

Propriedades mecânicas de concretos asfálticos dosados com rejeitos do beneficiamento magnético a seco do minério de ferro

Thiago Delgado de Souza¹, Ben-Hur de Albuquerque e Silva²,
Antonio Carlos Rodrigues Guimarães³, Andressa Rosa Mesquita⁴

¹Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, engthiagodelgado@gmail.com

²Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, benhur@ime.eb.br

³Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, guimaraes@ime.eb.br

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, dessamesquitatp@hotmail.com

Recebido:

22 de fevereiro de 2019

Aceito para publicação:

19 de novembro de 2019

Publicado:

30 de abril de 2020

Editor de área:

Kamilla Vasconcelos

Palavras-chaves:

Misturas asfálticas,
Agregados alternativos,
Rejeitos de minério de ferro.

Keywords:

Asphalt mixtures,
Alternative aggregates,
Iron ore tailings.

DOI:10.14295/transportes.v28i1.1964



RESUMO

Este estudo avalia o comportamento mecânico de três misturas asfálticas, uma de referência e duas com substituição dos agregados naturais por rejeitos finos de minério de ferro. Os rejeitos são provenientes de uma inovadora tecnologia de obtenção, a separação magnética a seco. A metodologia consistiu de um programa experimental dividido em quatro etapas: (i) determinação das características físicas, mineralógicas e ambientais dos agregados; (ii) obtenção as propriedades reológicas e empíricas do cimento asfáltico de petróleo; (iii) dosagem dos materiais de revestimento asfáltico pela metodologia Superpave; (iv) realização de ensaios de dano por umidade induzida, resistência à tração por compressão diametral, fadiga à tensão controlada, módulo de resiliência e uniaxial de cargas repetidas nas misturas asfálticas. Os concretos asfálticos que continham agregados alternativos apresentaram propriedades de rigidez e fadiga similares à mistura de referência. Entretanto, com a utilização de rejeitos de minério de ferro houve maior susceptibilidade ao acúmulo de deformações permanentes.

ABSTRACT

This research investigated the mechanical behavior of three hot mix asphalts, one of reference and two with substitution of natural aggregates by fine iron ore tailings. The tailings are obtained from an innovative technology, the dry magnetic separation. The methodology consisted of an experimental program, divided in four steps: (i) establishing the physical, mineralogical and environmental characteristics of the aggregates; (ii) determining the rheological and empirical properties of the asphalt binder; (iii) Superpave volumetric mix designing of the asphaltic coating materials; (iv) evaluating asphalt mixtures water sensitivity, indirect tensile strength, indirect tensile fatigue, indirect tensile modulus and uniaxial cyclic compression. Asphalt concretes containing alternative aggregates presented similar stiffness and fatigue properties as the reference mixture. However, with iron ore tailings utilization there was an increase of rutting susceptibility.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da mineração brasileira exerce efetiva participação no mercado internacional, por isso é de extrema importância para o desenvolvimento do país. No ano de 2016 o Brasil produzia 12,85% do minério de ferro mundial e o estado de Minas Gerais era responsável por 68,4% desse montante, sendo considerado o maior produtor. No Centro-Sul do referido estado encontra-se a região do Quadrilátero Ferrífero, que com uma extensão de cerca de sete mil quilômetros quadrados, concentrava a maior parte da produção do minério de ferro brasileiro (DNPM, 2016).

Entretanto, a lavra e o beneficiamento do minério de ferro geram resíduos, que no ramo da mineração são conhecidos como rejeitos. Segundo Costa et al. (2014) esses materiais correspondem a cerca de 40% do total que é extraído das minas e podem se tornar passivos ambientais na medida em que contaminam o solo e assoreiam os cursos de água. A disposição dos rejeitos de minérios ocorre principalmente sobre a forma de barragens, cujas construções e monitoramentos geram altos custos para as empresas. Além disso, quando mal projetadas ou executadas essas obras são susceptíveis a proporcionar desastres, como os que ocorreram nas barragens de Fundão e do Feijão, nos anos de 2015 e 2019, respectivamente.

A empresa NEW STEEL S.A. criou o método *Fines Dry Magnetic Separation* (FDMS), traduzido como separação magnética a seco de finos, para utilizar no processamento de minérios. O processo consiste em separar fisicamente partículas finas e ultrafinas com baixo teor de ferro e sem valor comercial dos elementos com alto teor de ferro através de um moinho vertical magnético. Ao contrário do método tradicional de flotação não há a necessidade de utilizar água no beneficiamento, evitando o consumo de cerca de 1000 litros de água a cada tonelada de minério de ferro produzida.

Além disso, com a técnica de flotação é necessário esperar que as partículas decantem. Por isso, esse processo de beneficiamento exige mais tempo do que o FDMS. A separação magnética proporciona agilidade na caracterização e na aplicação dos materiais em processos construtivos. Ainda, com o uso do método tradicional são geradas partículas com maiores teores de ferro. Mais detalhes sobre o processo de beneficiamento magnético a seco podem ser encontrados no trabalho de Xiong et al. (2015).

A presente pesquisa propõe analisar a viabilidade técnica do uso de dois tipos de rejeitos de minério de ferro beneficiados pelo processo FDMS em obras de pavimentação. Esses materiais são oriundos da região do Quadrilátero Ferrífero. Dentre os estudos desenvolvidos para utilização de rejeitos de minério de ferro em pavimentos destacam-se três vertentes. Composições de materiais para base e sub-base, como nas pesquisas de Osinubi et al. (2015), Etim et al. (2017) e Ojuri et al. (2017). Os autores elaboraram misturas de rejeitos de minério de ferro com solos, cal e cimento, demonstrando que é possível produzir materiais com características técnicas adequadas à aplicação em camadas estruturais de pavimentos flexíveis.

Em outra linha de estudo Ravi Kumar et al. (2012), Costa et al. (2014) e Silva et al. (2015) apresentaram a utilização de rejeitos de minério de ferro como agregados em elementos pré-fabricados de concreto para pavimentos intertravados. Os blocos intertravados apresentaram capacidade para suportar tensões compatíveis com a pavimentação de vias de volume de tráfego não elevado.

Em uma terceira abordagem Velasquez et al. (2009), Silva et al. (2013), Valadares e Guimarães (2017), Wang et al. (2016), Silva (2017), Apaza et al. (2018) e Pinto Netto e Guimarães (2018) estudaram revestimentos asfálticos com a utilização de rejeitos de minério de ferro. Os referidos autores pesquisaram concretos asfálticos, areia-asfalto, lama asfáltica e micro revestimento asfáltico. Com teores de até 20% de substituição de agregados naturais por rejeitos de minério de ferro produziram-se materiais com comportamento mecânico satisfatório.

Entretanto, não foram encontrados registros de estudos com rejeitos de minério de ferro obtidos pela tecnologia FDMS na literatura. Portanto, o objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico de três misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico, sendo uma de referência e duas com inserção de rejeitos obtidos magneticamente a seco, para compor camadas de revestimento de pavimentos flexíveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é experimental, realizada em laboratório. Os materiais utilizados foram agregados de rocha calcária: brita 3/4", brita 1/2" e pó de pedra, provenientes da pedreira Borges, região de Pedro Leopoldo. Também foi utilizada areia média lavada da cidade de Cachoeira da Prata. Ambas as jazidas são localizadas no estado de Minas Gerais. Além disso, foram usados dois agregados artificiais oriundos da região do Quadrilátero Ferrífero. Esses materiais foram obtidos pelo processo FDMS, realizado pela empresa New Steel S.A. Para facilitar as suas identificações estes foram denominados de rejeito fino (RF) e rejeito mais fino (RMF). Como ligante utilizou-se o cimento asfáltico de petróleo (CAP) do tipo 30/45, proveniente da refinaria Gabriel Passos (REGAP).

Após a aquisição dos materiais foi realizada a caracterização dos agregados através dos ensaios de granulometria, massa específica, absorção, abrasão Los Angeles, equivalente de areia, adesividade, durabilidade, vazios não compactados e *Aggregate Image Measurement System 2* (AIMS 2). Os rejeitos de minério de ferro também tiveram sua mineralogia e composição química avaliada por espectrômetro de energia dispersiva (EDS) e fluorescência de raios-x (XRF). Além disso, realizaram-se ensaios de lixiviação e solubilização para verificar como os rejeitos são ambientalmente classificados.

Posteriormente procedeu-se a caracterização do CAP. Foram realizados ensaios de penetração, ductilidade, viscosidade rotacional, ponto de fulgor, massa específica, ponto de amolecimento, solubilidade em tricloroetileno e teste na estufa de filme fino rotativo. O comportamento reológico do ligante asfáltico foi avaliado por meio do grau de desempenho (PG), *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) e *Linear Amplitude Sweep* (LAS).

Em seguida realizou-se a dosagem de três misturas asfálticas pela metodologia Superpave. As misturas foram denominadas de M1, M2 e M3. A Tabela 1 apresenta a composição dos concretos asfálticos.

Tabela 1 – Composição das misturas asfálticas

Material	M1	M2	M3
Brita 3/4"	16,30%	14,40%	13,40%
Brita 1/2"	25,90%	28,80%	32,60%
RF	-	26,90%	26,90%
Areia	26,90%	-	-
Pó de pedra	26,90%	26,00%	16,30%
RMF	-	-	6,70%
CAP 30/45	4,00%	3,90%	4,10%

Tabela 2 – Características dos ensaios mecânicos e CPs

Ensaio	Nº de CPs por mistura	Temperatura (°C)	Frequência	Volume de vazios (%)	Altura (mm)	Norma utilizada
DUI	6	25	-	7.0 ± 0.5	64.0 ± 1.0	DNIT 180
RT	3	25	-	4.0 ± 0.5	64.0 ± 1.0	DNIT 136
MR	3	25	1	4.0 ± 0.5	64.0 ± 1.0	DNIT 135
Fadiga	15	25	1	4.0 ± 0.5	64.0 ± 1.0	DNIT 183
UCR	3	60	1	7.0 ± 0.5	150.0 ± 2.5	DNIT 184

Com os teores de projeto das misturas asfálticas definidos foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral (RT), dano por umidade induzida (DUI), módulo de resiliência (MR), fadiga por compressão diametral à tensão controlada

e uniaxial de cargas repetidas (UCR), para obtenção do parâmetro *flow number* (FN). A Tabela 2 exibe as principais características dos ensaios mecânicos e dos seus respectivos corpos de prova (CPs).

3. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E DO CAP

Neste item apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados e do ligante asfáltico.

3.1. Agregados

A granulometria dos agregados é descrita na Tabela 3. Observou-se que o RF possui uma granulometria similar à de uma areia grossa, enquanto o RMF é um material bem mais fino, que possui 28,1% passante na peneira n.º 200.

Tabela 3 – Granulometria dos agregados

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem passante (%)					
		Brita 3/4"	Brita 1/2"	RF	Areia	Pó de pedra	RMF
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	98,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	39,3	75,3	98,1	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	9,8	62,9	97,1	99,0	100,0	100,0
n.º 4	4,8	3,5	7,8	92,9	97,1	99,4	100,0
n.º 8	2,36	2,2	3,0	81,8	88,7	72,1	100,0
n.º 16	1,18	1,5	1,8	48,3	60,1	50,7	100,0
n.º 30	0,6	1,1	1,5	25,7	40,7	38,4	98,8
n.º 50	0,3	0,7	1,3	12,4	23,3	31,6	92,8
n.º 100	0,15	0,3	0,9	4,7	10,2	24,1	70,1
n.º 200	0,075	0,0	0,1	1,5	5,9	13,2	28,1

A granulometria dos rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero comumente é fina ou muito fina, como reportado por Silva et al. (2013), Silva (2017) e Pinto Netto e Guimarães (2018), a porcentagem passante na peneira n.º 200 variou de 10% a 85%.

Os resultados dos ensaios de massa específica, absorção, abrasão Los Angeles, equivalente de areia, vazios não compactados, adesividade e durabilidade são descritos na Tabela 4. Os critérios utilizados para avaliação dos agregados foram as normas DNIT 031 (2006) e AASHTO M323 (2017).

Tabela 4 – Resultados de caracterização dos agregados

Propriedade	Brita 3/4"	Brita 1/2"	Pó de pedra	Areia	RF	RMF	Critério
Massa específica real (g/cm ³)	2,754	2,740	2,729	2,610	2,674	2,693	-
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,728	2,719	-	-	-	-	-
Absorção (%)	0,48	0,35	-	-	-	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	31	40	-	-	-	-	máx. 50%
Equivalente de areia (%)	-	-	76	86	81	-	mín. 55%
Vazios não compactados (%)	-	-	45,2	48,4	45,5	-	mín. 45%
Adesividade	Satisfatório	-	-	-	-	-	-
Durabilidade (%)	1,89	2,37	-	-	-	-	máx. 12%

Silva et al. (2013), Wang et al. (2016), Silva (2017) e Pinto Netto e Guimarães (2018) apresentaram valores de massa específica de rejeitos de minério de ferro de 2,806 g/cm³ a 4,084

g/cm^3 . Percebe-se uma elevada variação da massa específica em função dos minerais constituintes da amostra e de seus processos de obtenção. O valor de massa específica deste estudo foi menor que os da literatura pesquisada. Tal fato pode ser atribuído ao processo FDMS, pois quando comparado a outros processamentos de minérios este propicia um menor teor de ferro e maiores teores de sílica e outros minerais.

Para se determinar a forma 2D, angularidade, textura, esfericidade e as partículas achatadas e alongadas (F&E) dos agregados utilizou-se o equipamento AIMS 2. As porcentagens de partículas achatadas e alongadas das britas enquadraram-se na norma AASHTO M323 (2017), na qual o limite de aceitação é de até 10% na proporção 5:1. Os valores estatísticos das análises do AIMS 2 permitiram realizar a classificação da forma 2D, angularidade, textura e esfericidade dos agregados de acordo com a proposta de Ibiapina et al. (2018). Quanto à forma 2D e angularidade os agregados foram classificados como semicirculares e subarredondados, respectivamente. A brita 3/4" foi o único agregado que apresentou textura lisa enquanto os demais, polida. Na propriedade esfericidade as britas apontaram classificação baixa enquanto os outros agregados, moderada. O RMF não teve a sua textura e esfericidade avaliadas devido à sua granulometria. Na pesquisa de Pinto Netto e Guimarães (2018) os rejeitos de flotação do minério de ferro apresentaram forma 2D semicircular a semialongada e angularidade subarredondada.

Para avaliar os espectros mineralógicos das amostras de rejeitos de minério de ferro utilizou-se o EDS. Na amostra de RF identificou-se a presença dos seguintes minerais: sílica (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe). Na amostra de RMF constatou-se também a presença de manganês (Mn). No ensaio de XRF observou-se maior presença de ferro no material mais fino. Os rejeitos estudados são materiais com composição predominante de analitos de dióxido de silício (SiO_2 — cerca de 68%), ferro (Fe — em torno de 19%) e óxido de alumínio (Al_2O_3 — próximo de 2%). Velasquez et al. (2009) pesquisaram rejeitos conhecidos como taconitas e indicaram um resultado similar (66% de dióxido de silício e 23% de ferro).

Nas análises de lixiviação e solubilização a quantidade de impurezas orgânicas no material não foi significativa, por isso foram ensaiados os teores de constituintes inorgânicos em extratos lixiviados e solubilizados. Os constituintes analisados enquadraram-se nos limites recomendados pela norma ABNT NBR 10004 (2004), portanto os rejeitos foram classificados como não perigosos e inertes (classe IIB). Pinto Netto e Guimarães (2018) também realizaram os ensaios de lixiviação e solubilização em rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero e encontraram classificação classe IIB.

3.2. Ligante asfáltico

A Tabela 5 apresenta os resultados de caracterização do CAP 30/45 e os critérios estabelecidos pela norma DNIT 095 (2006).

Com os resultados do ensaio de viscosidade rotacional obteve-se a curva de viscosidade versus temperatura do ligante asfáltico, na qual a faixa de temperatura do CAP para a usinagem situou-se entre 160 °C e 165 °C e para compactação entre 149 °C e 154 °C, com viscosidades de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e $0,28 \pm 0,03$ Pa.s, respectivamente.

Quanto à classificação PG, o ensaio MSCR e os parâmetros reológicos do ligante asfáltico, foram obtidos os resultados expressos na Tabela 6. Esses ensaios foram realizados e avaliados conforme as normas ASTM D6373 (2016) e AASHTO M322 (2014).

Tabela 5 – Resultados de caracterização do CAP 30/45

Propriedade	Resultado	Critério
Amostra virgem		
Penetração – 100 g, 5 s, 25 °C (0,1 mm)	38	30 a 45
Ponto de amolecimento (°C)	58	mín. 52
Viscosidade rotacional (cP)	a 135°C, SP 21, 20 rpm	645
	a 150°C, SP 21, 50 rpm	269
	a 177°C, SP 21, 100 rpm	88
Índice de susceptibilidade térmica	-0,011	entre -1,5 e 0,7
Ponto de fulgor (°C)	319	mín. 235
Solubilidade em tricloroetileno (%)	99,8	mín. 99,5
Ductilidade a 25 °C (cm)	> 100	mín. 60
Massa específica a 25 °C (g/cm ³)	1,012	-
Após RTFOT a 163°C, 85 minutos		
Variação em massa (%)	0,41%	máx. 0,5
Ductilidade a 25 °C (cm)	> 100	mín. 10
Aumento do ponto de amolecimento (°C)	2	máx. 8
Penetração retida (%)	73,7	mín. 60

Tabela 6 – Reologia e classificação PG do CAP 30/45

Propriedade/ensaio	Unidade	Medida	Critério
Amostra virgem			
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, (G*/sen(δ))	kPa	1,28 (70 °C)	mín. 1,00
		0,60 (76 °C)	
Após a RTFO a 163°C, 85 min			
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, (G*/sen(δ))	kPa	2,30 (70 °C)	mín. 2,20
		1,05 (76 °C)	
MSCR a 64°C – Jnr	kPa ⁻¹	1,8436	S [2,0 < Jnr 3,2 < 4,5]
MSCR a 70°C – Jnr	kPa ⁻¹	4,5692	H [1,0 < Jnr 3,2 < 2,0] V [0,5 < Jnr 3,2 < 1,0] E [0,0 < Jnr 3,2 < 0,5]
Após o PAV a 100°C, 20 horas			
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, (G*.sen(δ))	kPa	3914 (28 °C)	máx. 5000
		6327 (25 °C)	
Fluência em viga (BBR), 60 s	°C	-6	-
S - módulo de rigidez	MPa	174	máx. 300
m - coef. de relaxação	-	0,307	mín. 0,3
Classificação PG			64H-16

No MSCR o ligante apresentou comportamento adequado para volumes de tráfego médios a pesados, da ordem de $1,0 \cdot 10^7$ a $3,0 \cdot 10^7$ número de solicitações do eixo padrão de 80 kN, representado pela letra H, do inglês *heavy*, conforme especifica a norma AASHTO M322 (2014). Em pesquisas com o CAP 30/45 da refinaria REDUC Osmari et al. (2017) encontraram um grau de desempenho de 70S-22, Fengler et al. (2019) 70S-16 e Aragão et al. (2016) 70S-16. O CAP utilizado neste estudo teve grau de desempenho 64H-16, mostrando-se mais vulnerável aos danos causados pela variação térmica, porém menos suscetível às deformações permanentes.

Após o ensaio de LAS modelaram-se a curva de integridade versus dano e a curva de fadiga do ligante asfáltico. Também foi calculado o parâmetro fator de fadiga do ligante (FFL), de acordo com a metodologia descrita em Hintz e Bahia (2013). O FFL encontrado foi de 1,372, portanto o CAP foi classificado como de comportamento médio-forte quanto à fadiga. Utilizando o mesmo protocolo de ensaio e o mesmo tipo de CAP Fengler et al. (2019) encontraram um FFL de 1,242.

4. DOSAGEM SUPERPAVE

Em posse da granulometria enquadraram-se as composições de agregados simultaneamente na especificação Superpave e na faixa C do DNIT, por tentativas. As matrizes de agregados foram dosadas para que apresentassem curvas granulométricas bem próximas, considerando a individualidade dos materiais e a aderência às faixas granulométricas. A análise de variância indicou que as composições de agregados poderiam ser consideradas estatisticamente iguais, pois a um nível de significância de 0,05 a distribuição de Fischer-Snedecor (F) calculada (0,007) foi menor que a crítica (3,316). Na Tabela 7 apresentam-se as distribuições granulométricas das matrizes de agregados e na Figura 1 as suas curvas granulométricas.

Tabela 7 – Porcentagem passante das matrizes de agregados por peneira

Peneira	Tamanho (mm)	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)
1"	25,4	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	99,7	99,7	99,7
1/2"	12,7	83,0	83,0	83,0
3/8"	9,50	74,4	74,5	73,9
nº 4	4,75	57,7	55,7	53,1
nº 8	2,36	46,2	43,6	43,5
nº 16	1,18	31,8	28,0	30,0
nº 30	0,60	22,7	18,2	21,3
nº 50	0,30	15,8	12,5	15,9
nº 100	0,15	9,9	8,1	10,7
nº 200	0,075	5,4	4,0	4,7

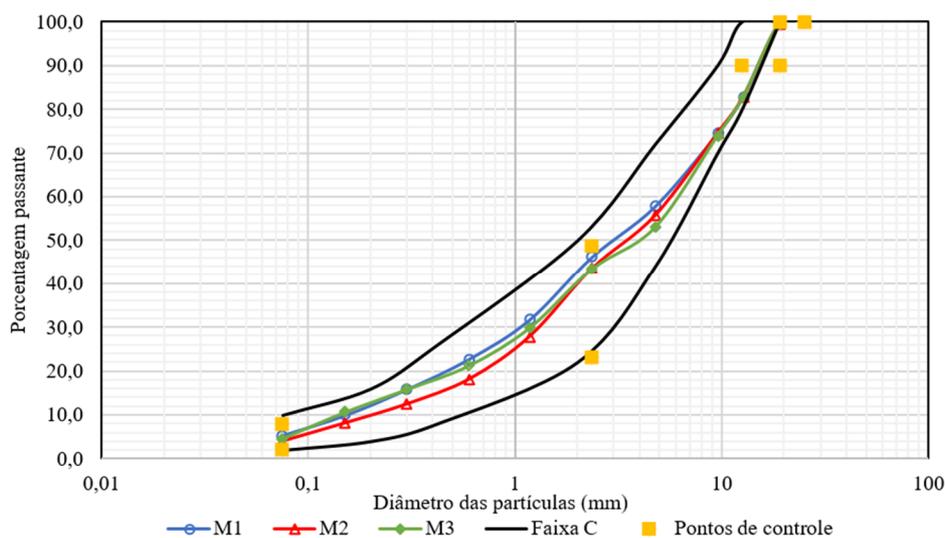


Figura 1. Curvas das matrizes de agregados em função do diâmetro das partículas

As composições descritas na Figura 1 possibilitaram definir o tamanho máximo nominal (TMN) das três misturas, que foi de 19,0 mm. De acordo com a metodologia Superpave a malha imediatamente superior à primeira peneira que retém mais de 10% da matriz de agregados corresponde ao seu TMN.

Na fase de preparação das misturas asfálticas os agregados foram pesados de acordo com a quantidade de massa asfáltica a ser produzida, aquecidos em uma estufa a 172 °C e o CAP a 162 °C. As misturas asfálticas foram pesadas em recipientes metálicos e passaram pelo período de condicionamento de curto prazo de 2 horas em estufa a 152 °C, antes da compactação. Cabe

mencionar que essas temperaturas foram definidas com base na curva de viscosidade versus temperatura do CAP.

Na fase de compactação foi utilizado um compactador giratório Superpave (CGS) eletropneumático. O número de giros de projeto foi definido como 100, baseado em um volume de tráfego comercial pesado, segundo a norma DNIT 178 (2018). Para corpos de prova (CPs) com volume de vazios superiores aos de projeto alterou-se a energia de compactação modificando o controle do CGS para massa específica e altura, caso dos ensaios de DUI e UCR.

Para as três composições de agregados obtiveram-se teores iniciais de ligante de 4,5%. Com o objetivo de definir o teor de ligante ótimo prepararam-se concretos asfálticos com teores de 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%. Para encontrar o teor de ligante de projeto (TP) as misturas em estado solto com as porcentagens de ligante supramencionadas tiveram suas densidades máximas (Gmm) medidas conforme as diretrizes da norma ASTM D2041 (2011).

Para a definição do TP fixou-se o volume de vazios em 4,00% conforme recomendação da metodologia Superpave (Hossain et al., 2016). As misturas asfálticas de projeto ficaram com os vazios nos agregados minerais (VAM), relações betume vazios (RBV) e proporções pó asfalto (P/A) descritas na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros volumétricos das misturas

Material	M1	M2	M3	Critério
VAM	13,7	13,5	14,1	mín. 13%
RBV	69,9	68,7	69,4	entre 65% e 75%
P/A	1,2	0,9	1,1	entre 0,6 e 1,2

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

A Tabela 9 apresenta os valores médios dos resultados de DUI, RT, MR e FN. Os ensaios tiveram coeficiente de variação (CV) máximo admissível de 20%.

Tabela 9 – Resultados por mistura e coeficientes de variação (CV)

Mistura	DUI (%)	RT média (MPa)	MR médio (MPa)	FN médio (ciclo)	CV RT (%)	CV MR (%)	CV FN (%)
M1	72,4	1,84	11349	569	6,13	3,10	9,50
M2	76,9	2,13	12935	318	1,28	6,00	11,80
M3	71,4	2,06	12269	105	2,87	4,20	15,60

No ensaio de DUI a M2 apresentou resultados superiores aos das demais misturas, assim como no ensaio de RT. O VAM da M2 é menor que os das outras misturas, justificando o melhor comportamento à ação deletéria da água. Todas as misturas apresentaram valores de DUI superiores a 70%.

Ao comparar o DUI das misturas elaboradas com os de outros estudos realizados com o mesmo tipo de ligante asfáltico, Nogueira (2008), Cavalcanti (2010), Budny (2012), Barros (2017) e Fengler (2018) reportaram valores de 88,9%, 60,0%, 39,2%, 89,0% e 52,9%, respectivamente. Percebe-se que os valores de DUI da literatura diferem bastante. Tal fato está atrelado à variação da origem dos agregados, pois seus distintos processos de formação geram potenciais elétricos nas partículas mais ou menos adesivos ao CAP. Algo relevante para tentar melhorar o DUI das misturas elaboradas é o estudo da incorporação de agentes melhoradores de adesividade como cimento Portland, dopes ou cal hidratada.

No ensaio de RT as misturas com a presença de rejeitos de minério de ferro foram mais resistentes às que continham apenas agregados naturais. Ao serem comparadas com a M1, as misturas M2 e M3 apresentaram 15,8% e 12,0% de ganho de RT, respectivamente. A proporção P/A da M2 foi a menor entre as misturas, explicando sua maior RT. Comparou-se o RT das misturas desta pesquisa com outros estudos realizados com o mesmo tipo de ligante asfáltico, à mesma temperatura de ensaio. Nogueira (2008), Freitas e Motta (2008), Budny (2012), Aragão et al. (2016) e Barros (2017) reportaram valores de 2,25 MPa, 1,68 MPa, 2,00 MPa, 2,27 MPa e 2,11 MPa, respectivamente.

No ensaio de MR as misturas que continham rejeitos de minério de ferro, M2 e M3, apresentaram resultados superiores. Tais misturas também possuíam menores proporções P/A e maiores RT, esclarecendo as magnitudes de rigidezes obtidas. Quando comparadas à M1, as misturas M2 e M3 reportaram 14,0% e 8,1% de ganho de MR, respectivamente.

O MR varia conforme a litologia e a granulometria dos agregados, o tipo e o teor de ligante asfáltico, bem como pelo processo de dosagem adotado. Para verificar a magnitude dos MR de misturas com o mesmo tipo de ligante asfáltico, à mesma frequência e temperatura de ensaio, foram buscadas outras referências na literatura. Nogueira (2008), Freitas e Motta (2008), Budny (2012), Aragão et al. (2016), Barros (2017) e Fengler (2018) reportaram valores de 6572 MPa, 7082 MPa, 13320 MPa, 12487 MPa, 10441 MPa e 14917 MPa, respectivamente. Observou-se que os valores de MR para misturas asfálticas com o CAP 30/45 tiveram uma tendência de crescimento nos últimos anos, pois em 2008 pesquisadores reportaram valores em torno de 7000 MPa. Em pesquisas mais recentes os valores superaram 10000 MPa. As misturas do presente estudo tiveram MR próximo de 12000 MPa. Esse aumento se justifica, em parte, pela adoção do envelhecimento de curto prazo e compactação por amassamento no CGS.

Quanto ao ensaio UCR as misturas asfálticas com maiores quantidades de rejeitos apresentaram menores valores de FN. A M1 não continha rejeitos, a M2 possuía 26,9% de rejeitos e a M3 33,6% de rejeitos. Os analitos de ferro e óxido de alumínio formaram matrizes de agregados finos (MAFs) com composições bem diferentes da mistura de referência. Geralmente o dano em materiais asfálticos inicia-se na região da zona coesiva, em que se situam as MAFs e o mástique. Acredita-se que a 60° C a M2 e a M3 apresentaram regiões de zona coesiva mais frágeis, denotando em evoluções mais rápidas das deformações plásticas e menores FN.

No entanto, sabe-se que os materiais asfálticos apresentam comportamento viscoelástico, dependente do tempo de aplicação da carga e da temperatura. Para uma interpretação mais apropriada de como seria a rigidez destas misturas asfálticas em diferentes temperaturas sugere-se que sejam realizados ensaios de módulo dinâmico, tanto nas MAFs, quanto nas misturas completas. Análises mais apuradas sobre a influência do uso de rejeitos nas deformações plásticas dos materiais asfálticos podem ser obtidas aliando o resultado das curvas mestras com as deformações obtidas em ensaios triaxiais de varredura de tensões. Técnicas de processamento digital de imagens que considerem a morfologia dos agregados como dado de entrada também podem auxiliar na identificação deste comportamento atípico dos rejeitos.

Porém, conforme os critérios de Bastos et al. (2017) os valores encontrados para as misturas M1 e M2 podem ser considerados satisfatórios para vias de tráfego pesado (FN médio maior ou igual a 300), com número N entre $1,0 \cdot 10^7$ e $3,0 \cdot 10^7$. Já a mistura M3 só atenderia a um tráfego médio, com N de magnitude inferior a $1,0 \cdot 10^7$. Compararam-se os FN médios obtidos com os de outras misturas asfálticas elaboradas com o CAP 30/45, à mesma temperatura de ensaio. Cavalcanti (2010), Budny (2012), Aragão et al. (2016), Barros (2017) e Fengler (2018) reportaram

valores de 136, 647, 340, 207 e 187, respectivamente. Nota-se que o valor de FN da mistura M2 é compatível com o de misturas constituídas apenas de agregados convencionais. A mistura M1 apresentou bom comportamento quando comparada às outras pesquisas. Já a mistura M3 demonstrou baixo valor de FN.

Para verificar se as propriedades mecânicas poderiam ser consideradas estatisticamente iguais realizou-se a análise de variância baseada na distribuição de Fischer-Snedecor (F), a um nível de significância de 0,05, conforme a Tabela 10. O DUI foi a única propriedade mecânica considerada estatisticamente igual para as três misturas asfálticas.

Tabela 10 – Análise de variância

Propriedade mecânica	F calculado	F crítico	Estatisticamente iguais?
RT	12,57	5,14	Não
DUI	2,46	3,68	Sim
MR	5,70	5,14	Não
FN	105,2	5,14	Não

O ensaio de fadiga foi realizado com níveis de tensões de 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 40% da RT média. O critério de parada do ensaio foi a ruptura completa dos CPs. As curvas de vida de fadiga foram expressas em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$), conforme a Figura 2.

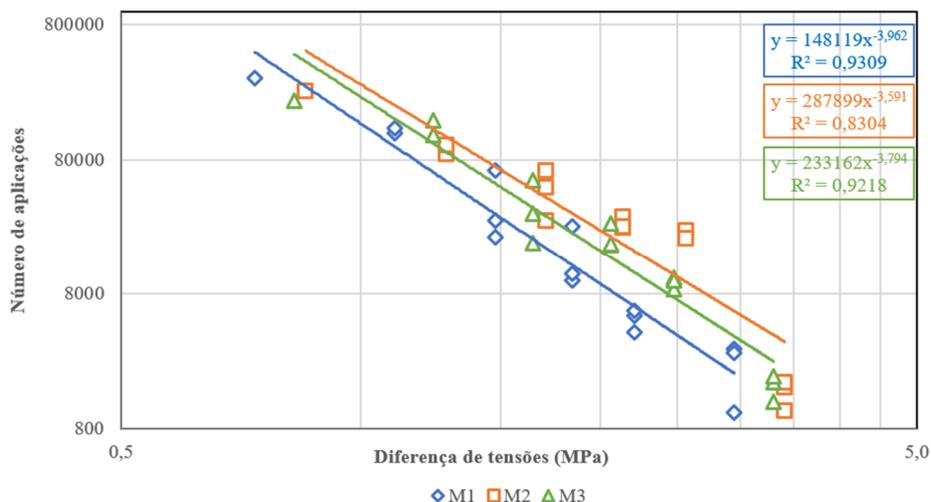
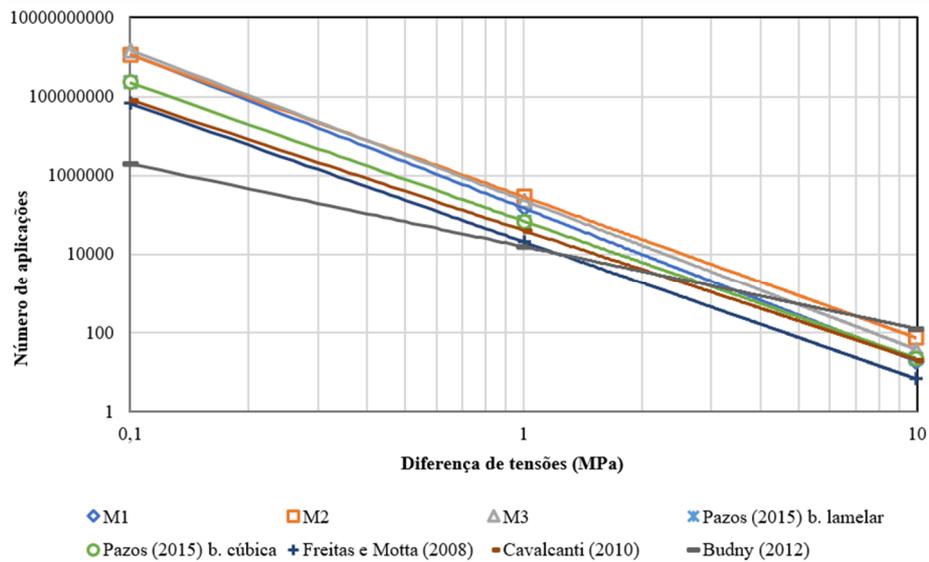


Figura 2. Número de aplicações versus diferença de tensões

Não é trivial analisar os resultados de vida de fadiga somente pelas expressões numéricas. Porém, como a magnitude dos MR das misturas foi relativamente próxima pode-se afirmar que a mistura M2 foi a que apresentou melhor comportamento à fadiga, seguida da M3 e da M1. As misturas com menores proporções P/A foram as que tiveram melhor comportamento à fadiga. Nos ensaios de RT e MR houve a mesma tendência de comportamento mecânico, ou seja, as três propriedades mecânicas estão diretamente correlacionadas.

A vida de fadiga das misturas desta pesquisa foi comparada com a de outros estudos realizados com o mesmo tipo de ligante asfáltico, à mesma temperatura de ensaio, conforme a Figura 3. Nota-se que os modelos de potência de misturas com o CAP 30/45 possuem inclinações similares.



6. CONCLUSÕES

O artigo investigou o comportamento mecânico de concretos asfálticos com rejeitos de minério de ferro, obtidos pela tecnologia FDMS. As misturas asfálticas estudadas apresentaram propriedades de rigidez e fadiga similares às do concreto asfáltico de referência. Entretanto, foram identificadas diferenças significativas na susceptibilidade ao acúmulo de deformações permanentes. Tal fato pode ser atribuído às diferentes composições das matrizes de agregados finos, pois o dano em materiais asfálticos tende a se iniciar na região da zona coesiva. Acredita-se que em temperaturas mais elevadas as misturas com rejeito possuíam regiões de zona coesiva mais frágeis e, conseqüentemente, evoluções mais rápidas das deformações plásticas.

Apesar do comportamento atípico quanto às deformações permanentes, é possível utilizar estes materiais em camadas de rolamento de pavimentos flexíveis, pois as misturas asfálticas atendem aos requisitos ambientais e técnicos vigentes. Porém, deve-se observar cuidadosamente quais são as características climáticas e o volume de tráfego da região em que serão utilizados. Muitas toneladas de rejeitos podem deixar de ser dispostas em barragens ou pilhas, representando uma solução sustentável, de ganho mútuo para a sociedade e para a engenharia de pavimentos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem à VIA040, à NEW STEEL S.A e ao LabGeo da COPPE/UFRJ.

REFERÊNCIAS

- AASHTO M322 (2014) *Standard specification for performance-graded asphalt binder using multiple stress creep and recovery (MSCR) test*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO M323 (2017) *Specification for Superpave volumetric mix design*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ABNT NBR 10004 (2004) *Resíduos sólidos – classificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Apaza, F. R. A.; Guimarães, A. C. R.; Sousa, M. A. S. e Castro, C. D. (2018) Estudo sobre a utilização de resíduo de minério de ferro em micro revestimento asfáltico. *Transportes*, v.26, n.2, p. 118-138. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1254.
- Aragão, F. T. S.; Pazos, A. R. G.; Motta, L. M. G.; Kim, Y. e Nascimento, L. A. H. (2016) Effects of morphological characteristics of aggregate particles on the mechanical behavior of bituminous paving mixtures. *Construction and Building Materials*, n. 123, p. 444-453. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.013.

- ASTM D2041 (2011) *Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D6373 (2016) *Standard specification for performance graded asphalt binder*. American Society for Testing and Materials.
- Barros, L. M. (2017) *Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de flow number de misturas quentes e mornas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Bastos, J. B. S.; Soares, J. B. e Nascimento, L. A. H. (2017) Critério para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. *Transportes*, v. 25 n. 2, p. 25-40. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1284.
- Budny, J. (2012) *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Costa, A. V.; Gumieri, A. G. e Brandão, P. R. G. (2014) Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 7, p. 228-259. DOI: 10.1590/S1983-41952014000200004.
- Cavalcanti, L. S. (2010) *Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- DNIT 031 - ES (2006) *Pavimentação Asfáltica – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT 095 - EM (2006) *Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT 135 - ME (2018) *Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT 136 - ME (2018) *Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT 178 - PRO (2018) *Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall- Procedimento*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT 180 - ME (2018) *Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT 183 - ME (2018) *Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT 184 - 2018 (2018) *Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNPM (2016) *Sumário Mineral*. Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília.
- Etim R. K.; Eberemu, A. O. e Osinubi, K. J. (2017) Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture. *Transportation Geotechnics*, v. 10, p. 85-95. DOI: 10.1016/j.trgeo.2017.01.002.
- Freitas, H. B. e Motta, L. M. G. (2008) Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. *Transportes*, v. 16, n. 2, p. 5-12. DOI: 10.14295/transportes.v16i2.22.
- Hintz, C. e Bahia, H. U. (2013) Simplification of linear amplitude sweep test and specification parameter. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2370, p. 10-16. DOI: 10.3141/2370-02.
- Hossain, M.; Fager, P. E. e Maag, R. G. (2016) *Superpave Volumetric Mixture Design and Analysis Handbook*. Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Fengler, R. Z. (2018) *Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de Trinidad lake asphalt*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Fengler, R. Z.; Osmari, P. H.; Leite, L. F. M.; Nascimento, L. A. H.; Fritzen, M. A. e Aragão, F. T. S. (2019) Impact of the addition of Trinidad Lake Asphalt (TLA) on the rheological and mechanical behavior of two asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, v. 20, p. S827-S840. DOI: 10.1080/14680629.2019.1633789.
- Ibiapina, D. S.; Castelo Branco, V. T. F.; Diógenes, L. M.; Motta, L. M. G. e Freitas, S. M. (2018) Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens a partir de materiais oriundos do Brasil. *Transportes*, v. 26, n. 4, p. 116-128. DOI: 10.14295/transportes.v26i4.1510.
- Nogueira, M. G. (2008) *Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para revestimentos de pavimentos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), POLI/USP, São Paulo.
- Ojuri, O. O.; Adavi, A. A. e Oluwatuyi, O. E (2017) Geotechnical and environmental evaluation of lime-cement stabilized soil-mine tailing mixtures for highway construction. *Transportation Geotechnics*, v. 10, pg. 1-12. DOI: 10.1016/j.trgeo.2016.10.001.
- Osinubi, K. J.; Yohanna, P. e Eberemu, A. O. (2015) Cement modification of tropical black clay using iron ore tailings as admixture. *Transportation Geotechnics*, v. 5, p. 35-49. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.10.001.
- Osmari, P. H.; Aragão, F. T. S.; Leite, L. F. M.; Simão, R. A.; Motta, L. M. G. e Kim, Y. (2017) Chemical, Microstructural, and Rheological Characterizations of Binders to Evaluate Aging and Rejuvenation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2632, p. 14-24. DOI: 10.3141/2632-02.

- Pinto Netto, Q. M. e Guimarães, A. C. R. (2018) Caracterização laboratorial de resíduos de mineração como agregado alternativo para misturas asfálticas. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.9, n.5, p. 88-98. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0009.
- Ravi Kumar, C. M.; Kumar, A.; Prashanth, M. H. e Venkat, R. (2012) Experimental studies on iron-ore tailing based interlocking paver blocks. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, v. 5, n. 3, p. 501-504.
- Silva, F. L.; Araújo, F. G. S.; Castro, C. G. e Kruger, F. L. V. (2015) Results of the leaching, water absorption and mold release for concrete blocks with the addition of the concentration tailings of iron ore. *Materials Science Forum (Online)*, v. 820, p. 549-552. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF820.549.
- Silva, R. G. O e Fernandes, G. (2013) Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com escória de acia-ria e resíduos industriais de minério de ferro. *Revista Pavimentação*, v. VIII, p. 44-52.
- Silva, R. G. O. (2017) *Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero*. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Valadares, R. G. e Guimarães, A. C. R. (2017) Comportamento mecânico de areia-asfalto contendo resíduo: uma alternativa para pavimentos de baixo volume de tráfego. *Anais do XIX Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto*.
- Velasquez, R.; Turos, M.; Moon, K. H.; Zanko, L. e Marasteanu, M. (2009) Using recycled taconite as alternative aggregate in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 3070-3078. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.04.003.
- Wang, Z.; Xu, C.; Wang, S.; Gao, J. e Ai, T. (2016) Utilization of magnetite tailings as aggregates in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 392-399. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.139.
- Xiong, D.; Lu, L. e Holmes, R. J. (2015) Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation. *Iron Ore - Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, p. 283-307. DOI: 10.1016/B978-1-78242-156-6.00009-5.