamento mecânico de uma mistura asfáltica. Assim, o objetivo principal desse trabalho é analisar os efeitos da quantidade de dois diferentes tipos de filer na formulação de um mástique asfáltico com utilização de um cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero.

2. INFLUÊNCIA DO FÍLER NA MISTURA ASFÁLTICA

O filer ou material de enchimento pode ser definido como aquele que apresenta mais de 65% de suas partículas passantes na peneira nº 200 (DNER – EM 367/97 [3]) ou ainda como um material derivado dos agregados graúdos e miúdos ou de outras fontes que são utilizados em misturas asfálticas que podem melhorar o comportamento reológico, mecânico, térmico e de senilidade à água, desde que dentro de certos limites de distribuição granulométrica e plasticidade (SANTANA [4]). Além disso, SANTANA [4] destaca que o uso de filer na mistura asfáltica melhora a uniformidade da consistência e na suscetibilidade térmica. O filer, segundo BARRA [5], pode atuar de duas diferentes maneiras na mistura asfáltica devido a sua granulometria, as partículas maiores como agregado e as menores como filer ativo. O filer atuando como uma fração do agregado é um material fino e inerte que atua no preenchimento dos vazios e promove o contato entre as partículas maiores, gerando maior resistência da mistura. Já o filer ativo atua na formação do mástique por ser uma partícula em suspensão. O mástique é a mistura do filer com o ligante asfáltico com a função de formar uma matriz que envolve os agregados graúdos e preenche os vazios da mistura asfáltica (BARDINI [1]). O comportamento da mistura asfáltica é afetado de maneira importante pelas características reológicas do mástique asfáltico (BECHARA *et al.* [6]).

Na formação do mástique asfáltico, a parcela ativa do filer se mistura ao ligante, aumentando a consistência e cimentando as partes maiores, que proporciona as alterações na viscosidade e elasticidade do ligante [10]. A função do filer que irá predominar depende de vários fatores, entre eles destaca-se a granulometria dos

agregados, grau de compactação, espessura da película de ligante e a proporção filer/ligante.

O filer influencia as propriedades da mistura asfáltica aumentando a rigidez do mástique, diminuindo a suscetibilidade térmica, aumentando sua estabilidade. Entretanto, como aponta KAVUSSI e HICKS [7], os resultados da interação entre o filer e as alterações na mistura dependem principalmente do tipo de filer (gradação e textura), da sua natureza (composição mineralógica e atividade físico-química) e do teor de preenchimento na mistura.

BARDINI [1] relaciona a adição de filer na mistura asfáltica com a resposta do mástique aos principais defeitos do pavimento. O filer como material de enchimento preenche os vazios da mistura e promove a melhor interação entre o mástique e os agregados, levando a uma maior vida de fadiga. Como a mistura com filer se torna mais rígida o concreto asfáltico fica menos suscetível à deformação permanente.

Dentre as fontes e os tipos de fileres existem os derivados das frações maiores do agregado, como por exemplo o pó de basalto, e aqueles industrializados como a cal, o cimento e o metacaulim. O basalto é uma rocha ígnea eruptiva de granulação fina, conhecida pela sua dureza entre 4,8 a 7. O basalto é rico em silicatos de magnésio e ferro e apresenta característica básica o que pode conferir melhor adesividade ao ligante asfáltico. Contudo, as características de adesividade podem variar tendo em vista que esse tipo de rocha pode apresentar cargas elétricas positiva e negativa devido à presença de minerais como a sílica (carga negativa) e também cálcio, magnésio, alumínio ou ferro (carga positiva) (BERNUCCI *et al.* [8]).

Segundo CRAUS *et al.* [9], as misturas asfálticas produzidas com fileres convencionais não ativos como o derivado de basaltos apresentam nível de deterioração maior do que aquelas elaboradas tendo como filer a cal hidratada ou o pó de calcário. Segundo BARDINI [1], o cimento Portland utilizado como filer em misturas asfálticas densas apresenta melhor comportamento quanto à resistência à tração em relação ao pó de calcário, a cal hidratada e a sílica. Para BARRA *et al.*, [5], o comportamento ativo dos fileres não está relacionado com o tamanho das partículas, mas sobretudo com a sua forma, textura superficial, área da superfície específica e natureza mineralógica. Por outro lado, MOTTA e LEITE [11] destacam que o filer mais fino deve ser associado à uma menor relação filer-ligante, porque diminuirá a espessura de recobrimento dos agregados, alterando as propriedades da mistura.

Nesse cenário, o metacaulim surge como alternativa para substituição dos fileres derivados de rochas naturais e em função da sua finura, caracterizada por partículas com diâmetro médio de 12,4 µm. Contudo esse material apresenta característica pozzolânica, constituído basicamente de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) na fase amorfa que podem prejudicar as características de adesividade da mistura com os ligantes asfálticos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho utilizou-se um CAP modificado de classe 65/90 e dois tipos de fileres, sendo um derivado do pó de basalto e o outro o metacaulim. O primeiro foi obtido em uma pedreira na região do Triângulo Mineiro e é um produto comumente utilizado em obras de pavimentação rodoviária. O metacaulim é um produto industrializado e foi fornecido empresa Metacaulim do Brasil, localizada na cidade de Jundiá, São Paulo. Na Tabela 1 é apresentada a caracterização química desse produto de acordo com informações do fabricante. Nota-se pela análise da Tabela 1 e 2 o metacaulim é um produto constituído essencialmente por óxido de silício e óxido de alumínio com elevada atividade pozzolânica.

Tabela 1 – Características do metacaulim: composição química

Elemento	%
SiO ₂	51,57
Al ₂ O ₃	40,5
Fe ₂ O ₃	2,8
Na ₂ O	0,08
K ₂ O	0,18
Umidade	0,6
PF	2,62
Total	97,8
Equivalente alcalino	0,2
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	94,87

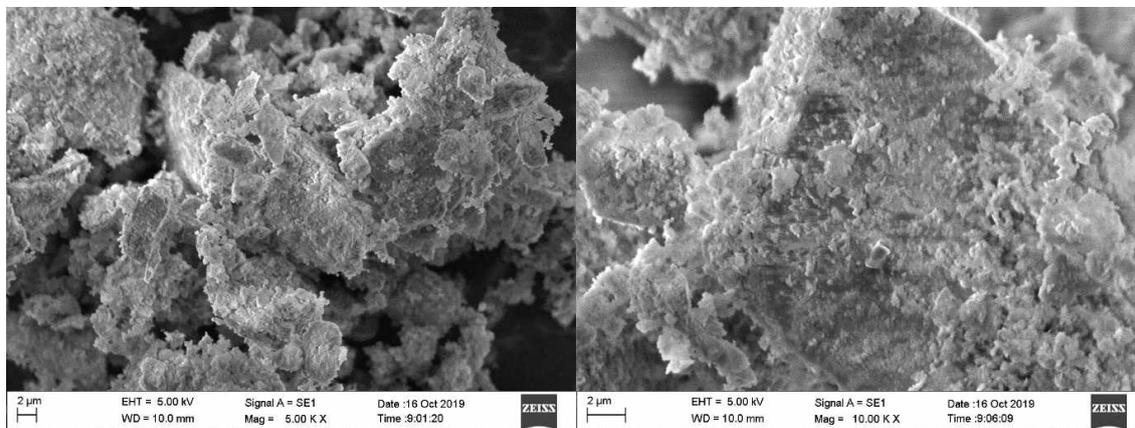
Fonte: Adaptado de Metacaulim do Brasil (2003).

Tabela 2 – Características do Metacaulim: caracterização física e atividade pozzolânica

Diâmetro médio (µm)	12,4
Massa específica real (g/m ³)	2,650
Atividade pozzolânica a 90 ± 5 °C (mg CaO/g amostra)	771,2

Fonte: Adaptado de Metacaulim do Brasil (2003).

Quanto à caracterização do metacaulim pelo ensaio de MEV verifica-se que o material não tem uma forma bem definida (Figura 1). No metacaulim também foi realizada a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) que permitiu determinar os principais elementos químicos presentes no material. O resultado do experimento apontou a predominância dos elementos sílica e alumínio. A caracterização por difratograma do metacaulim foi realizado no trabalho de ALVES [13] indica um pico cristalino de caulinita. Além disso, o quartzo apareceu como principal fase mineral.

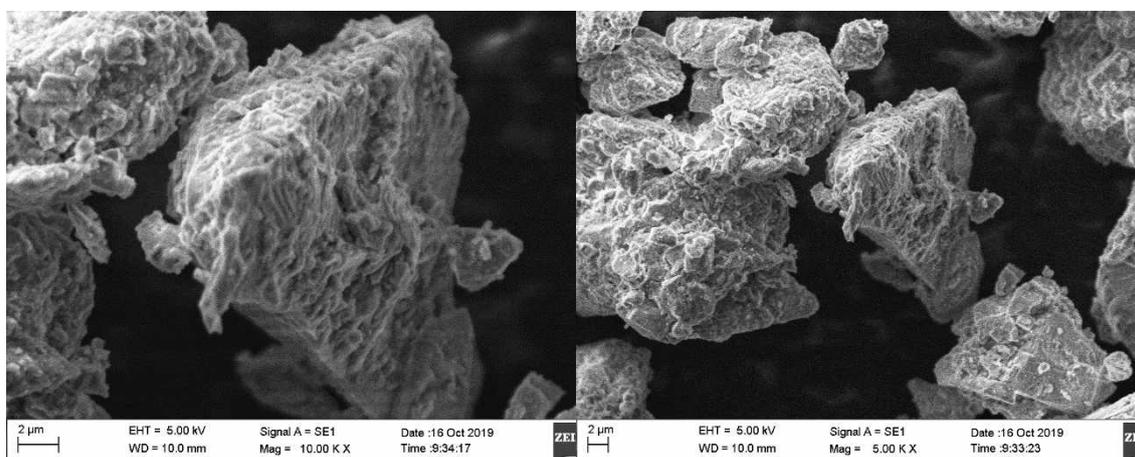


(a)

(b)

Figura 1 – MEV do metacaulim: (a) imagem ampliada 5 mil vezes e (b) imagem ampliada 10 mil vezes.

A caracterização do filler derivado do pó de basalto foi feita por meio do ensaio de massa específica real que resultou em $2,985 \text{ g/cm}^3$, além de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A partir do ensaio de MEV, pode-se perceber que o grão de pó de basalto tem forma definida que se assemelha a um agregado de forma angular. Na Figura 2 é apresentada a imagem de uma amostra de pó de basalto ampliada 5 mil e 10 mil vezes. A partir do ensaio de EDS foi possível observar a sílica como elemento químico principal do material.



(a)

(b)

Figura 2 – MEV de pó de basalto: (a) imagem ampliada 5 mil vezes e (b) imagem ampliada 10 mil vezes.

Os ensaios de difração de raio X (DRX) foram realizados por DUTRA [14] e indicaram quantidade destacada de dióxido de silício (SiO_2), Anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e a presença de Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e quartzo. A Anortita e a Albita pertencem ao grupo de minerais feldspáticos chamado de plagioclásio. Este grupo de minerais constitui uma série isomórfica completa, variando desde o termo mais sódico (albita) até o mais cálcico (anortita).

O ligante asfáltico foi caracterizado quanto à penetração (ASTM D5-06 [15]), ponto de amolecimento (ASTM D36-95 [16]), ductilidade (ASTM D113-99 [17]) e recuperação elástica (ASTM D6084 [18]). Os ensaios de viscosidade e densidade do ligante asfáltico foram feitos pelo fornecedor e os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de viscosidade e densidade do CAP realizados pelo fornecedor do produto

Ensaio	Unidade	Resultado	Especificação (Resolução ANP N° 32, de 2010)
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx	cP	1883	≤ 3000
Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 rpm	cP	566	≤ 2000
Viscosidade Brookfield a a 177°C, spindle 21, 100 rpm	cP	220	≤ 1000
Densidade		1,006	

Para a produção dos mástique asfálticos definiu-se proporções filer/asfalto de 0,6 e 1,2. As misturas de cada um dos tipos de fileres com o CAP foram realizadas por homogeneização em laboratório. Inicialmente, o asfalto foi aquecido em estufa até atingir uma temperatura suficiente para possibilitar sua manipulação para depois ser colocado em um recipiente de mistura que ocorria durante 30 minutos mantendo-se a temperatura entre 180 e 185° C. A velocidade de mistura também era controlada de modo a ser suficiente para criar um vértice central sem gerar bolhas durante o processo. As quantidades de filer foram inseridas de maneira gradativa a uma taxa de 10g/min.

Os efeitos da quantidade e do tipo de filer na mistura com o asfalto foram avaliados por meio dos ensaios de ponto de amolecimento, penetração, recuperação elástica, ductilidade e suscetibilidade térmica.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 4 são apresentados os resultados para o asfalto e para os mástiques elaborados com os dois tipos de fileres. A Tabela 5 mostra as variações percentuais dos resultados dos mástiques em relação ao asfalto.

Tabela 4: Resultados dos ensaios nos mástiques elaborados com filer derivado do pó de basalto e do metacaulim.

Ensaio	Unidade	CAP	Mástique com Metacaulim		Mástique com Pó de Basalto	
			Relação Filer/asfalto		Relação Filer/asfalto	
			0,6	1,2	0,6	1,2
Ponto de amolecimento, mín	°C	69,5	76,25	89,5	73,1	79,5
Recuperação elástica a 25°C, 20 cm, mín	%	92,67	73,5	62,4	84	77,75
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	51,67	20,6	8,25	26,9	22,15
Ductilidade	cm	73	27,5	7,15	33,2	21,5
Índice de Suscetibilidade Térmica		2,85	1,77	1,82	1,87	2,36

Tabela 5: Variações percentuais dos resultados dos ensaios nos mástiques elaborados com filer derivado do pó de basalto e do metacaulim em relação ao CAP modificado.

Ensaio	Mástique com Metacaulim		Mástique com Pós de Basalto	
	Relação Filer/asfalto		Relação Filer/asfalto	
	0,6	1,2	0,6	1,2
Ponto de amolecimento	9,7%	28,8%	5,2%	14,4%
Recuperação elástica	-20,7%	-32,7%	-9,4%	-16,1%
Penetração	-60,1%	-84,0%	-47,9%	-57,1%
Ductilidade	-62,3%	-90,2%	-54,5%	-70,5%
Índice de Suscetibilidade Térmica	-37,9%	-36,3%	-34,6%	-17,3%

Analisando-se os resultados da Tabela 4 percebe-se que a inserção dos diferentes tipos de filer resultaram no aumento da dureza do asfalto e na redução da recuperação elástica que, conseqüentemente, implicaram em temperaturas maiores de ponto de amolecimento e em menor ductilidade das misturas. Esses efeitos foram mais evidentes para as maiores quantidades de filer. Os resultados do índice de susceptibilidade térmica (IP) também sofreram influência significativa a partir das inserções dos diferentes tipos de filer no CAP, principalmente para a relação filer basáltico/asfalto de 1,2, mas sem comprometer o grau de sensibilidade das misturas a temperaturas elevadas. Nota-se também que dobrar a quantidade de metacaulim resultou numa variação de cerca de 4% no IP da menor para a maior quantidade desse produto. Também não houve diferença expressiva entre os dois tipos de filer para a relação filer/asfalto de 0,6. Porém, a maior proporção do filer basáltico resultou em uma maior influência sobre a susceptibilidade térmica do mástique.

Nota-se ainda pelas Tabela 4 e 5 que a inserção dos fileres promoveu maior efeito sobre a ductilidade e a penetração do CAP do que sobre os resultados de ponto de amolecimento. Evidencia-se, ainda, que o metacaulim foi mais eficiente nas alterações das propriedades do asfalto do que o filer basáltico. De modo

geral, o mástique produzido com metacaulim resulta numa mistura mais rígida, menos elástica e menos dúctil. Além disso, na realização da moldagem dos corpos de prova e manuseio dos mástiques, percebeu-se a perda de trabalhabilidade e aumento da viscosidade dos mástiques em relação ao CAP, principalmente para o mástique elaborado com metacaulim. A menor trabalhabilidade verificada durante os processos de moldagem e manipulação das misturas do asfalto com metacaulim pode ser explicada pelo maior efeito da inserção desse produto como filer do que o efeito produzido pelo pó de basalto em termos dos parâmetros apresentados na Tabela 4. Esse comportamento pode ser decorrente da maior absorção do metacaulim pelo asfalto devido à finura desse produto e pelo fato de que as proporções foram realizadas por peso. A massa específica real do pó de basalto é maior do que aquela do metacaulim, assim a presença deste último em volume é cerca de 13% maior do que a do filer natural. A reação cimentante do metacaulim não poderia explicar esse comportando tendo em vista a indisponibilidade do hidróxido de cálcio e de umidade na mistura que são os elementos ativadores da característica pozolânica. Nas Figuras 3 a 6 são apresentados os resultados de penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica e ductilidade em função da relação filer/asfalto.

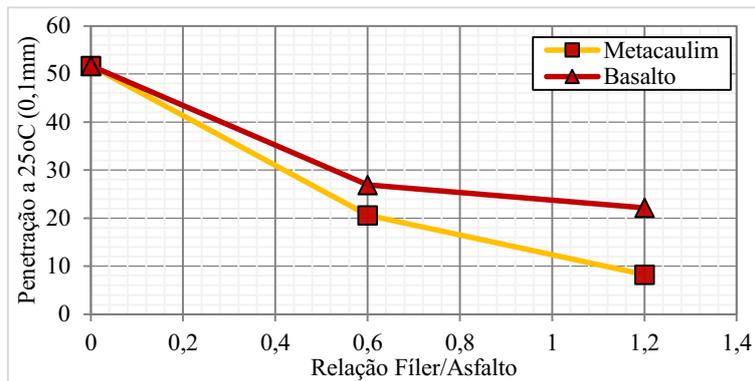


Figura 3 – Resultados de penetração em função da relação filer/asfalto.

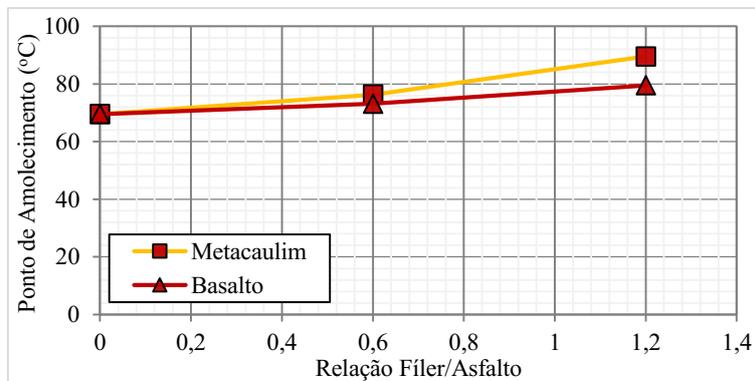


Figura 4 - Resultados de ponto de amolecimento em função da relação filer/asfalto.

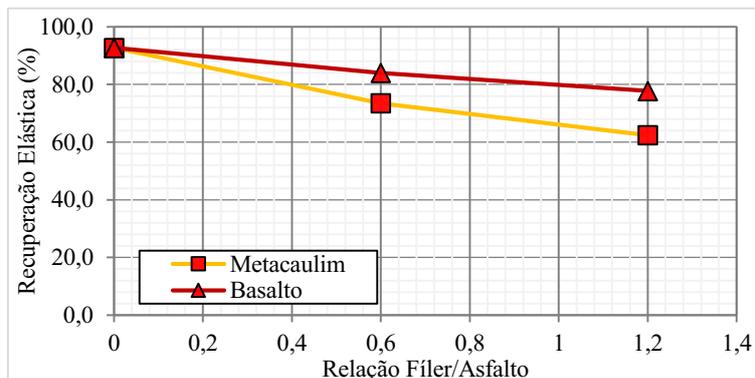


Figura 5 - Resultados de recuperação elástica em função da relação filer/asfalto.

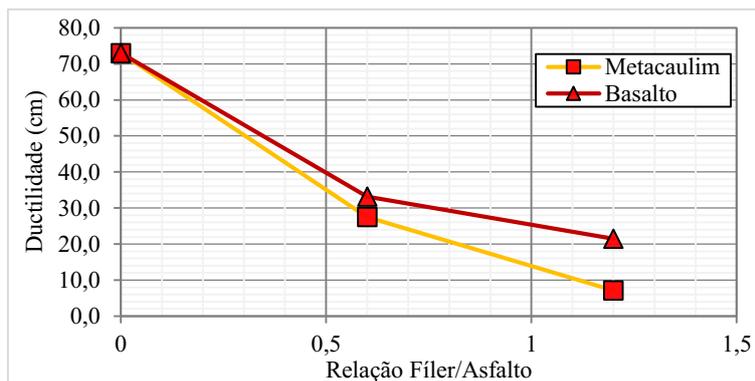
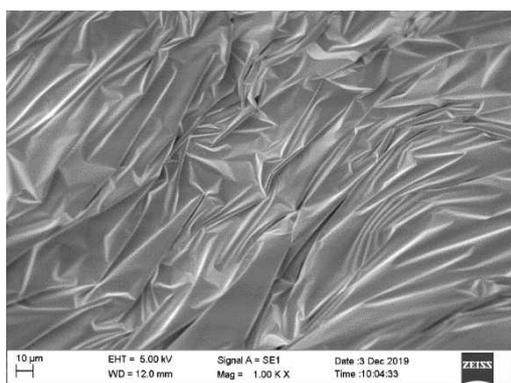


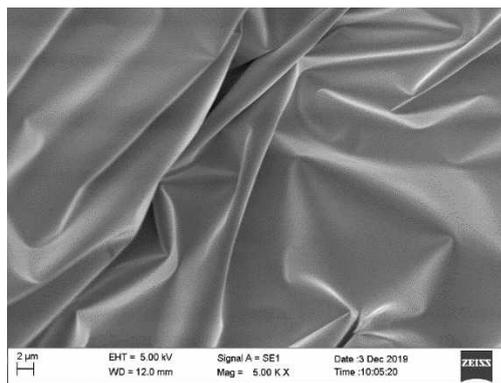
Figura 6 - Resultados de ductilidade em função da relação fíler/asfalto.

O maior efeito das adições do metacaulim como fíler ficam evidentes pela análise das Figura 3 a 6, sendo a taxa de variação nas características físicas sempre maior do que para os casos em que se utilizou o pó de basalto. Nota-se também que as maiores taxas de variação ocorrem para a menor relação fíler/asfalto independentemente do tipo de fíler com exceção dos resultados de ponto de amolecimento.

A partir do ensaio de MEV avaliou-se as mudanças visuais que ocorreram no ligante com a adição de metacaulim e pó de basalto na relação fíler/asfalto de 1,2. O CAP, apresentado na Figura 7, tem um aspecto plástico que provavelmente acontece devido ao fato de ser modificado por polímero. Além disso percebe-se que a superfície é bem irregular.



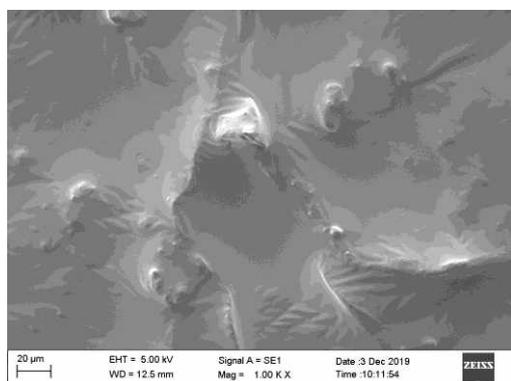
(a)



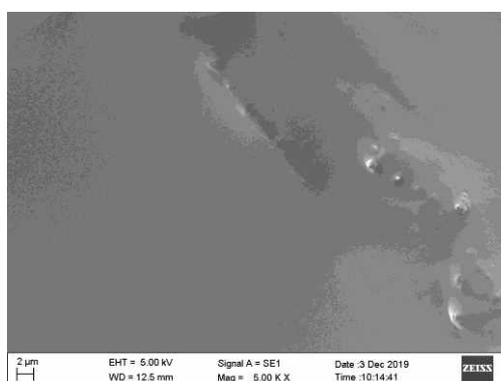
(b)

Figura 7 – MEV de uma amostra de CAP 65/90: (a) imagem ampliada mil vezes e (b) imagem ampliada 5 mil vezes.

A Figura 8 mostra as imagens de MEV para o mástique elaborado com metacaulim com relação fíler/asfalto de 1,2. Percebe-se heterogeneidade da mistura e que a matriz é mais regular que a do ligante asfáltico. Observa-se algumas irregularidades na matriz que podem ter ocorrido por aglomeração das partículas.



(a)



(b)

Figura 8 – MEV de uma amostra de mástique com metacaulim (relação fíler asfalto de 1,2): (a) imagem ampliada mil vezes e (b) imagem ampliada 5 mil vezes.

O mástique fabricado com filer derivado de pó de basalto na relação filer/asfalto de 1,2 apresenta matriz mais regular e mais homogêneo (Figura 11) em comparação com o mástique de metacaulim. Também observa-se algumas irregularidades na matriz que podem ter ocorrido devido à aglomeração das partículas, mas em menor quantidade do que nas amostras de mástique com metacaulim. Essa verificação pode ser fator contribuinte para o maior efeito desse produto sobre as características físicas do asfalto e da redução da trabalhabilidade em relação à mistura com pó de basalto.

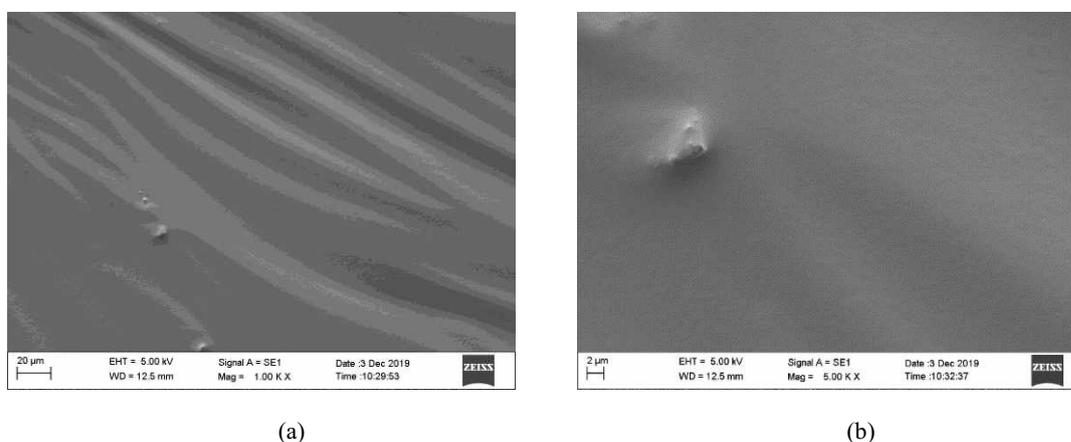


Figura 11 – MEV de uma amostra de mástique com pó de basalto (relação filer/asfalto de 1,2): (a) imagem ampliada mil vezes e (b) imagem ampliada 5 mil vezes.

5. CONCLUSÃO

Em relação às mudanças no mástique asfáltico devido à adição de filer, conclui-se que quanto maior o teor de material de enchimento menor a penetração, maior a temperatura do ponto de amolecimento, menor a ductilidade, menor recuperação elástica e menor trabalhabilidade das misturas. Comparando os dois tipos de fileres, fica evidente que, para as mesmas proporções, o metacaulim agiu de maneira mais eficiente nas alterações das características físicas do CAP. As misturas de asfalto com metacaulim são mais rígidas, menos elásticas e de pior trabalhabilidade quando comparadas às misturas com filer basáltico. Essas diferenças proporcionadas pelo uso desses dois diferentes fileres podem ser decorrentes da forma das partículas verificadas na análise por MEV em que a superfície das partículas de metacaulim apresentam-se mais rugosas. O maior volume de metacaulim associado a menor dimensão de suas partículas pode favorecer a ocorrência de aglomerações na interação com o ligante asfáltico, contribuindo para a redução da trabalhabilidade dos mástiques elaborados com esse produto em relação ao mástique com filer basáltico. Assim, espera-se que o comportamento verificado para os mástiques desse estudo seja parcialmente herdado pelas misturas asfálticas produzidas com o metacaulim apresentando maior rigidez e menor elasticidade em relação às misturas elaboradas com filer basáltico.

Tendo em vista o maior efeito do metacaulim sobre às características do asfalto em relação ao filer natural, a principal recomendação desse trabalho é a utilização de uma relação filer/asfalto menor para a formação de mástiques de modo a minimizar o prejuízo na trabalhabilidade e não resultar em um produto demasiadamente rígido.

Destaca-se que a interação entre os fileres e o asfalto deve continuar sendo investigada por ensaios que avaliem o comportamento dos mástiques sob solicitações dinâmicas, além de se avaliar os efeitos no comportamento mecânico e no dano por umidade induzida de misturas asfálticas usinadas a quente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [[1] BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. Influência do Filer mineral em Propriedades de Misturas asfálticas densas. 2013. 344 f. Tese (Doutorado)- Programa de pós graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2013.
- [2] BARDINI, Vivian Silveira dos Santos, KLINSKY, Luis Miguel Gutierrez, FERNANDES JR., José Leomar Fernandes. A Importância do Filer para o Bom Desempenho de Misturas Asfálticas. *Revista Minerva*, São Carlos, v. 7, n. já/abr. 2010, p.71-78, 2010.

- [3] DNER-ME 367/1997. Material de enchimento para misturas betuminosas. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997, 3p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dner-em367-97.pdf>> Acesso em: 28 nov. 2019.
- [4] SANTANA, H. (1995). “Considerações sobre os Nebulosos Conceitos e definições de Fíler em Misturas Asfálticas”. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá/MT. Associação Brasileira de Pavimentação.
- [5] BARRA, Breno Salgado. Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com emprego de pó calcário. 2005. 202 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.
- [6] BECHARA, M. F.; FAXINA, A. L.; FABBRI, G. T. P., GIGANTE, A. C.; NASCIMENTO, D. R. (2008) “Propriedades Reológicas de Mástiques Asfálticos a Altas Temperaturas”. 39ª Reunião Anual de Pavimentação, Recife/PE. Associação Brasileira de Pavimentação.
- [7] KAVUSSI, A.; HICKS, R.G. (1997). “Properties of bituminous mixtures containing different fillers. Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists.
- [8] BERNUCCI, L. B. et al. “Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros”. Rio de Janeiro, p.504, 2007.
- [9] CRAUS, J. ISAHIAI, I.; SIDES, A. Guidelines for use of dust in hot-mix asphalt concrete mixtures. *Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists*, v.56, p 492-516, 1978.
- [10] TRAXLER, R.N. The Evaluation of Mineral Powders as Filler for Asphalts. *Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists*. Janeiro 1937.
- [11] MOTTA, L.M.G., LEITE, L.F.M. Efeito do Fíler nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas. Anais do 11º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte, pp 1007 – 1017, Gramado – RS.
- [12] SILVA, H. Caracterização do Mástique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mástique: Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas – Tese de Doutorado, Universidade do Minho. Braga, 2006.
- [13] ALVES, Lorayne Cristina da Silva. Geopolímero à base de metacaulim com adição de fibras de sisal. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1233>>.
- [14] 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.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D5M-19, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D36, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D113-99, Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D6084, Standard Test Method for Elastic Recovery of Asphalt Materials by Ductilometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.