

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURA ASFÁLTICA COM LIMALHA DE AÇO COMO AGENTE DE REGENERAÇÃO DE PAVIMENTOS

Eduarda Fontoura
Guilherme Ebani Jacques
Gracieli Bordin Colpo
Mônica Regina Garcez
Lélio Antônio Teixeira Brito

Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Construção e Infraestrutura
Laboratório de Pavimentação

RESUMO

Muitos estudos que visam à recuperação de pavimentos asfálticos vêm sendo realizados, incluindo a questão da regeneração de trincas. Autores sugerem que a regeneração pode trazer uma recuperação da resistência à tração, e que a porcentagem de recuperação está relacionada com o teor de fibras adicionado. Este trabalho busca propor uma mistura asfáltica com a adição de limalha de aço avaliando as propriedades mecânicas da mistura para que em próximos estudos possa ser utilizada para analisar a possibilidade de selamento de trincas através de aquecimento por micro-ondas. Foram desenvolvidas três misturas com teores de 6%, 10% e 13% de limalha de aço em relação ao volume de ligante asfáltico, onde os corpos de prova passaram por ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral. Os resultados apontam que a mistura asfáltica proposta é promissora já que a limalha não interferiu nas propriedades da mistura.

ABSTRACT

Many studies regarding pavement recovery have been carried out, including the crack healing. Authors suggest that healing is able to recover tensile strength and that the percentage of recovery is related to the fiber content added to the mixture. This research aims to propose an asphalt mixture with the addition of short steel fibers evaluated by means of mechanical properties of the mixture in order to investigate the use of steel fibers in crack healing by microwave heating in futures studies. Three mixtures were developed with short steel fiber contents of 6%, 10% and 13% by weight of asphalt binder, where specimens were submitted to indirect tensile strength and resilient modulus test. The results point out that the proposed asphalt mix is promising since the steel fibers did not interfere with the properties of the mixture.

1. INTRODUÇÃO

O tráfego nas rodovias vem crescendo em larga escala, principalmente no que se diz respeito ao tráfego de cargas através da frota de caminhões. Para a engenharia de pavimento, esse dado é realmente alarmante devido aos inúmeros problemas como o desgaste, trincas por fadiga, deformação permanente, que surgem ou são agravados no pavimento devido às altas cargas suportadas.

Paralelo a isso, no meio acadêmico vem crescendo os estudos que tem como objetivo o desenvolvimento de misturas asfálticas que tenham propriedades capazes de realizar a cicatrização de trincas (Little *et al.*, 1999; Daniel e Kim, 2001; García, 2012; Norambuena e García, 2016). Para que isso ocorra uma das opções é o aumento da temperatura da mistura (Uchida *et al.*, 2002), a outra opção é por meio de um processo chamado polimerização (White *et al.*, 2001) para que promover o selamento das trincas. Em geral, isso não é possível sem que seja adicionado algum tipo de material que propicie a variação da temperatura e, ao mesmo tempo, não altere as características do pavimento.

Os materiais adicionados têm caráter alternativo: alguns autores sugerem o uso de fibras metálicas, celulose (Decoene, 1990), polipropileno, poliéster (Abtahi *et al.*, 2009) entre outras. Esses materiais geralmente são escolhidos conforme a sua capacidade de indução magnética (Rudolf *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2013; García *et al.*, 2009). Além da indução magnética, outra técnica que vem sendo estudada é o aquecimento através de equipamentos de micro-ondas (Benedetto e Calvi, 2013). O princípio deste método consiste na inserção de fibras metálicas que quando expostas às micro-ondas propiciam o aquecimento em temperaturas mais elevadas. Assim, como qualquer outro material adicionado às misturas asfálticas, as fibras devem ser caracterizadas com finalidade de tornar sua adição realmente eficiente.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma mistura asfáltica com adição de limalha de aço, analisando seu comportamento mecânico em relação a uma mistura sem adição de limalha. Foram produzidas quatro misturas: uma mistura de referência, sem adição de limalha, e três misturas com variação de teores de limalha (6%, 10% e 13%). A caracterização das propriedades mecânicas das misturas foi realizada através dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral.

2. FIBRAS DE AÇO NO CONCRETO ASFÁLTICO

Liu *et al.* (2011) em seus estudos propuseram que as fibras fossem adicionadas a mistura com o intuito de preencher os vazios da mesma e que através da indução magnética as micro e macro trincas poderiam ser seladas. Assim teores entre 8% e 10% de fibra em relação ao volume de ligante foram adicionados. Os resultados encontrados a partir da análise da regeneração de resistência à tração em um ensaio de flexão a três pontos com deslocamento controlado de amostras indicaram uma recuperação de resistência de até 83,9% do valor inicial.

Em outro estudo García (2012) avaliou uma mistura composta por 7,5% de fibras de aço, 18% de ligante asfáltico e 74,5% de agregado. A partir de análises da flexão a três pontos das amostras concluiu que existe uma taxa adequada para cicatrização das trincas de acordo com a temperatura aplicada. Acrescentou também que o tempo de aquecimento da amostra pode determinar a porcentagem de recuperação da mesma, ou seja, tempos maiores tendem a aumentar a recuperação.

Ambos os estudos analisam a recuperação da resistência das amostras comparando os valores obtidos com o valor resistido pela amostra de referência, sem adição de fibras aplicando a regeneração após fratura completa das mesmas. Outros autores realizaram estudos parecidos e encontraram resultados muito positivos em relação a inserção de fibras nas misturas asfálticas, tanto em relação a composição da mistura como em relação a porcentagem de recuperação (Norambuena e García, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, são descritos os materiais utilizados para o desenvolvimento das misturas asfálticas estudadas. Foram desenvolvidas três misturas, com teores diferentes de limalha de aço, sendo 6%, 10% e 13%, respectivamente.

3.1. Composição das misturas

As misturas foram realizadas utilizando a metodologia de dosagem Marshall (compactação por impacto) preconizada pela NBR 15785 (ABNT, 2010), o volume de vazios considerado no projeto foi de $4\pm 0,5\%$. O agregado utilizado tem origem basáltica e o ligante escolhido para a

mistura foi o cimento asfáltico de petróleo (CAP) convencional - CAP 50/70. Para conferir a adesividade necessária da mistura, optou-se por utilizar na composição 2% de cal dolomítica em relação ao peso total. O resíduo da limalha de aço tem origem na indústria de cutelaria.

3.1.1 Granulometria

A composição granulométrica das misturas foi enquadrada na faixa C do DNIT (DNIT 031/2006). A porcentagem de agregado utilizada na composição final foi de 24% de brita 3/4, 24% de brita 3/8, 50% de pó de pedra e 2% de fíller (cal). Para efeito de comparação dos resultados de ensaios mecânicos, foi utilizada uma mistura asfáltica de referência inserida na mesma faixa granulométrica, porém sem limalha, desenvolvida por Mensch (2017) e apresentada na Figura 1.

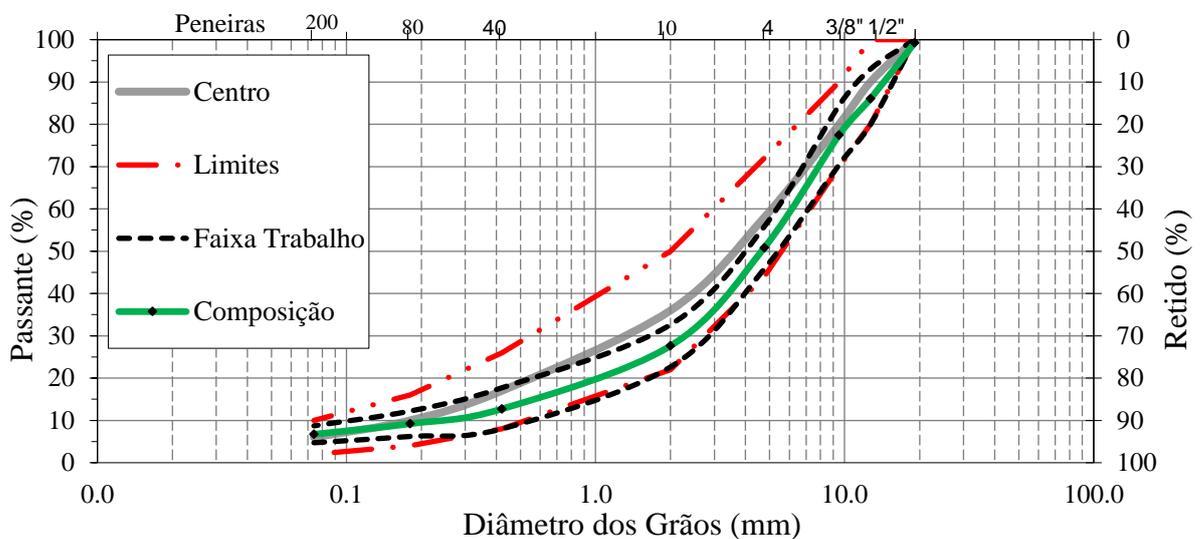


Figura 1: Composição Granulométrica - Faixa C DNIT - 031/2006 ES

3.1.2 Limalha de aço

A limalha de aço é um resíduo do processo de fabricação de produtos no geral de uso doméstico, portanto, é um material que acaba sendo descartado na cutelaria. A utilização da limalha na mistura traz também uma alternativa de utilização de um material que para a indústria não tem utilidade, mas que para a mistura asfáltica é de grande importância.

Para obter as imagens da microestrutura das fibras, utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV). As fibras foram depositadas sobre um *stub* de alumínio e recobertas com fina camada de ouro. O microscópio eletrônico utilizado foi o JEOL 6060 operando a 10 kV. A Figura 2 representa a micrografia para a medição do diâmetro da limalha. A partir das análises de microscopia, foi possível estimar o diâmetro médio das fibras em 5,8 μ m.

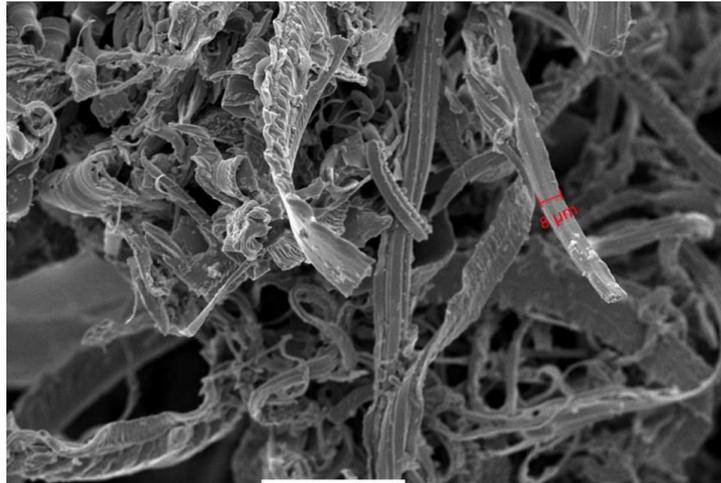


Figura 2: Micrografia da limalha

3.2. Método de moldagem

A limalha de aço antes de ser utilizada foi seca em estufa a uma temperatura de 40°C para perder a umidade presente na mesma. Depois de seca e antes de adicioná-la na mistura, optou-se por peneirá-la, conforme Figura 3(a), para evitar a aglomeração no interior dos corpos de prova. Segundo García *et al.* (2013), a aglomeração das fibras dentro do corpo de prova pode influenciar na capacidade de aquecimento uniforme do material.



Figura 3: (a) limalha sendo peneirada; (b) agregado pré-misturado na cuba

O agregado foi mantido em estufa a 163°C e o CAP, a 153°C, a temperatura do ligante foi obtida através da curva de viscosidade rotacional, já a do agregado de forma indireta a partir dela. O procedimento de mistura consistiu em colocar o agregado em uma cuba pré-aquecida e adicionar a porcentagem de limalha em relação a massa de ligante. Antes de acrescentar o ligante, o agregado e a limalha foram misturados previamente para melhorar a homogeneização da mistura asfáltica, Figura 3(b). Após a homogeneização do material utilizado, a mistura foi deixada por duas horas em estufa a 140°C, também obtida através do ensaio de viscosidade, este procedimento de envelhecimento corresponde ao envelhecimento a curto prazo que ocorre

durante o processo de mistura, estocagem e aplicação em campo. Depois desse período a compactação foi realizada de forma mecânica, conforme é apresentado na Figura 4.



Figura 4: Equipamento de compactação.

3.3. Ensaio de resistência a tração por compressão diametral e módulo de resiliência

O módulo de resiliência (MR) consiste na relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano vertical de uma amostra cilíndrica e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada. O procedimento de ensaio de resistência a tração por compressão diametral (RT) consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro resultando em tensões de tração uniformes perpendicularmente ao diâmetro solicitado (Bernucci, 2007).

Os ensaios foram realizados conforme preconizado através das normas DNIT 135 (2010a) e 136 (DNIT, 2010b). Dos corpos de prova (CP) moldados, foram selecionados aqueles que melhor se enquadravam no volume de vazios, adequados para o projeto ($4 \pm 0,5\%$). Na Tabela 1 são apresentadas as principais características dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 1: Resumo dos corpos de prova ensaiados

Mistura	Corpo de prova	Volume de Vazios (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
6%	11	4,0	102	62,8
	16	4,0	102	64,2
	18	3,6	102	64,2
	23	4,0	102	63,5
10%	8	3,9	102	64,2
	18	4,0	102	65,4
	20	3,9	102	65,4
	24	3,9	102	65,8
13%	10	3,5	102	64,9
	13	4,5	102	64,9
	14	4,2	102	64,7
	15	4,0	102	64,8

Os CP's foram condicionados a 25°C em estufa para a realização dos ensaios. Das quatro amostras uma foi utilizada para ensaio de RT em prensa mecânica, conforme Figura 5(a). O valor de resistência encontrado foi utilizado como parâmetro inicial no ensaio de módulo, Figura 5(b), dos demais corpos de prova.

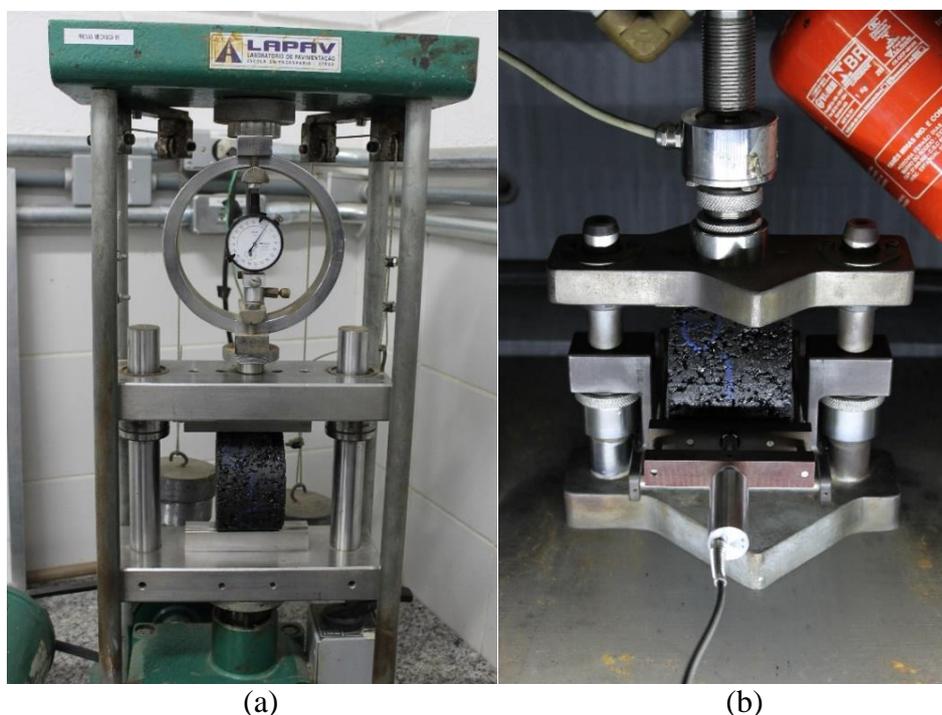


Figura 5: (a) equipamento de RT; (b) equipamento para MR

4. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos para as misturas com os três teores de limalha analisados.

4.1. Dosagem das misturas asfálticas

Os resultados encontrados para as misturas propostas são mostrados na Tabela 2. Vale destacar que os dados da mistura sem limalha foram extraídos do trabalho de Mensch (2017) e serviram como parâmetro de comparação.

Tabela 2: Resumo das propriedades das misturas avaliadas

Propriedade	DNIT – ES 031/2006	Sem limalha	6%	10%	13%
Teor de Betume (%)	--	5,30	5,30	5,30	5,30
Volume de Vazios (%)	3 a 5	3,95	3,82	3,90	4,05
Relação Betume Vazios (%)	72 a 82	75,8	77,16	76,49	75,94
Vazios do agregado (%)	>15	16,6	16,70	16,72	16,85
Massa Esp. Máxima Medida (kN/m³)	--	25,06	25,29	25,13	25,16
Massa Esp. Aparente (kN/m³)	--	24,59	24,32	24,14	24,14
Estabilidade (kgf)	>500	1066	932	607	806
Fluência (1/100 in)	8 a 18	12,0	10,0	8,0	9,0

Todas as misturas ficaram dentro dos parâmetros estabelecidos pelo projeto de dosagem. A compactação das misturas propostas não apresentou grande variação, já que ficaram dentro do volume de vazios estabelecido. Destaca-se que a estabilidade e a fluência da mistura com teor de 10% ficaram um pouco abaixo da mistura de referência, porém ainda acima dos limites estabelecidos por norma.

4.1. Resistência à tração por compressão diametral

O uso da limalha de aço na mistura resultou em maiores valores de RT comparado ao valor observado para a mistura de referência desenvolvida a quente por Mensch (2017) sem limalha, conforme Figura 6. Entretanto o aumento da porcentagem de limalha na mistura reduziu os valores de RT chegando próximo aos 1,07Mpa da mistura de referência.

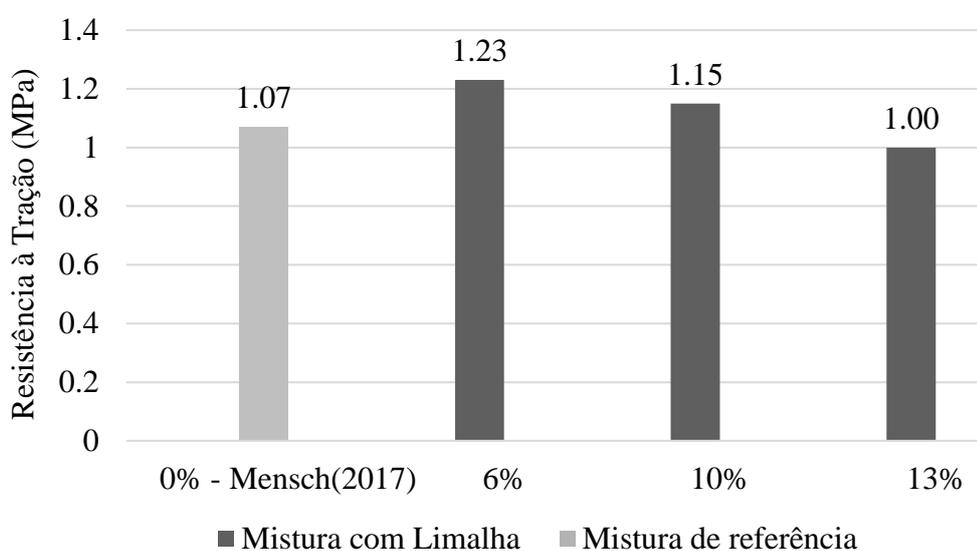


Figura 6: Resistência à tração para os três teores de limalha avaliados

Segundo Norambuena *et al.* (2016) essa diminuição da resistência com o aumento do teor de limalha está relacionada com o volume de vazios gerado pelo aumento das partículas nos corpos de prova. Ainda nesse estudo, concluiu-se que essa diminuição necessita ser melhor avaliada, para que seja possível chegar ao teor ótimo de limalha já que a inserção da mesma gerou aumento de resistência.

4.2. Módulo de resiliência

Conforme é mostrado na Figura 7, os resultados ficaram próximos da mistura de referência sem limalha (Mensch, 2017). Nota-se que os três teores avaliados ficaram abaixo dos 6956 MPa da mistura de referência, sendo o de 6% o mais próximo a ela.

Para García *et al.* (2013) os teores acima de 6% seriam mais adequados, já que elevariam mais a temperatura no processo de aquecimento na qual o material é submetido no processo de regeneração. Entretanto, teores muito elevados tendem a diminuir o módulo, evidenciado no teor de 13% que teve mais de 1000 MPa de diminuição em comparação com a referência. O que já não tornaria o método proposto interessante, nesse sentido sugere-se o teor ótimo esteja entre 6% e 10%.

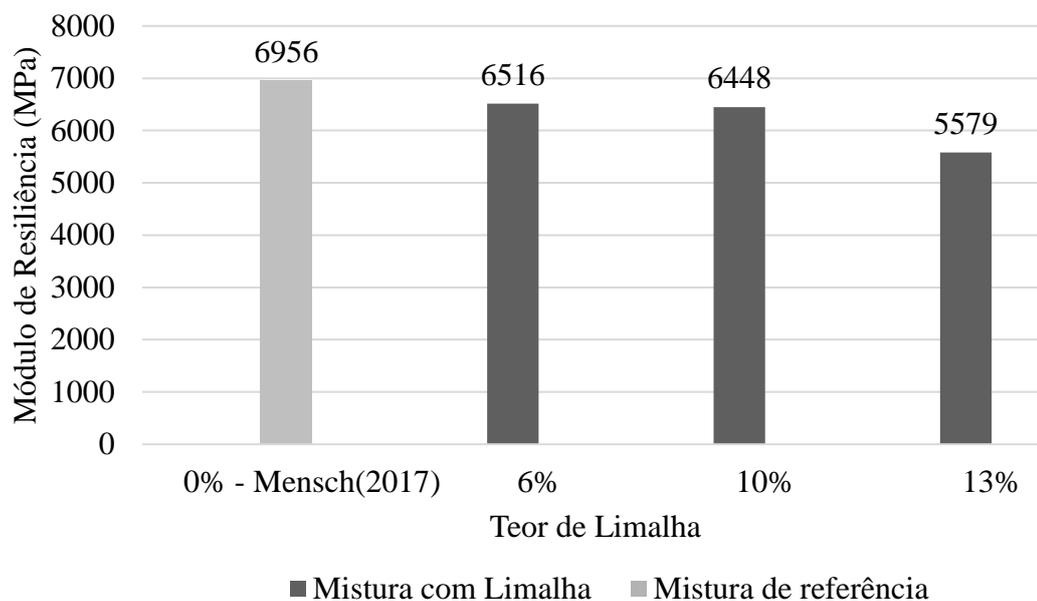


Figura 7: Módulo de resiliência para os três teores de limalha avaliados

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como proposta estudar as propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica modificada através da inserção de limalha de aço. Além disso, buscou-se demonstrar que essa modificação não alteraria suas propriedades, de modo a viabilizar o uso da limalha de aço em misturas asfálticas para a técnica de selamento de trincas através do aquecimento por micro-ondas.

A mistura asfáltica proposta alcançou o objetivo, já que não alterou de forma relevante as propriedades analisadas, ficando dentro das especificações para a método utilizado. Neste sentido, foi observado que a opção de peneirar a limalha antes de inseri-la na mistura foi uma boa solução já que devido ao seu diâmetro relativamente pequeno, poderiam ocorrer aglomerações no interior dos corpos de prova conforme é descrito por García *et al* (2013). Os resultados apresentados podem ser considerados promissores, já que as misturas com diferentes teores de limalha de aço apresentaram comportamento semelhante aos da mistura de referência, sem limalha. A inserção da limalha não causou problemas de trabalhabilidade da mistura durante a moldagem, favorecendo os objetivos futuros de utilização na regeneração do pavimento.

Na comparação entre os teores nota-se que a rigidez diminui ao aumentar o teor de limalha, porém, ainda é necessário avaliar mais características da mistura, para chegar a um resultado conclusivo sobre o teor adequado de limalha que deve ser inserido na mistura. Além disso, o módulo de resiliência apresentou uma ligeira diminuição na comparação com a mistura de referência, o que torna necessário observar em estudos futuros se essa diminuição não inviabiliza o uso da limalha.

São sugeridos como próximos passos para pesquisa ensaios de flexão para obtenção de dados da resistência ao trincamento e vida de fadiga por tração indireta, para analisar de maneira mais completa a viabilidade da metodologia proposta. Também se propõem realizar ensaios que avaliem a temperatura que as amostras alcançam através do aquecimento por micro-ondas para estabelecer uma taxa de aquecimento adequada.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Programa de Treinamento em Engenharia Rodoviária (Peter) do Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por proporcionar a realização das misturas e ensaios realizados. E a Pró-Reitoria de Pesquisa (PROPESQ) - UFRGS, pelo apoio no desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2010) *NBR 15785 – Misturas asfálticas a quente – utilização da aparelhagem Marshall para preparação dos corpos-de-prova com diferentes dimensões e aplicações – Publicação Periódica Científica - Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) *Norma 135/2010 - ME – Determinação do módulo de resiliência*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) *Norma 136/2010 - ME – Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2006) *Norma 031/2006 - ES – Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico - especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Bernucci, L.; L. Motta; J. Ceratti; J. B. Soares (2007) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobrás e ABDEA.
- Abtahi S. M.; M. Sheikhzadeh e S. M. Hejazi (2009) Fiber-Reinforced Asphalt Concrete - a Review. *Construction and Building Materials*, v. 24, n.6, p. 871–877.
- Benedetto A. e A. Calvi (2013) A pilot study on microwave heating for production and recycling of road pavement materials. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 351 – 359.
- Daniel JS. e YR Kim (2001) Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering* v.13, p.434–440.
- Decoene Y. (1990) Contribution of cellulose fibers to the performance of porous asphalts. *Transportation Research Record*, v. 1265, p. 82 – 86.
- García A.; J. Norambuena – Contreras; M. N. Partl e P. Schuetz (2013) Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers. *Construction and Building Materials*, v. 43, p. 107 – 117.
- García A. (2012) Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel* v. 93, p. 264 – 272.
- García A, E. Schlangen, M. van de Ven e Q. Liu (2009) Electrical conductivity of asphalt mastic containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*, v. 23, p.3175–3181.
- Little DN.; RL Lytton; D. Williams e YR Kim (1999) An analysis of the mechanism of microdamage healing based on the applications of micromechanics first principles of fracture and healing. *Journal Association Asphalt Paving*. v.68 p.501–542
- Liu Q.; A.García; E. Schlangen e M. Van de Ven (2011) Induction heating of asphalt mastic and porous asphalt concrete. *Construction and Building*, v. 25, p. 3746 – 3752.
- Liu Q.; S. WU e. Schlangen (2013) Induction heating of asphalt mastic for crack control. *Construction and Building*, v. 41, p. 345 – 351.
- Mensch N. G. (2017) *Análise Viscoelástica De Misturas Asfálticas Quentes E Mornas*. Dissertação de mestrado. Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Norambuena – Contreras J. e A. García (2016) Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials and Design*, v. 106, p. 404 – 414.
- Norambuena – Contreras J.; R. Serpell.; G. V. Vidas; A. González e E. Schlangen (2016) Effect of fibers addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation. *Construction and Building*, v. 127, p. 369 – 382.
- Rudolf R.; P. Mitschang e M. Neitzel (2000) Induction heating of continuous carbon-fiber-reinforced thermoplastics. *Composites: Part A* 31, p. 1191 – 1202.
- Uchida K, T. Kurokawa, K. Himeno, T. Nishizawa (2002) Healing characteristics of asphalt mixture under high temperature conditions. *Proceedings of 9th international conference on asphalt pavements*
- White S.R., N.R. Sottos, P.H. Geubelle, J.S. Moore, M.R. Kessler e S.R. Sriram (2001) Autonomic healing of polymer composite, *Nature*, v. 409, p. 794-797.

Eduarda Fontoura (efontoura08@gmail.com)

Guilherme Ebani Jacques (guilherme.ebani@gmail.com)

Gracieli Bordim Colpo (gracieli.colpo@ufrgs.br)

Mônica Regina Garcez (monica.garcez@ufrgs.br)

Lélio Antônio Teixeira Brito (lelio.brito@ufrgs.br)

Laboratório de Pavimentação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Construção e Infraestrutura
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.