

Avaliação do escoamento e da resistência à tração na compressão diametral de uma mistura tipo SMA com adição de cal cálcica e fibra de vidro tipo E

Evaluation of drainage and tensile strength in diametrical compression of a SMA mixture with addition of hydrated lime and glass fiber type E

Maicon Basso dos Santos(1); Matheus Lemos Nogueira

1 Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, Brasil.

E-mail: mbsantos8@ucs.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8615-5016>

2 Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, Brasil.

E-mail: mlnogueira@ucs.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2209-2407>

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 7, n. 1, p. 135-149, Janeiro-Junho 2020 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Setembro 18, 2019; Aceito: Maio 28, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2020.v7i1.3552>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editor: Richard Thomas Lermen

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

Com a crescente demanda por estruturas que suportam elevados volumes de tráfego, excesso de carga, melhor desempenho e menor necessidade de intervenções para reparos ou manutenções, é necessário que novos materiais sejam estudados ou desenvolvidos para sanar tais necessidades. Dentre as misturas asfálticas usinadas a quente, pode-se destacar a *Stone Matrix Asphalt* (SMA) que foi desenvolvida e melhorada ao longo do tempo para atender rodovias com pesado volume de tráfego. Neste trabalho, foram analisados os efeitos da adição da cal hidratada sobre a resistência à tração de uma mistura SMA e o efeito da utilização da fibra de vidro tipo E na mitigação do escorrimento do ligante betuminoso. Utilizou-se ligante asfáltico modificado por polímero (CAP 60/85-E), fibra de vidro tipo E, areia artificial, agregado basáltico e cal. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios para definição dos parâmetros Marshall, ensaio de escorrimento (Schellemborg) e resistência à tração por compressão diametral. O teor de ligante foi fixado em 7% devido aos resultados obtidos nos parâmetros Marshall. No ensaio de escorrimento foi observado teor adequado para a mistura com 0,5% fibra de vidro. Já no ensaio de resistência à tração foi constatada perda de resistência do teor de 1,5% de cal quando comparado a 1%, entretanto ambos percentuais apresentaram resistência superior ao prescrito pela ET-DE-P00/031.

Palavras-chave: SMA. Fibra de vidro. Cal hidratada.

Abstract

With the increasing demand for structures that support high traffic volumes, overload, better performance and less need for repairs or maintenance interventions, new materials must be studied or developed to address such needs. Among the hot-machined asphalt mixtures, we can highlight the Stone Matrix Asphalt (SMA), which has been developed and improved over time to meet high volume traffic. In this work, the effects of the addition of hydrated lime on the tensile strength of the SMA mixture and the effect of the use of type E glass fiber in the mitigation of bitumen binder flow were analyzed. Polymer-modified petroleum asphalt cement (CAP 60/85-E), glass fiber, artificial sand, basaltic aggregate and lime were used. The test specimens were submitted to the tests for the determination of the Marshall parameters, Schellemborg test and Tensile strength by diametral compression. The bituminous binder content was set at 7% due to the results obtained in the Marshall parameters. In the draindown test, adequate content was observed for the mixture with 0.5% glass fiber. In the tensile strength test, a resistance loss of 1.5% lime was observed when compared to 1%, while both percentages presented resistance higher than that prescribed by ET-DE-P00 / 031.

Keywords: Stone Asphalt Matrix. Fiber glass. Hydrated Lime.

1 Introdução

A expansão da malha rodoviária do Brasil ocorreu devido ao grande intercâmbio tecnológico entre o extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e órgãos norte-americanos, sendo que a partir da década de 1950 houve um grande crescimento nas obras de pavimentação rodoviária no país. O Fundo Rodoviário Nacional apresentou patrimônio de 68.000 km de rodovias federais, dos quais 51.000 km pavimentadas, até a sua extinção na década de 1980 (DNIT, 2006). Mais recentemente, o Sistema Nacional de Viação aponta a existência de 213.453 km de rodovias pavimentadas e 1.507.248 km de não pavimentadas.

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (2018), o modal rodoviário é a principal forma de deslocamento de cargas e pessoas no Brasil, correspondendo a mais de 60% e 90%, respectivamente. Tendo em vista a importância das rodovias para a integração nacional, logística e competitividade do produto brasileiro, é necessário que grandes investimentos sejam realizados em infraestrutura, principalmente na pavimentação das rodovias.

Bernucci et al. (2010) definem pavimento como uma estrutura composta de diversas camadas, sendo o revestimento aquela que sofre diretamente com as ações climáticas e recebe as cargas dos veículos. Os autores ainda salientam que na maioria das rodovias brasileiras é utilizado como camada de revestimento o concreto asfáltico, pois apresenta bom desempenho quando os materiais são selecionados corretamente e a dosagem é feita de forma adequada. Porém, com a crescente demanda por revestimentos mais resistentes devido ao incremento de cargas nos veículos, novas técnicas já foram e estão sendo desenvolvidas, como a *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

O SMA é uma mistura asfáltica desenvolvida no final da década de 1960 na Alemanha e chegou nos Estados Unidos da América no início da década de 1990, onde sofreu adaptações e largo uso, principalmente em rodovias com grande solicitação de resistência (BERNUCCI et al., 2010; NAPA, 2002). Segundo DER-SP (2007), SMA pode ser definida como uma mistura executada a quente, em usina própria e com características específicas; sua composição é formada de agregado graúdo, ligante asfáltico modificado por polímero, fibra de celulose ou mineral e fíler.

A utilização de fibra se faz necessária para melhorar o desempenho do ligante asfáltico, mitigando o seu escorrimento devido ao volume de vazios da mistura (BERNUCCI et al., 2010). Desta forma, pode ser utilizada fibra orgânica, inorgânica ou mineral. Em países como Austrália e Nova Zelândia, são utilizadas fibras de vidro, lã de rocha, poliéster e lã natural, porém com menor frequência devido ao custo quando comparado a outros tipos de fibras (MCDANIEL, 2015).

Um dos principais materiais utilizados como fíler em misturas a quente é a cal hidratada. Segundo Little et al. (2006) o uso da cal nessas misturas cria múltiplos

benefícios, como maior resistência do ligante asfáltico e da mistura, melhor resistência ao trincamento, redução dos efeitos deletérios dos processos oxidativos e melhora a estabilidade frente à umidade e durabilidade. Já a *European Lime Association (Eula)* (2011) destaca que a utilização da cal em misturas asfálticas usinadas a quente melhora a adesividade entre o ligante e agregado, aumenta a resistência a deformação permanente em temperaturas elevadas e melhora o desempenho em baixas temperaturas.

Tendo em vista os aspectos apresentados, o presente estudo teve como objetivo avaliar uma mistura asfáltica tipo SMA com adição de fibra de vidro tipo E. O uso de cal hidratada calcítica perante o ensaio de escorrimento do ligante betuminoso e resistência à tração na compressão diametral foram avaliados.

2 Materiais e Métodos

2.1 Caracterização dos materiais

Na Tabela 1 e Tabela 2 são apresentados os resultados da caracterização física dos agregados e da cal calcítica, respectivamente. A avaliação foi feita a partir de ensaios laboratoriais e realizados conforme as normas indicadas.

Tabela 1 – Caracterização física dos agregados

Propriedade	Método	Resultado
Massa específica aparente – agregado graúdo	DNER – ME 081/98	2,43 g/cm ³
Massa específica real – agregado graúdo	DNER – ME 081/98	2,68 g/cm ³
Massa específica real – agregado miúdo	DNER – ME 084/95	2,58 g/cm ³
Massa específica aparente do grão	DNER – ME 081/98	2,43 g/cm ³
Absorção	DNER – ME 081/98	3,84%
Adesividade	DNER – ME 078/94	Satisfatório

Tabela 2 – Caracterização física da cal

Tipo	Pas N° 200 (%)	Massa específica real (g/cm ³)
Cal calcítica	97,48	2,18

A adição de cal em misturas asfálticas foi avaliada nos estudos de Núñez et al. (2007) e Bock (2012) quando incorporados teores acima de 1% de cal calcítica na mistura tipo concreto asfáltico foi observado que a resistência da mistura diminuiu.

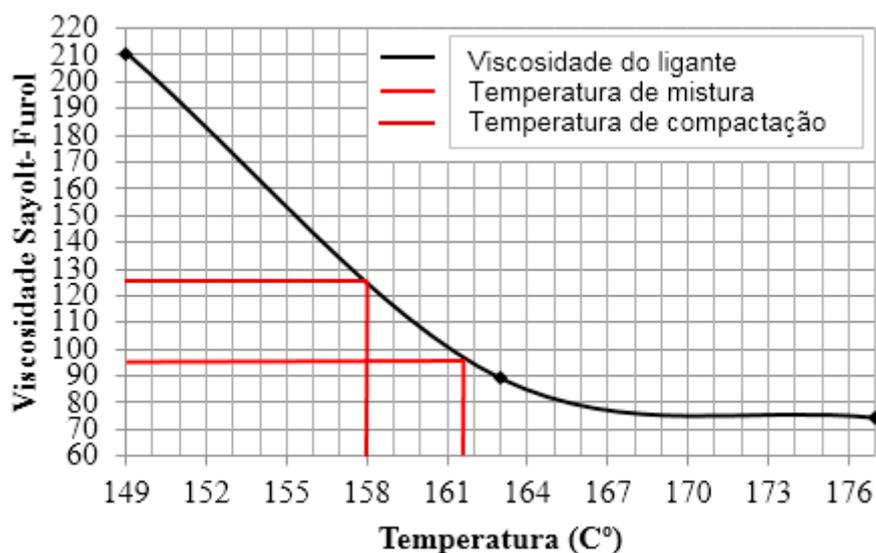
Na Tabela 3, são apresentados os ensaios ao qual o ligante foi submetido, as normas que foram seguidas, assim como as especificações prescritas pela ANP (2010).

Na Figura 1, são apresentados os resultados do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol nas temperaturas medidas de 149 °C, 163 °C e 177 °C; realizado com o prescrito na NBR 14950/2003.

Tabela 3 – Caracterização do ligante betuminoso

Propriedade	Método	CAP 60/85 – E	
		Especificação	Resultado
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560	60 mín.	60,25
Penetração (100 g, 5 s e 25°C)	NBR 6576	40 - 70	57
Ponto de fulgor (°C)	NBR 11341	235 mín.	> 330

Figura 1 – Resultado do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol



A partir do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol, foi possível definir as temperaturas de mistura e compactação dos corpos de prova. A temperatura adequada para mistura foi 161,5 °C e 158 °C para compactação. Segundo Bernucci et al. (2010) a temperatura indicada para mistura deve ser aquela em que o ligante asfáltico esteja entre 75 a 150 sSF (segundos Saybolt Furol), porém preferencialmente entre 75 a 95 sSF. Já a temperatura de compactação deve ser tal que a viscosidade do ligante esteja na faixa de 125 a 155 sSF.

A fibra de vidro tipo E foi caracterizada pelo ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplado com um detector EDS. A técnica de EDS parte do princípio que a energia de um fóton está relacionada à frequência eletromagnética. Este detector é capaz de determinar a energia dos fótons que ele recebe. Dessa forma, é possível traçar um histograma que relaciona a energia dos fótons (keV) e o número de fótons recebidos. Permitindo assim, uma análise semiquantitativa dos elementos que compõem a amostra (DEDAVID et al., 2007).

Optou-se pela utilização deste tipo de fibra devido ao descarte da mesma em alguns processos industriais na região onde este estudo foi elaborado, proporcionando

então a reutilização desse material. Segundo Simões Júnior, Brambratti Júnior e Hemkemeieri (2014) na serra Gaúcha são descartas 80 toneladas por mês de poliéster reforçado com fibra de vidro. Além disso, a fibra de vidro tipo E apresenta baixo teor de álcalis, larga utilização em compósitos, baixo custo e excelentes propriedades mecânicas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS, 2009).

Devido a técnica utilizada para caracterização (EDS), foi necessário avaliar a composição de 5 filamentos da fibra, para assim obter uma amostragem significativa dos compostos. Esta análise foi realizada com o objetivo de caracterizar semiquantitativamente a composição química da fibra de vidro. Dessa forma, são apresentados na Tabela 4 os elementos químicos que compõem a amostra, juntamente com a média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados observados em cada um dos cinco filamentos avaliados.

Tabela 4 – Caracterização dos filamentos da fibra de vidro

Análise	F1	F2	F3	F4	F5	Média	Desvio-Padrão	Coeficiente de Variação
O (%)	43,7	47,0	46,9	41,6	40,9	44,02	2,56	5,82
Si (%)	29,6	25,7	28	25,9	22,6	26,36	2,36	8,97
Ca (%)	17,2	15,2	16,4	15,4	12,9	15,42	1,45	9,41
Al (%)	7,3	6,7	7,1	6,2	5,6	6,58	0,61	9,38
Mg(%)	2,3	2	1,7	1,6	1,4	1,8	0,31	17,56

Observa-se, dentre os valores apresentados na Tabela 4, que o único elemento que apresentou alta dispersão nos resultados foi o magnésio (Mg), pois o coeficiente de variação ficou acima de 15%. Os demais elementos apresentaram baixa variação, já que o coeficiente ficou abaixo de 15%, demonstrando alta homogeneidade dos resultados. Além disso, observa-se que a fibra é majoritariamente constituída de oxigênio (O) com uma média de 44,02% do espectro característico, seguido por silício (Si) e cálcio (Ca), com percentuais de 26,36% e 15,42%, respectivamente. Dessa forma, foi possível conhecer a composição química da fibra utilizada neste estudo e futuramente avaliar a interação desses compostos com os demais materiais que compõe uma mistura asfáltica. Na Tabela 5, são apresentadas as informações técnicas fornecidas pelo fabricante da fibra utilizada no estudo.

Tabela 5 – Informações técnicas do fabricante da fibra

Análise	Resultado mínimo	Resultado médio	Resultado máximo
Gramagem (g/m ²)	366	443	537
Sólido (%)	2,02	2,17	2,37
Tração (kgf/ft ²)	21	38	55

2.2 Mistura SMA

Na Tabela 6 é apresentada a composição granulométrica da mistura avaliada no presente estudo. Além disso, os limites da faixa I DER/SP (2007), que foi a faixa de trabalho adotada no presente trabalho é apresentada.

Tabela 6 – Composição granulométrica combinada

Mistura	Diâmetro dos grãos (mm)	Peneiras	Limite inferior	Limite superior	Faixa de Trabalho (+)	Faixa de Trabalho (-)
100	19	3/4"	100	100	100	100
76,70	12,5	1/2"	90	100	83,70	69,70
56,76	9,5	3/8"	45	60	63,76	49,76
36,54	4,75	4	30	40	41,54	31,54
22,37	2	10	20	27	27,37	17,37
11,22	0,075	200	9	13	13,22	9,22

Foi definido cinco teores de ligante asfáltico (6%, 6,5%, 7%, 7,5% e 8%), sendo moldados três corpos de prova para cada um dos percentuais. Na moldagem dos corpos de prova para o ensaio Marshall, não foi utilizado cal como material de enchimento, nesta etapa do procedimento foi utilizado apenas pó de pedra. Além disso, foi adicionado o percentual de fibra de 0,5% (p.p.) em cada corpo de prova. Os parâmetros de estabilidade e de fluência foram avaliados com o auxílio de uma prensa automática modelo CSR-5T com capacidade de 5000 kgf. Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos vazios da fração graúda do agregado (VCAdrc) e dos vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada (VCAmix). Conforme definição da ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007), observa-se se $VCA_{mix} \leq VCADRC$.

Tabela 7 – Resultado VCAdrc e VCAmix

Teor de Asfalto (%)	VCA _{mix} (%)	VCAdrc (%)	Situação
6,0	40,90	45,73	Aprovado
6,5	40,90	45,73	Aprovado
7,0	40,79	45,73	Aprovado
7,5	41,18	45,73	Aprovado
8,0	41,58	45,73	Aprovado

Para garantir o contato entre os grãos do agregado graúdo é necessário que VCAmix seja menor ou igual ao VCAdrc. Dessa forma, é observado na Tabela 7 que o prescrito na ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007), foi avaliado, e para todos os teores de asfalto ensaiados os resultados de VCAmix se mantiveram inferiores ao VCAdrc. Assim sendo, foi atendido o prescrito na norma ($VCA_{mix} \leq VCA_{drc}$) ET-DE-P00/031.

Além disso, para chegar ao teor de ligante asfáltico de projeto, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de estabilidade, fluência, volume de vazios (V_v), relação betume vazios (RBV) e vazios do agregado mineral (VAM). Todos os valores obtidos durante os ensaios estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Características da mistura asfáltica

Teor de Asfalto (%)	DMT (g/cm ³)	Densidade		Fluência (mm)	V_v (%)	RBV (%)	VAM (%)
		Aparente da Mistura (g/cm ³)	Estabilidade (kgf)				
6,0	2,41	2,26	1329,22	5,24	6,1	68,85	19,72
6,5	2,39	2,26	1390,72	4,59	5,5	72,90	20,18
7,0	2,38	2,26	1432,54	4,69	4,6	77,62	20,45
7,5	2,36	2,23	1223,91	6,46	5,5	75,30	22,21
8,0	2,34	2,23	937,26	6,16	4,5	79,91	22,39

Para definir o teor de ligante de projeto os corpos de prova foram moldados com a adição de 0,5% (p.p.) de fibra de vidro e foi utilizado pó de brita como material de enchimento. Dessa forma, o teor de 7% foi definido como teor de projeto devido ao percentual de volume de vazios ser baixo e próximo a 4%, percentual prescrito na ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007), e estar associado a um percentual de ligante asfáltico menor quando comparado aos demais percentuais de ligante analisados com resultados de volume de vazios satisfatórios. Além disso, com esse teor a mistura apresentou a maior estabilidade, e baixo valor de fluência. São apresentados na Tabela 9, os resultados observados para o teor de ligante asfáltico de 7% comparado aos resultados indicados na bibliografia.

Tabela 9 – Resultados dos parâmetros Marshall para o teor de 7%

Propriedade	Especificação	Parâmetro	Resultado
Teor de Ligante (%)	NAPA (2002)	6 mín	7
Volume de Vazios (%)	ET-DE-P00/031 (SÃO PAULO, 2007)	4	4,6
Relação Betume Vazios (%)	-	-	77,6
Vazios do Agregado Mineral (%)	ET-DE-P00/031 (SÃO PAULO, 2007)	≥17	20,4
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	-	-	2,267
Estabilidade (N)	NAPA (2002)	6200 mín	14053,22
Fluência (mm)	-	-	4,69

Observa-se na Tabela 9 que os resultados obtidos para o volume de vazios (V_v) para o teor de ligante 7% com adição de fibra e pó de brita como filer, é maior do que o prescrito na especificação técnica ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007), porém resultados

semelhantes foram observados por Vale et al. (2014) e Liu et al. (2017), que definiram para suas misturas volume de vazios de 4,4% e 4,2%, respectivamente. O teor de projeto atende ao prescrito por NAPA (2002), já que o percentual está acima do valor mínimo de 6%. O valor da estabilidade também está de acordo com o definido por NAPA (2002), já que o encontrado supera o definido. A relação betume/vazios (RBV) está dentro da faixa observada por Vale et al. (2014), Cao et al. (2013) e Liu et al. (2017). O parâmetro de vazios do agregado mineral (VAM) também atende ao prescrito, tendo em vista que ficou acima de 17%, percentual estabelecido como mínimo por ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007).

2.3 Ensaio de Schellenberg

Para caracterização do escorrimento do ligante asfáltico na mistura, foi utilizado o ensaio de Schellenberg. Dessa forma, dispõe-se de 1kg da mistura em um béquer e leva-se o conjunto para uma estufa a temperatura de 15 °C superior a temperatura de compactação da mistura durante 60 ± 1 min. Após, o béquer é esvaziado e pesado novamente com os materiais retidos em suas paredes (MIRANDA et al., 2013). A diferença entre a massa inicial e a massa retida nas paredes é o percentual de ligante que sofreu o processo de escorrimento. O percentual máximo de escorrimento aceito na prescrição ET-DE-P00/031 (DER/SP 2007), é 0,3%. Além disso, foi adicionado à mistura 1% (p.p) de cal. A Equação 1 foi utilizada para calcular o percentual de escorrimento do ligante na mistura do presente estudo (MIRANDA et al., 2013).

$$D = 100 \times \frac{(M3 - M1)}{(M2 - M1)} \quad (1)$$

D = percentual de material escorrido no Becker (%);

M1 = valor da massa inicial do Becker;

M2 = valor da massa inicial do Becker e a massa da amostra de mistura betuminosa (g);

M3 = valor da massa inicial do Becker e a massa de material retido no copo após virar o Becker (g).

2.4 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral seguiu os procedimentos prescritos por DNIT 136/2010 – ME (Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio). A norma define que os corpos de prova devem ter diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm e altura variando entre 3,50 cm a 6,50 cm. Este ensaio é realizado com uma prensa mecânica com

êmbolo movimentando-se com velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, estufa capaz de manter a temperatura entre 25°C e 60°C , sistema de refrigeração para manter a temperatura a 25°C e paquímetro. Com a Equação 2 foi calculado a resistência à tração.

$$\sigma_T = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (2)$$

σ_T – resistência à tração, em MPa;

F – carga de ruptura, em N;

D – diâmetro de corpo de prova, em cm;

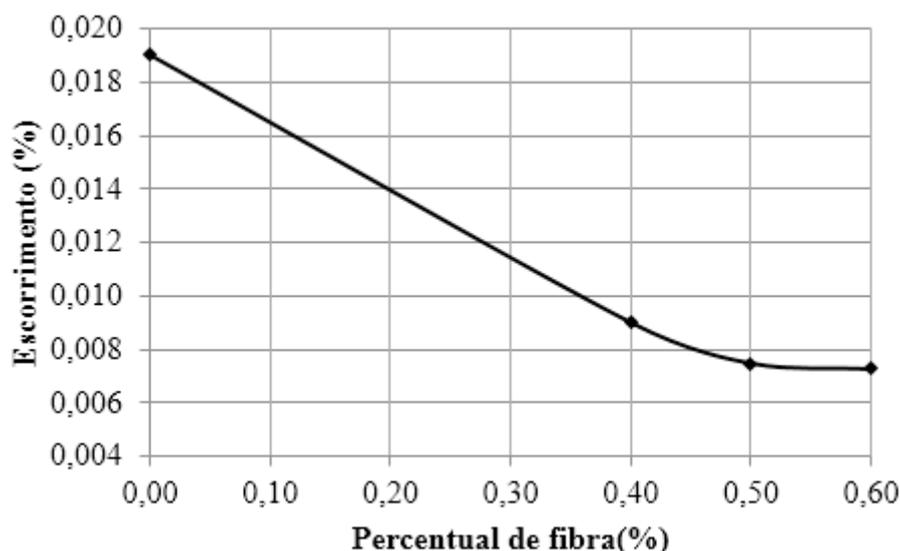
H – altura do corpo de prova, em cm.

3 Resultados e Discussões

Como mitigador do escorrimento do ligante asfáltico foi utilizado a fibra de vidro tipo E. Foram realizados ensaios para diversos teores de fibras (0%, 0,4%, 0,5% e 0,6%) em duplicata, como indicado por Miranda et al. (2013). Além disso, a mistura foi mantida a 173°C na estufa durante 1 hora e foi adicionado 1% (p.p.) de cal em todos os corpos de prova. Dessa forma, é possível observar na Tabela 10 os valores obtidos durante os ensaios e na Figura 02 a graficação dos valores médios de escorrimento em cada teor.

Tabela 10 – Percentual de fibra adicionado x escorrimento do ligante

Teor (%)	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	E (%)	$E_{\text{médio}}$ (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de var. (%)
0	211,73	1164,86	211,82	0,009	0,019	0,0050	25,66
	196,88	1184,43	197,17	0,029			
0,4	158,46	1125,98	158,5	0,004	0,009	0,0025	27,60
	144,95	1052,11	145,08	0,014			
0,5	196,88	1197,78	196,97	0,009	0,007	0,0008	10,06
	211,71	1215,36	211,77	0,006			
0,6	158,45	1139,15	158,55	0,010	0,007	0,0015	20,00
	144,92	1060,63	144,96	0,004			

Figura 02 – Escorrimento x Teor de fibra

Observa-se na Figura 02 que o escorrimento da mistura ficou abaixo do prescrito na resolução técnica ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007) para todos os percentuais de aditivo incorporados, inclusive sem adição, já que o máximo aceito é 0,30%. O percentual de fibra adotado neste estudo foi então de 0,5%, já que neste valor houve satisfatório escorrimento do ligante, somado ao baixo desvio padrão das amostras e pequena dispersão dos resultados, tendo em vista o coeficiente de variação menor que 15%. Além disso, o percentual de adição de 0,5% diminuiu o escorrimento do ligante em 56,66% quando comparado à mistura sem adição.

Os baixos valores de escorrimento podem estar associados ao tipo de ligante asfáltico utilizado (CAP 60/85-E), que recebe a incorporação de polímero tipo SBS, e à temperatura utilizada para o ensaio, 173 °C. Vale et al. (2014) observaram com ligante convencional percentuais de escorrimento menores para temperaturas abaixo de 180 °C, utilizando fibra de celulose. Herráiz et al. (2015) observaram que o escorrimento quando utilizado fibra de poliéster foi de 0,09%. Na Tabela 11, são apresentados os percentuais adotados em outros estudos, para efeito de comparação.

Tabela 11 – Comparativo de diferentes fibras utilizados para diminuir o escorrimento do ligante

Autor(s)	Tipo de fibra	Teor de projeto (%)
Presente estudo	Fibra de vidro tipo E	0,5
Vale et al. (2014)	Fibra de coco	0,5
Herráiz et al. (2015)	Posidonia oceânica	1,5-2
Blaisus et al. (2016)	Lã de vidro	0,4

Após a definição do teor de ligante de projeto, foram moldados três corpos de prova para dois percentuais de adição de cal (1% e 1,5% p.p.). A adição da cal foi realizada sobre o agregado seco e o material foi levado posteriormente a estufa para

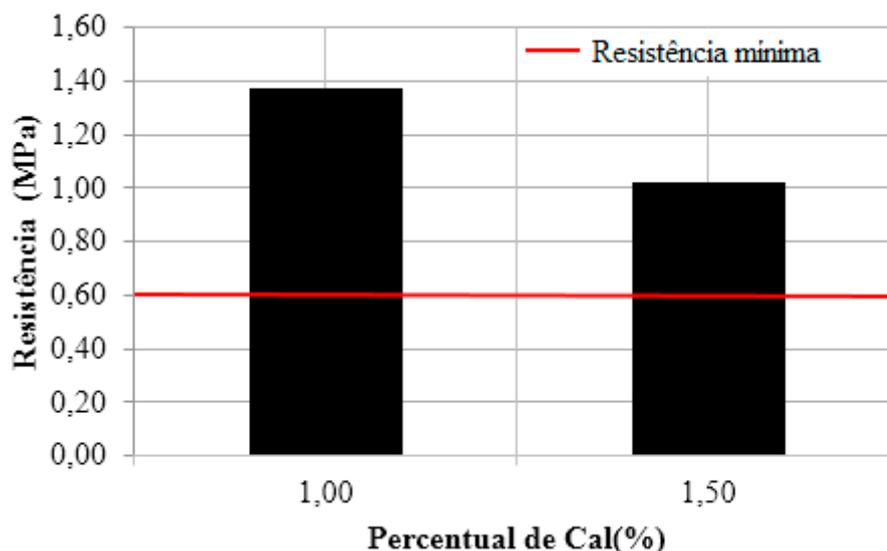
aquecimento. Os percentuais foram definidos a partir do prescrito em ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007), que estabelece um máximo de 2% de material de enchimento. Além disso, o rompimento dos CPs foi realizado a 25 °C em prensa automática modelo CSR-5T com capacidade de 5000 kgf. Na Tabela 12 são apresentados os resultados de resistência à tração (RT) nos dois teores de adição de cal.

Tabela 12 – Resultados da resistência à tração por compressão diametral

% de cal adicionado	Corpo de prova	RT (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação
1%	I	1,44	1,37	0,05	3,51
	II	1,34			
	III	1,33			
1,5%	I	0,87	1,02	0,10	10,26
	II	1,10			
	III	1,08			

Na Figura 03 são apresentadas as médias das resistências observadas nos CPs para cada teor de cal adicionado à mistura.

Figura 03 – Resistência à tração para os teores de cal adicionados



Observa-se na Tabela 12 e na Figura 03 que os dois percentuais de adição apresentaram resistência à tração superior ao especificado na ET-DE-P00/031 (valor mínimo igual a 0,6 MPa). Porém, verifica-se queda de 25,54% na resistência nas amostras com adição de cal de 1,5% quando comparado ao teor de 1,0%.

Observa-se na Tabela 12, que o primeiro corpo de prova de teor 1,5% apresentou resistência inferior aos demais de mesmo percentual. Tal efeito pode ser justificado devido a erros associados ao processo de moldagem do corpo de prova, tempo de mistura do material e até mesmo ao processo de compactação. Dessa forma,

proporcionando maior desvio padrão e dispersão dos dados quando comparado aos exemplares com 1% de cal.

4 Considerações finais

Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho mecânico a partir do ensaio de resistência à tração na compressão diametral e escorrimiento do ligante betuminoso em uma mistura SMA com adição de cal calcítica e fibra de vidro E. Dessa forma, a partir dos resultados observados foi possível concluir que a utilização da fibra de vidro em mistura SMA é viável, pois com a adição dessa fibra e cal calcítica foi observado que o escorrimiento do ligante asfáltico diminuiu em 56,6% quando comparado a mistura sem estas adições. Além disso, a mistura SMA com adição de 0,5% (p.p.) de fibra de vidro e com a adição de 1 % de cal calcítica apresentou desempenho satisfatório.

A adição de cal acima de 1% levou a queda significativa da resistência à tração por compressão diametral. Além disso, verificou-se que a resistência de ambos percentuais (1% e 1,5%) foi superior ao mínimo especificado na ET-DE-P00/031 (0,6 MPa). Por fim, acredita-se que o presente trabalho pode contribuir com os estudos de mistura SMA desenvolvidas no Brasil quando apresenta outra possibilidade de insumo, além de incorporar conceitos de sustentabilidade.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Cimentos asfálticos de petróleo modificado por polímeros elastomérico*. Resolução nº 32 de 21 de setembro de 2010 da ANP – Regulamento Técnico ANP nº 04/2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. *Compósitos I: materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências*. [S.l.]: Abmaco, [2009]. 613 p.

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 11341: Derivados de petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland*. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14950: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade Saybolt Furol*. Rio de Janeiro, 2003.

BERNUCCI, L.B. et. al. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro, 3ª reimpressão, PETROBRAS, ABEDA, 2010.

BLASIUS, L.C.B.; DEL CARPIO, J. A.V.; SALM, V. M. *Uso de lã de vidro na produção de misturas asfálticas SMA*. Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade-Vol. 4: Congestas 2016. ISSN 2318-7603.

BOCK, A. L. *Efeitos da incorporação de cal hidratada em concreto asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado*. 2012. Dissertação de mestrado, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial*. CNT: SEST: SENAT, Brasília, 2017.

CAO, W.; LIU, S.; FENG, Z. *Comparison of performance of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates*. *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 474–479, 2013.

DER/ SP, DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. *ET-DE-P00/031 - Concreto Asfáltico tipo SMA*. p. 41, São Paulo, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER-ME 078: Agregado graúdo - adesividade a ligante betumioso*. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER-ME 081: Agregados - determinação da absorção e de densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro: IPR, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER-ME 084: Agregado miúdo – determinação da densidade real*. Rio de Janeiro: IPR, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2ª Edição, Rio de Janeiro, 2006.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *DNIT 136 - ME: Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio*. Rio de Janeiro: IPR, 2010.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G.. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicação e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- EUROPEAN LIME ASSOCIATION (Eula). *Hydrated lime: a proven additive for durable asphalt pavements. Critical literature review*. Report to the European Lime Association/Asphalt Task Force. September, 2010.
- HERRÁIZ, T. R.; HERRÁIZ, J. I. R.; DOMINGO, L. M.; DOMINGO, F. C. *Posidonia oceanica used as a new natural fibre to enhance the performance of asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, v. 102, p. 601–612, 2016.
- LITTLE, D. N.; EPPS, J. A.; SEBAALY, P. E. *The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt*. Report for Natinal Lime Association, 2006.
- LIU, Y.; HUANG, Y.; SUN, W.; NAIR, H.; LANE, D. S.; WANG, L. *Effect of coarse aggregate morphology on the mechanical properties of stone matrix asphalt*. Construction and Building Materials, v. 152, p. 48–56, 2017.
- MIRANDA, H.; BATISTA, F.; ANTUNES, M.L.; NEVES, J. *Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escorrimento, em misturas betuminosas tipo Stone Mastic Asphalt, segundo a norma europeia EN 12697-18*. Centro Rodoviário Portugues, 7º Congresso Rodoviário Português, 2013.
- MCDANIEL, R. S. *Fiber Additives in Asphalt Mixtures*. Washigton, D.C. , USA. National Cooperative highway research program. NCHRP synthesis 475, 2015.
- NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION - NAPA. *Designing and constructing SMA mixtures - State -of-the-Practice*. Lanham, Mariland, USA. Quality Improvement Series 122, 2002.
- NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; PERAÇA, V.; TSUKUDA, R. S. *Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada*. ABPv - 38ª Reunião Anual de Pavimentação - Manaus, 2007.
- PAVIANI, T. M. *Efeitos da adição de cal hidratada no comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos com agregado granítico*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- SIMÕES JÚNIOR, J.; BRAMBRATTI JÚNIOR, N.; HEMKEMEIERI, M. *Aspectos ambientais da substituição de componentes em fibra de vidro por componentes em ABS (Acrlonitrila Butadieno Estireno) em uma indústria de produção de carrocerias de ônibus*. Science & Engineering Journal, ISSN 1983-4071 23, (2): 33 – 38, jul. – dez. 2014.
- VALE, A. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; SOARES, J. B. *Behavior of Natural Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Two Design Methods*. Journal of Materials in Civil Engineerig, v. 26, p. 457–465, 2014.