

Avaliação de cinzas de carvão mineral e cera de carnaúba como aditivos em ligantes asfálticos e a incorporação da cinza como fíler mineral em misturas asfálticas

Evaluation of coal ash and carnauba wax as additives in asphalt binders and the incorporation of ash as a mineral filler in asphalt mixtures

DOI:10.34117/bjdv8n4-107

Recebimento dos originais: 28/03/2022

Aceitação para publicação: 06/04/2022

Victor Cardoso Oliveira

Doutorando em Engenharia de Transportes

Instituição: Universidade Federal do Ceará

Endereço: Av. Mister Hull, s/n, - Pici, Fortaleza – CE, CEP 60455-760 – Brasil

E-mail: victoroliveira@det.ufc.br

Caio Cajazeiras Falcão

Doutorando em Engenharia Civil

Instituição: Iowa State University

Endereço: Bissell Rd, Ames, IA, 50011 – Estados Unidos da América

E-mail: falcao@iastate.edu

Juceline Batista dos Santos Bastos

Doutora em Engenharia de Transportes

Instituição: Universidade Federal do Ceará

Endereço: Avenida Treze de Maio, 2081 – Benfica, Fortaleza – CE, CEP 60040-215 – Brasil

E-mail: jucelinebatista@hotmail.com

Jorge Barbosa Soares

Ph.D. em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Ceará

Endereço: Av. Mister Hull, s/n, - Pici, Fortaleza – CE, CEP 60455-760 – Brasil

E-mail: jsoares@det.ufc.br

RESUMO

Em estudo anterior utilizando cinzas de carvão mineral em ligantes asfálticos observou-se uma indicação de melhora em relação a deformação permanente, porém o uso somente da cinza geraria maior gasto energético devido a elevação das Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC). O intuito deste trabalho foi avaliar o efeito da adição de cinza juntamente com a cera de carnaúba no ligante asfáltico visando reduzir a TUC; e também avaliar as propriedades volumétricas de misturas asfálticas utilizando o ligante modificado juntamente com a inserção das cinzas volantes (fly ash) no fíler de modo a atuarem como melhoradores da interação ligante/agregado. O uso do aditivo desenvolvido nesta pesquisa, a partir de cinza e cera, resultou em redução da TUC. Quando esse aditivo foi usando conjuntamente as cinzas volantes em substituição ao fíler na produção de misturas asfálticas, essas misturas indicaram redução no teor de ligante.

Palavras-chave: misturas asfálticas, cinzas volantes, ligantes modificados, cera de carnaúba.

ABSTRACT

In a previous study using coal ash in asphaltic binders, an indication of improvement with respect to rutting was observed, but the use of fly ash alone generates higher energy expenditure due to higher mixing and compaction temperatures (TUC). The aim of this work is to evaluate the effect of adding fly ash along with carnauba wax on the asphalt binder to reduce TUC; and also to evaluate the volumetric properties of asphalt mixtures using this modified binder with the insertion of fly ash into the filler such that both can enhance binder/aggregate adhesion.

The use of the additive developed in this research, from fly ash and wax, resulted in reduced TUC. When this additive was used together with ash to replace the filler in the production of asphalt mixtures, these mixtures indicated reduction in binder content.

Keywords: asphalt mix, fly ash, modified binder, carnauba wax.

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos gerados pelas indústrias preocupam a sociedade, tanto pelo impacto ambiental como pela escassez de recursos naturais. O aproveitamento de resíduos pode se tornar um negócio viável para o setor privado, beneficiando a sociedade e o meio ambiente. Os resíduos gerados pela produção de energia elétrica em usinas termelétricas, por exemplo, geram gastos com armazenagem e transporte, além do impacto causado pelo despejo no meio ambiente. Estes resíduos são gerados pela queima do carvão mineral e os mais destacados são as cinzas pesadas ou de fundo (*bottom ash*) e as cinzas leves ou volantes (*fly ash*) (Rohde *et al.*, 2006). O aproveitamento de resíduos em pavimentação, ao longo do tempo, vem sendo estudado por diversos pesquisadores (Androjić, Kaluđer e Komljen, 2008; Asmael, 2010; Xavier, 2016), com o objetivo de melhorar a interação ligante × agregado, causador de defeitos ao longo da vida do pavimento.

Segundo a *United States Environmental Protection Agency* – EPA (2005), as cinzas volantes podem ser utilizadas em revestimentos asfálticos como fíler mineral, possuindo a capacidade de aumentar a rigidez da mistura asfáltica e a resistência à deformação permanente. Além disso, grande parcela da superfície específica dos agregados minerais em misturas asfálticas é tomada pelo material de enchimento. Portanto, há uma interação interfacial entre o material de enchimento e o ligante, influenciando no comportamento do composto (Guo *et al.*, 2017). Por exemplo, pó de carvão e cinza foram utilizados como material de enchimento em misturas asfálticas e seus efeitos na resistência à fadiga foram comparados com misturas contendo cal, zeólita e cimento Portland. Essa substituição levou ao aumento da suscetibilidade à fadiga das misturas asfálticas usinadas à quente (Modarres *et al.*, 2015).

Juntamente com o material de enchimento, o ligante é um elemento crucial nas misturas asfálticas e a modificação deste com diversos aditivos tem se tornado uma alternativa na busca por melhores desempenhos. A introdução de ceras ao ligante asfáltico tem sido reportado como redutores das temperaturas de usinagem e compactação em torno de 20°C (Reyes-Ortiz *et al.*, 2013). Os resultados obtidos por Feitosa (2015) com parâmetros empíricos como índice de penetração e

ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos modificados com as ceras de carnaúba do tipo 1, 2, 3 e 4 sugerem um aumento na resistência à deformação permanente.

Dessa forma, justifica-se investigar a cera de carnaúba e as cinzas volantes como modificadores de ligantes asfálticos e a cinza volante como material de enchimento em substituição ao fíler natural. Para tanto, o objetivo geral deste artigo é avaliar o potencial do uso das cinzas volantes, oriundas da geração de energia na termoeétrica instalada no município de Pecém-CE, em misturas asfálticas. Os objetivos específicos são: (i) avaliar as propriedades empíricas dos ligantes investigados (penetração, ponto de amolecimento e índice de suscetibilidade térmica); (ii) analisar o comportamento reológico (viscoelasticidade linear) desses ligantes asfálticos; e (iii) comparar as propriedades volumétricas de misturas asfálticas dosadas com ligante modificado (cinza volante e cera de carnaúba) e substituindo o fíler mineral por cinza volante com a mistura de referência sem ligante modificado ou substituição do fíler por cinza.

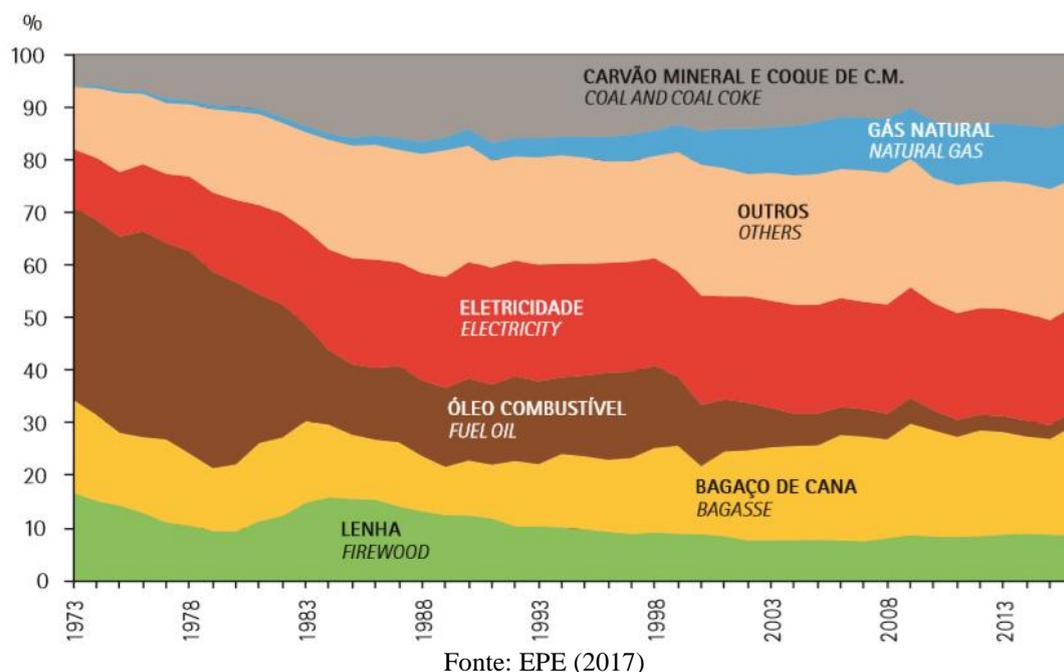
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a NBR 16586 (ABNT, 2017), as cinzas são resíduos não combustíveis remanescentes após a queima total da matéria orgânica do carvão e, como todo resíduo, necessitam de uma destinação ambiental adequada. Historicamente, no período pré-industrial, a lenha e o carvão vegetal eram as fontes de energia principais utilizadas pela humanidade. Com a revolução industrial, o carvão mineral passou a exercer papel preponderante na economia. Mais tarde, no final do século XIX, os derivados de petróleo começaram a substituir o carvão mineral (Costa e Prates, 2005). Porém, o interesse em utilizar carvão mineral reacendeu nas últimas décadas e, como pode ser visto na Figura 1, o consumo de carvão mineral passou a representar uma fração considerável para o setor industrial brasileiro.

O carvão mineral é constituído por duas partes, uma orgânica e outra mineral. Durante a queima a parte orgânica gera voláteis e coque, e a parte mineral se modifica e transforma-se em cinza. Segundo Silva *et al.* (1999), a combustão do carvão, em altas temperaturas, 1200 a 1400°C, com tempo de permanência das partículas em chama durante 2 segundos, é condição suficiente para a fusão total ou parcial da matéria mineral, gerando cinza pesada ou volante.

As usinas termoeétricas são as principais consumidoras de carvão mineral e, segundo Carvalho (2017), a queima é feita em caldeiras de carvão pulverizado. Neste tipo de caldeiras são instalados equipamentos de retenção, precipitadores eletrostáticos ou filtro de mangas para coleta das cinzas leves que são arrastadas pelos gases gerados pela combustão. As cinzas mais pesadas precipitam para o fundo da caldeira e são fundidas em partículas maiores (Fungaro e Silva, 2002).

Figura 1- Estrutura no consumo energético do Setor Industrial Brasileiro



Material de enchimento, ou fíler, segundo o DNIT (031, 2004 – ES) é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075 mm (Peneira #200). Motta e Leite (2000) usam a definição de pó para o material passante na peneira #200, para diferencia-lo da definição do DNIT, e a metodologia *Superpave*, concebida como produto do *SHRP–Strategic Highway Research Program* (1994), recomenda que a razão entre o teor de pó e o ligante asfáltico esteja entre 0,6 e 1,2. Para Bardini (2013), o fíler é um material de preenchimento, que reduz os vazios da mistura asfáltica, resultando em uma mistura mais densa, menos permeável e de textura mais fina, mas o excesso desse material pode reduzir a flexibilidade e a durabilidade da mistura. As partículas passantes na peneira #200 influenciam a densificação e a rigidez de uma mistura asfáltica. Dependendo das dimensões dessas partículas, elas podem preencher os vazios do esqueleto mineral, nas partículas maiores de 0,04 mm, ou podem ser incorporadas no ligante asfáltico (partículas de 0,02 mm a 0,005 mm) (AASHTO, 1991).

As cinzas volantes podem ser utilizadas como fíler em misturas asfálticas a quente, podendo ser economicamente viáveis, dependendo da distância de transporte, se comparadas a outros minerais (Xavier, 2016). Mesmo com as limitações do ensaio de resistência à tração (Kim e Wen, 2002), Asmael (2010) testou três fíleres (cinza volante, cimento Portland e sílica) em três percentuais 5,8%, 7,8% e 9,8% em relação ao peso do agregado à mistura asfáltica por meio desse ensaio. As misturas contendo cinzas volantes apresentaram menor resistência à tração se comparadas às outras misturas investigadas.

Ceras naturais, como a cera da cana de açúcar, introduzida por Muñoz (2010) na produção de misturas asfálticas mornas, com proporções entre 1-4% em massa do ligante, separadamente

para cada cera, causam a redução da temperatura de usinagem entre 5-9°C. Peña e Ospina (2012) adicionaram cera de carnaúba ao ligante asfáltico, nas proporções de 1-5% em massa do ligante, com o propósito de investigar o efeito e a dosagem ótima da cera. O resultado obtido mostrou que a porcentagem ótima para adição de cera foi de 5% em massa do ligante. Feitosa (2015) concluiu que a cera de carnaúba tipo 4, na proporção de 5% em massa, mostrou ser o aditivo que mais reduziu a viscosidade do ligante asfáltico, obtendo também os melhores resultados para as Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC) e menor suscetibilidade térmica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O ligante asfáltico de referência para o presente estudo foi fornecido pela refinaria Petrobras/Lubnor, com classificação 50/70. Os aditivos são constituídos além das cinzas volantes, de cera de carnaúba de classificação 4 (Feitosa, 2015). Foram realizadas duas modificações no ligante, utilizando as proporções 25% de cinza e 75% de cera; e 50% de cinza e 50% de cera em relação ao peso do ligante. O ligante modificado na proporção 50% de cinza e 50% de cera, não demonstrou absorção total da cinza, que ficou retida no fundo em quantidade inviável de quantificar, logo, descartado o seu uso. Assim, adotou-se a proporção 25% de cinza e 75% de cera em relação ao peso do ligante para produção do aditivo utilizado no CAP modificado.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MODIFICADORES DO LIGANTE ASFÁLTICO

As cinzas da pesquisa foram provenientes da Usina Termelétrica Energia Pecém, situada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), localizada no município de São Gonçalo do Amarante, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), a 50 km da capital cearense. A cinza volante foi coletada no ponto 10 (P10) do tanque de armazenamento.

O material foi caracterizado por meio do ensaio de fluorescência de raios-X (Tabela 1). Para tanto, foi utilizado o equipamento ZSXMini II fabricado pela Rigaku (Japão), disponível no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC). A excitação dos fótons ou transições atômicas é provocada por um espectro de banda de raios-X gerado por um tubo com alvo de Pd (chumbo), operado a uma tensão de 40 kV e 1,20 mA.

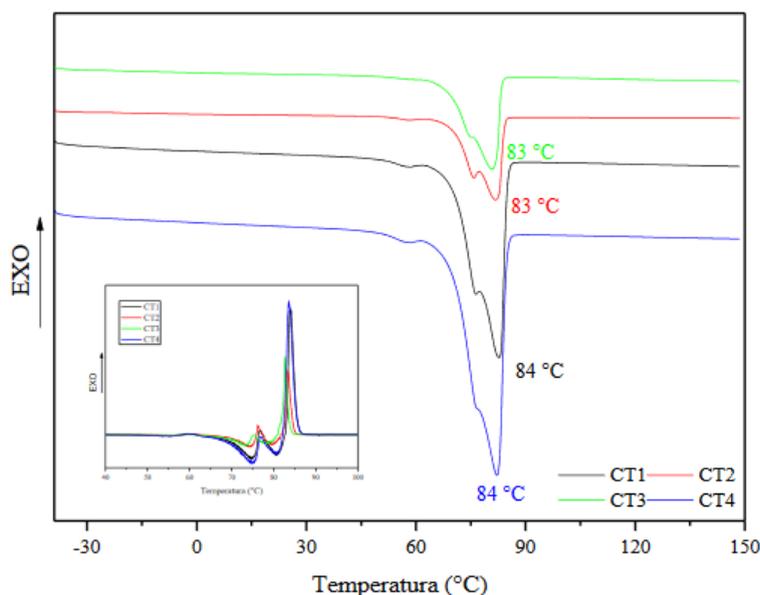
Tabela 1 – Caracterização raios-X da cinza

Componente	SiO ₂	F ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO ₂	KO	TiO ₂	Nb ₂ O ₅	AgO	ZrO	CdO	SrO
Quantidade (g)	83,29	84,64	49,88	14,45	7,35	4,40	0	0	0	0	0,96
Componente	ZnO	Y ₂ O ₃	Tc ₂ O ₇	SO ₃	MnO ₂	ZnO	NiO	As ₂ O ₃	Rb ₂ O	Cl	
Quantidade (g)	0,13	0	0	2,06	0,25	0,20	0,18	0,30	0,19	0,07	

A cera de carnaúba investigada é denominada de Cera de carnaúba Tipo 4 (CT4) - cera bruta de coloração castanho escura, verde escura e/ou escura tendendo a negro, vulgarmente denominada gorda escura ou gorda batida, contendo no máximo 2% de impurezas e até 2% de umidade (CEARÁ, 2002). A escolha da CT4 foi baseada no trabalho de Feitosa (2015) que concluiu que na proporção de 5% em massa é o aditivo que mais reduziu a viscosidade do ligante asfáltico, obtendo também os melhores resultados para a TUC, além de ser economicamente mais viável em comparação a outros tipos mais puros (Tipo 1 ao 3).

As curvas referentes à calorimetria exploratória diferencial (DSC) das ceras Tipo 1, 2, 3 e 4, assim como, sua 1ª derivada, podem ser vistas na Figura 2. As curvas DSC mostram eventos endotérmicos distintos para cada tipo de cera, relacionados ao ponto de fusão das amostras.

Figura 2 - Análise da temperatura de fusão da cera de carnaúba



Fonte: Feitosa (2015)

Para o preparo dos ligantes modificados foi utilizado um misturador IKA® modelo RW20 equipado com controle de temperatura, agitador mecânico de baixo cisalhamento e par de hélice. Foram utilizados como parâmetros para a agitação: temperatura de $120 \pm 5^\circ\text{C}$; velocidade de rotação de 600 RPM; e tempo de mistura de 1 hora.

A caracterização do desempenho dos ligantes asfálticos foi realizada com base nos ensaios das especificações brasileiras, para ligantes puros (ANP, 2005) e modificados (ANP, 2010), e norte-americana *Superpave*, conforme os ensaios listados a seguir: (i) Envelhecimento de curto prazo em estufa de filme fino rotativo - RTFOT (ASTM D2872, 2012); (ii) Penetração (PEN) a 25°C , 100 g, 5 s (ASTM D5, 2006); (iii) Ponto de amolecimento (PA) (ASTM D36, 2009); (iv) Viscosidade rotacional a 135, 150, 177°C (ASTM D4402, 2007); (v) Grau de desempenho (PG) (ASTM D6373, 2013); (vi) Fluência e relaxação sob carregamento em tensão múltipla - $MSCR$; J_{nr} (kPa^{-1}) e R (%)

(ASTM D7405, 2016) (Equações 1 e 2).

$$Jnr = \frac{\varepsilon_{10} - \varepsilon_0}{\tau} \quad (1)$$

$$R = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{10}}{\varepsilon_c - \varepsilon_0} \times 100 \quad (2)$$

Onde τ : tensão de cisalhamento [kN/m²]; ε_0 : deformação inicial do ciclo; ε_c : deformação máxima do ciclo; ε_{10} : deformação ao final do ciclo.

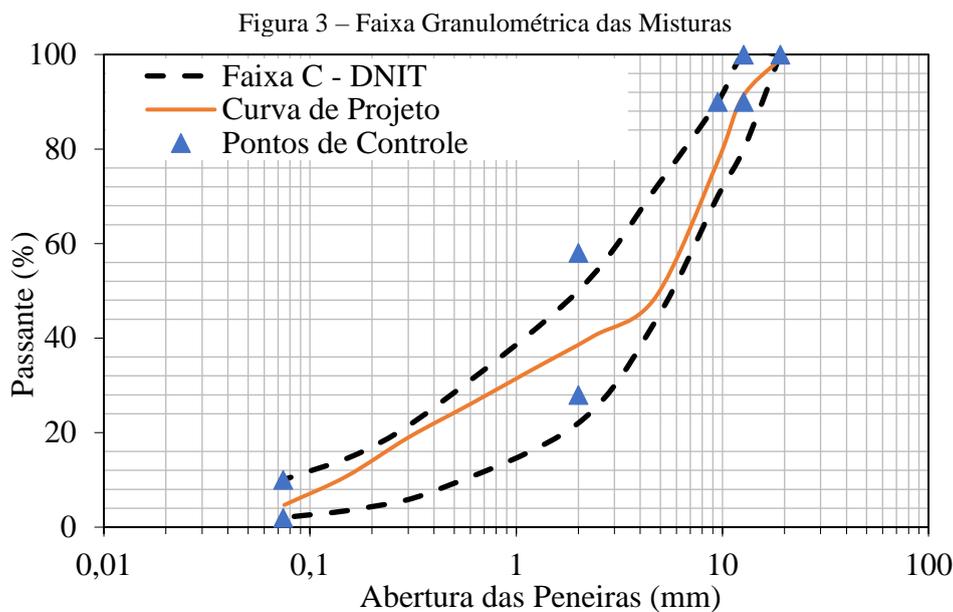
3.2. AGREGADOS E GRANULOMETRIA DA MISTURA ASFÁLTICA

Foram dosadas 03 misturas asfálticas pela metodologia *Superpave*: (01) mistura de controle, utilizando o pó de pedra como fíler e CAP 50/70 convencional; (02) mistura asfáltica contendo cinza volante (4,7%) em substituição total ao fíler mineral e CAP 50/70 convencional; e (03) mistura asfáltica contendo cinza volante (4,7%) em substituição total ao fíler mineral e CAP 50/70 modificado com cinza e cera.

O agregado mineral é oriundo da britagem de rocha granítica e foi fornecido pela empresa Insttale Engenharia. Foram realizados alguns ensaios de caracterização preconizados pelo DNIT e ASTM, como: (i) absorção e densidade do agregado graúdo (DNER-ME 081, 1998); (ii) absorção e densidade do agregado miúdo (ASTM C128, 2015) e (iii) densidade real do fíler (DNER-ME 084, 1994). A curva granulométrica (Figura 3) é composta por 45% de pó de pedra, e por agregados de 3/4" (10%) e 1/2" (45%) (Tabela 2).

Tabela 2 – Composição granulométrica da mistura

Abertura das peneiras		Brita 3/4"	Brita 1/2"	Pó de pedra	Curva
Pol.	Mm	Passante (%)	Passante (%)	Passante (%)	Passante (%)
1"	25	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19	90,3	100,0	100,0	99,0
1/2"	12,5	17,2	98,2	100,0	90,9
3/8"	9,5	3,3	71,2	100,0	77,4
#4	4,75	0,5	8,7	99,4	48,7
#8	2,36	0,5	1,7	87,9	40,4
#16	1,18	0,5	1,1	72,5	33,2
#30	0,6	0,4	1,0	56,8	26,0
#50	0,3	0,4	0,9	41,2	19,0
#100	0,15	0,3	0,8	23,0	10,7
#200	0,075	0,2	0,5	9,9	4,7



A curva granulométrica das 03 misturas obedece a Faixa C do DNIT e está dentro dos pontos de controle da metodologia *Superpave*. Fora substituído integralmente o material passante na peneira #200 por cinzas volantes para que a curva não fosse alterada nas misturas compostas por cinzas volantes substituindo o fíler mineral. Os resultados das densidades e absorção dos agregados e a cinza volante estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos agregados

Agregado	3/4"	1/2"	Pó de Pedra	Cinza Volante
Densidade Real	2,625	2,620	2,592	2,440
Densidade Aparente	2,584	2,540	—	—
Absorção	0,5%	0,7%	—	—

3.2.1. Cinzas Volantes (Fly Ash) da mistura asfáltica

As Cinzas Volantes utilizadas como substitutas ao fíler mineral têm a mesma origem da utilizada como aditivo no ligante asfáltico. Estas foram colocadas em estufa por 24 horas para redução de umidade e utilizou-se a fração passante na peneira #200 em substituição ao fíler mineral.

3.3. MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas analisadas foram dosadas seguindo a metodologia *Superpave*, portanto fazendo uso do Compactador Giratório (CGS). Para a preparação da mistura, o CAP 50/70 foi aquecido a 154°C e os agregados a 164°C, sendo estes misturados em seguida. A mistura permaneceu na estufa durante 2h na temperatura de 154°C, a fim de simular o envelhecimento que ocorre no processo de usinagem. Por fim, a mistura seguiu para o CGS para compactação a temperatura de 142°C. A Gmm foi calculada seguindo a ASTM 2041, 2000. Para a determinação

da densidade aparente das amostras (G_{mb}), utilizou-se a ASTM D 2726 (2000). Os valores de G_{mb} foram determinados com a compactação de 3 CPs. Com os valores de G_{mm} da mistura asfáltica e de G_{mb} de cada amostra compactada, obteve-se o volume de vazios (V_v) de cada CP, conforme a Equação 3.

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (3)$$

Em que G_{mm} : massa específica aparente [g/cm^3]; G_{mb} : massa específica máxima teórica [g/cm^3] e V_v : volume de vazios da mistura [%].

3.3.1 Mistura Asfáltica de Referência (MAR)

Foram moldados 18 CPs durante a dosagem da Mistura Asfáltica de Referência (MAR), alternando o percentual de CAP (4,0; 4,5; 4,7; 5,1; 5,5; 5,9), buscando atingir V_v de 4% ($\pm 0,4$), seguindo a metodologia *Superpave* e 100 giros no CGS. O teor de ligante encontrado foi de 4%. Após a determinação do teor de ligante para a MAR, fixou-se esse percentual para as misturas seguintes e alternou-se o número de giros para atingir o mesmo V_v .

3.3.2 Mistura Asfáltica com Cinza (MAC) e Mistura Asfáltica com Cinza e Ligante Modificado com Cinza e Cera (MCC)

Na segunda mistura foram utilizadas as cinzas volantes, secas em estufa e passante na peneira #200, em substituição a todo fíler, material passante na peneira #200 de origem mineral, cerca de 4,7%. Freitas (2015) e Xavier (2016) substituíram cerca de 4% do fíler natural por cinzas ou/e cal hidratada. A escolha de substituir 4,5% foi devido ao fato de que esse era o percentual de fíler (passante na #200) do pó de pedra da mistura. Optou-se então por substituir todo este material por cinza volante. O número de giros para atingir o V_v de 4% foi de 40.

Na terceira mistura utilizou-se além das cinzas volantes na composição do fíler (mistura MAC), o ligante modificado em 5% de sua massa total com cinza (25%) e cera de carnaúba (75%). Para atingir 4% de V_v foram necessários 70 giros no CGS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES

Os ensaios de *MSCR* foram analisados depois das amostras serem envelhecidas em estufa RTFOT. Esses ligantes foram avaliados ainda segundo o PG. Assim, os ligantes, puro e modificado, apresentaram *PG64*, sendo avaliados nesta temperatura no ensaio de *MSCR*. Nesse ensaio foram determinados os parâmetros de compliância não recuperável (J_{nr}) e de recuperação (R) a 100 e a 3200 Pa (Tabela 4), além dos níveis de tráfego os quais os ligantes asfálticos podem suportar

(AASHTO M332, 2014).

Tabela 4 – Reologia dos ligantes.

Ligantes	R ₁₀₀ (%)	R ₃₂₀₀ (%)	J _{nr100} (kPa ⁻¹)	J _{nr3200} (kPa ⁻¹)
Puro	14,0	1,0	3,971	5,363
Modificado	42,0	1,0	1,302	5,418

É possível observar que mesmo com a adição da cera, em que espera-se agir como redutor de temperatura de TUC, o parâmetro J_{nr} (3200 kPa⁻¹) quase não sofre alteração em relação ao ligante puro, embora ambos fiquem fora de especificação máxima (4,5) para indicá-los para um tráfego padrão segundo a classificação AASHTO M332, 2014. Apesar disso, o ligante modificado apresentou valor mais elevado (42%) de Recuperação (R) a 100 Pa. Percentuais de recuperação maiores podem ser traduzidos em uma capacidade maior do ligante em recuperar a deformação sofrida após a aplicação do carregamento, o que, na prática, se traduz em níveis mais baixos de deformação permanente (menor acúmulo de deformação plástica). De acordo com a Tabela 3, percebe-se que em condições mais severas de carregamento (R₃₂₀₀), as formulações sofrem perdas significativas em sua capacidade de recuperação da deformação total sofrida durante o ensaio.

4.1.2. Ligantes

O agente utilizado para modificação do ligante foi um aditivo com 1,25% de cinza e 3,75% de cera em massa do ligante. Os resultados dessa caracterização estão dispostos na Tabela 5. O CAP atende aos parâmetros estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2005). Os ligantes modificados apresentaram redução da TUC, além de redução da penetração e aumento do ponto de amolecimento.

Tabela 5 – Caracterização dos Ligantes Puro e Modificado.

Parâmetros	CAP Puro (50/70)	CAP Modificado	Limites (ANP)
Penetração - 25°C (d _{MM})	57,3	27	50 a 70
Ponto de Amolecimento (°C)	48	65,5	Min. 46
T. Usinagem (°C)	155,3	150,0	Máx. 177
T. Compactação (°C)	143,0	138,8	Máx. 177
Viscosidade Brookfield 135°C (P)	0,400	0,328	Min. 0,274
Índice de Susceptibilidade Térmica – IST	-1,4	0,3	-1,5 a +0,7

É possível observar uma redução na penetração do ligante asfáltico modificado em relação ao ligante puro. A redução da penetração expressa o aumento da rigidez, presumindo uma provável resistência a deformação permanente, assim como observado em trabalhos publicados com ligante asfáltico (penetração 50/70) modificado com cera sintética FT (Iwánski *et al.*, 2015). A viscosidade

Brookfield foi reduzida no CAP modificado devido ao ensaio ser realizado a temperatura acima da temperatura de fusão da cera (84°C), deixando o ligante modificado menos viscoso em relação ao puro e contribuindo para a redução da TUC. O IST do ligante modificado se tornou menos sensível à temperatura em relação ao puro.

4.2. MISTURAS ASFÁLTICAS

Os resultados dos procedimentos realizados pela metodologia *Superpave* estão dispostos na Tabela 6. Para efeito de comparação fixou-se o teor de CAP em 4% para as 3 misturas asfálticas.

Tabela 6 – Parâmetros e Resultados de Dosagem das misturas

Misturas Asfálticas	CAP (%)	V _v (%)	G _{mm}	G _{mb}	Nº Giros
MAR	4,0	4,0(±0,4)	2,490	2,401	100
MAC			2,470	2,399	40
MCC			2,503	2,403	70

A MAR com relação a MAC teve uma redução na sua massa específica. Este fato pode ser explicado pela incorporação das cinzas volantes como fíler, material mais leve que o fíler mineral. Como o teor de ligante fora fixado em 4%, o número de giros do MAC foi menor que a MAR indicando que, caso seja utilizado o mesmo número de giros para ambas as compactações, a MAC teria um teor de ligante menor, portanto um menor custo, caso fosse utilizado a cinza volante substituindo o fíler mineral. A mistura com ligante modificado MCC teve um aumento em sua massa específica claramente influenciado em relação ao aditivo de cera incorporado no ligante e teve uma compactação intermediária em relação as outras duas misturas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo avaliou o efeito da adição de cinza juntamente com a cera de carnaúba no ligante asfáltico visando reduzir a TUC e também avaliou o comportamento das propriedades volumétricas de misturas asfálticas utilizando o ligante modificado juntamente com a inserção das cinzas volantes no fíler. Assim, o aditivo desenvolvido nesta pesquisa, a base de cera de carnaúba combinado com as cinzas volantes, reduziu a temperatura de usinagem (5,3°C) e compactação (4,2°C) em relação ao ligante puro, viabilizando o uso da cinza e dando finalidade a um rejeito industrial, além de reduzir o gasto energético. Destaca-se ainda a maior capacidade do ligante modificado em recuperar a deformação sofrida após a aplicação do carregamento sob baixos níveis de tensão. Para as misturas asfálticas MAC e MCC, a inclusão da cinza fez com que demandassem percentuais de ligantes inferiores a 4%, caso a dosagem fosse realizada com 100 giros no compactador *Superpave*. Como sugestão de pesquisas futuras, indica-se a realização de ensaios mecânicos para avaliação dos materiais estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão das bolsas de Iniciação Científica, à Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste (Lubnor) pelo ligante fornecido, à Insttale Engenharia pelos agregados disponibilizados, agradecem também pelo apoio técnico do laboratorista Rômulo Jácome e à todos os colaboradores do Laboratório de Mecânica Pavimentos da UFC onde fora desenvolvido o trabalho.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (1991). Handbook of hot-mix asphalt paving. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO M 332 (2014). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test.
- ABNT NBR 16586/2017. Esta Norma estabelece um método de ensaio para determinar o teor de cinzas em carvão mineral.
- ASTM C128 (2015). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. West Conshohocken.
- ASTM D 5 (2006). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, EUA.
- ASTM D 36 (2009). Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), EUA.
- ASTM D 2041 (2000). standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures. USA.
- ASTM D 2726 (2000). standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures. USA, 2000.
- ASTM D2872 (2004). Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). EUA.
- ASTM D 4402 (2007). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, EUA.
- ASTM D 6373 (1999). Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 7405 (2010). Standard test method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. American Society for Testing and Materials.
- Androjić, I.; Kaluđer, G.; Komljen, M (2008). Usage of the fly ash in hot asphalt mixes, Croácia, [s. n.].
- ANP (2005). Resolução ANP N° 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005. Regulamento Técnico N° 3/2005. Agência Nacional do Petróleo.
- ANP (2010). Resolução ANP N° 32, de 21.9.2010 DOU 22.9.2010. Regulamento Técnico N° 4/2010. Agência Nacional do Petróleo.
- Asmael, N. M. (2010) Effect of mineral filler type and content on properties of asphalt concrete mixes. *Journal of Engineering*, v. 16, n. 3, sep.
- Bardini, V. S. S. (2013) Influência do fíler mineral em propriedades de misturas asfálticas densas. 2013. 344 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

Carvalho, W. C. (2017) Gerenciamento sustentável das cinzas da combustão de carvão mineral: um estudo de caso de uma termoeletrica em São Luís – MA. Dissertação (Mestrado pelo programa de pós-graduação em Energia e Ambiente/ccet). Universidade Federal do Maranhão. São Luís.

CEARÁ. (2002) Instrução normativa nº 10, de 11 de Dezembro de 2002. Dispõe sobre a norma específica das características mínimas de identidade e qualidade para a classificação da cera de carnaúba. Diário Oficial do Estado do Ceará (DOECE), CEARÁ, 16 de Dezembro de 2002.

Costa, R. C; Prates, C. P. T. (2005) O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 21, p. 5-30, mar.

DNER (1998) – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 81 Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, RJ.

DNER (1995) – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 84 Agregados miúdo - determinação da densidade real. Rio de Janeiro, RJ.

DNIT (2004) – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2004 – ES: pavimentação: concreto asfáltico. Rio de Janeiro.

EPE (2017) – Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL). Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016/Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: <<http://epe.gov.br>>. Acesso em: 30 mar, 2018.

Feitosa, J. P. M. (2015) Avaliação do uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivo para misturas mornas. Tese (Doutorado pelo programa de Pós-graduação em química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Freitas, F. N. R. (20015) Avaliação da relação entre a resistência ao dano por umidade induzida e a permeabilidade de misturas asfálticas contendo cinza volante como fíler. Monografia de Graduação, Fortaleza. 2015.

Fungaro, A. F.; Silva, M. G. (2002) Utilização de Zeólitas Preparada a partir de Cinza Residual de Carvão como Adsorvedor de Metais em Água. Química Nova, São Paulo, v25, n. 6B, p.1081-1085.

Guo, M.; Tan, Y.; Hou, Y.; Wang, L.; Wang, Y. (2017) Improvement of evaluation indicator of interfacial interaction between asphalt binder and mineral fillers. Construction and Building Materials, vol. 151, pp. 236-245.

Iwánski, M.; Chomicz-Kowalska, A.; Maciejewski, K. (2015) Application of synthetic wax for improvement of foamed bitumen Parameters. Construction and Building Materials 83, 62–69.

Kim, Y. R.; H. Wen. (2002) Fracture energy from indirect tension testing. Proceedings of the AAPT. 18p.

Modarres, A.; Rahmanzadeh, M.; Ayar, P. (2015) Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. Journal of

Cleaner Production, vol. 91, pp. 262-268.

Motta, L.M.G., Leite, L. F. M. (2000) 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, 19-23. Novembro.

Muñoz, V. N. (2010) Estudio de aditivos naturales para la reducción de las temperaturas de fabricación y colocación de las mezclas en caliente. Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción. VIII Conf. Científica de la construcción. Habana.

Peña, C. M. U.; Ospina, A. M. R. (2012) Comportamiento de Mezclas asfálticas fabricadas con adición de ceras naturales. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil Presencial. Bogotá.

Reyes-Ortiz, O. J.; Pumarejo, L. G. F.; Torres-Moreno, O. H. (2013) Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas com asfaltos modificados com ceras. Ingeniería y desarrollo. Universidad del Norte.

Rohde, G. M.; Zwonok, O.; Chies, F.; Silva, N. I. W. (2006) Cinzas de carvão fóssil no Brasil— Aspectos técnicos e ambientais, Porto Alegre: CIENTEC.

Silva, N. I. W.; Calarge, L. M; Chies, F.; Mallman, J. E.; Zwonok, O. (1999) Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. São Paulo.

EPA (2005) – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Using coal ash in highway constructions: a guide to benefits and impacts.

Xavier, M. F. (2016) Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.