

USO DE MISTURA SOLO-ESCÓRIA DE FERRO SILÍCIO-MANGANÊS EM CAMADA DE SUB-BASE RODOVIÁRIA

Filipe Batista Ribeiro¹; Marcelino Aurélio Vieira da Silva²; Filipe Almeida Corrêa do Nascimento³; Antônio Carlos Rodrigues Guimarães⁴

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Bloco H, sala 111 Cidade Universitária, CEP 21.949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

email: filiperibeiro@pet.coppe.ufrj.br, <http://www.pet.coppe.ufrj.br/>

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Bloco H, sala 111 Cidade Universitária, CEP 21.949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

email: aurelio@pet.coppe.ufrj.br, <http://www.pet.coppe.ufrj.br/>

³Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Bloco H, sala 111 Cidade Universitária, CEP 21.949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

email: filipeacn@pet.coppe.ufrj.br, <http://www.pet.coppe.ufrj.br/>

⁴ Instituto Militar de Engenharia, Departamento de Engenharia de Construção e Fortificação, Praça General Tibúrcio, 80 – Urca CEP 22.290-270 Rio de Janeiro - RJ, Brasil

email: guimaraes@ime.eb.br <http://transportes.ime.eb.br/>

Sumário

Com o intuito de mitigar os impactos gerados pelos resíduos da indústria siderúrgica, este trabalho apresenta os resultados dos estudos sobre o uso da mistura de solo e escória de ferro silício-manganês em camada de sub-base de pavimento flexível rodoviário. Inicialmente, os materiais foram caracterizados e, posteriormente foram confeccionados corpos-de-prova do solo, e da mistura de solo-escória. Isto objetivando determinar o Módulo de Resiliência e, assim, dimensionar as espessuras das camadas de pavimento. Finalmente, concluiu-se que a mistura de solo e escória de ferro de silício-manganês apresenta propriedades geotécnicas compatíveis com as estabelecidas para uso em sub-base de pavimentos flexíveis.

.Palavras-chave: escória de ferro silício-manganês; sub-base; pavimento; mistura solo-agregado.

1 INTRODUÇÃO

Entre os quinze objetivos estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) para promoção do desenvolvimento sustentável no mundo, tem-se o critério para assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, alinhado com a construção de infraestruturas resilientes a fim de promover a industrialização inclusiva e sustentável através da inovação [1]. Com isso em vista, estudos têm sido realizados para promover a integração entre o crescimento dos grandes centros e seus dispositivos, como a infraestrutura de transporte, e o meio ambiente. É possível então citar o trabalho em [2], com suas análises de custo-benefício apresentadas para as opções de mitigação das ilhas de calor urbanas, incluindo telhados verdes e frios e pavimentos frescos.

Com isto em vista, as indústrias siderúrgica e da construção têm direcionado significativos esforços para a mitigação dos impactos causados pela geração de resíduos, através de aplicações técnica, econômica e ambientalmente viáveis e adequadas [3]. No mundo, institutos como Euroslag [4, Nippon Slag Association [5], Australasian [6] e National Slag [7] visam prover soluções nas áreas de geotecnia, pavimentação e estruturas.

Dentre as possíveis soluções para mitigar os problemas causados pelos resíduos gerados da indústria, pode-se evidenciar a aplicação destes em estruturas de pavimento rodoviário. Em [8], trata do emprego de cinzas volantes

em mistura de macadame cimentado para base e sub-base. Como conclusão, os estudos mostram a viabilidade do uso do resíduo para pavimentação.

A escória siderúrgica é considerada como o segundo melhor resíduo para construção de pavimentos rodoviários, do ponto de vista técnico, e se apresenta como quinto ou sexto material da perspectiva ambiental e econômica [3]. No Brasil, por exemplo, o uso desse material já se mostra consolidado pelas normas nacionais de materiais para pavimentação. Algumas delas são a DNIT 114/09, DNIT 115/09, DNIT 206/17 e DNIT 207/17 as quais tratam de uso de escória em camadas de base e sub-base.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O desafio de muitas empresas nos últimos anos trata dos esforços para tornar insumos que anteriormente eram vistos como subprodutos – materiais de valor que são produzidos como resíduo ou incidente do processo de produção – em coprodutos, ou seja, recursos caracterizados como mercadorias secundárias desejáveis que são geradas durante o processo de fabricação e podem ser vendidas ou reutilizadas de forma lucrativa [9].

Estudos como os desenvolvidos em [10] e [11] mostram que o país tem se dedicado a utilizar a escória de ferro silício-manganês em estruturas de engenharia como rodovias e ferrovias. Em [10], o autor trata em seu trabalho sobre caracterização mecânica de misturas asfálticas utilizando como agregado a escória de ferroliga de manganês, da região de Simões Filho – BA. Já em [11], em sua pesquisa sobre a caracterização da escória de ferro silício-manganês para aplicação como agregado em pavimentação ferroviária, o autor demonstrou que a escória de ferro silício-manganês é um bom substituto dos materiais rochosos utilizados para lastro ferroviário.

O tema de uso de escória em pavimento tem sido amplamente estudado durante os anos pelo mundo. No intuito de perceber o avanço do assunto, utilizou-se os termos “pavement” e “slag” na base de dados na plataforma Scopus. O resultado pode ser visto pela quantidade crescente de publicações técnicas realizadas, conforme Figura 1.

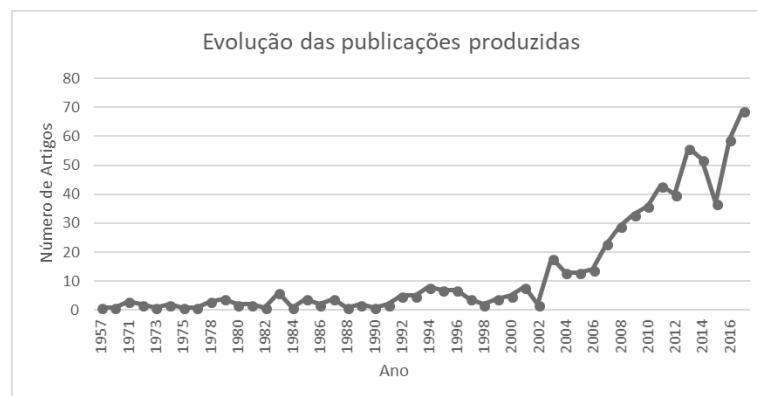


Fig.1. Número de artigos com os termos “pavement” e “slag” a partir da base de dados SCOPUS (2018)

Já sobre o uso de resíduos em camadas de pavimento rodoviário, diversos estudos demonstram a viabilidade dessa medida como sustentável e solução ambientalmente adequada para a destinação final de diversos coprodutos. No Brasil, o uso de mistura de resíduos com solo ou agregado tem sido estudado pelas principais instituições do país. Em [12], analisando o comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária, afirma que essa mistura atende aos parâmetros técnicos para uso em pavimentação. Em [13], apresenta uma alternativa para a utilização dos resíduos das minerações de quartzito em sub-bases ou bases de pavimentos flexíveis, demonstrando em seu estudo que os valores encontrados indicam um bom comportamento quanto à resistência e à deformabilidade. Em [14], o autor analisou o uso de resíduo da fabricação de papel na construção rodoviária, através de estudos físicos, mecânicos e ambientais da mistura solo-cal-resíduo, obtendo uma solução viável para aplicação do material em rodovia. Em [15], analisando o emprego de escória de ferroníquel em pavimento rodoviário, o autor obteve excelentes resultados para mistura solo e escória de ferroníquel, com expansão nula e valor de módulo resiliente até 600 MPa. Em [16], o autor utilizou cinza de casca de arroz, substituindo parte do cimento, para estabilização granulométrica e química. O resultado do desempenho das misturas mostrou-se satisfatório.

Também, deve-se ter especial atenção quanto à expansão da escória de ferro silício-manganês. Um dos principais problemas encontrados na aplicação de escória em estrutura de pavimento reside na expansão do agregado, gerado pela hidratação da cal presente no resíduo [24]. Diante disso, em [10], que também utiliza a escória de ferro silício-manganês, através do ensaio PTM 130/78 (*Pensylvania Test Method*), foi verificado que a expansão do material pode ser considerada como 0%, conforme apresentado na Figura 5.

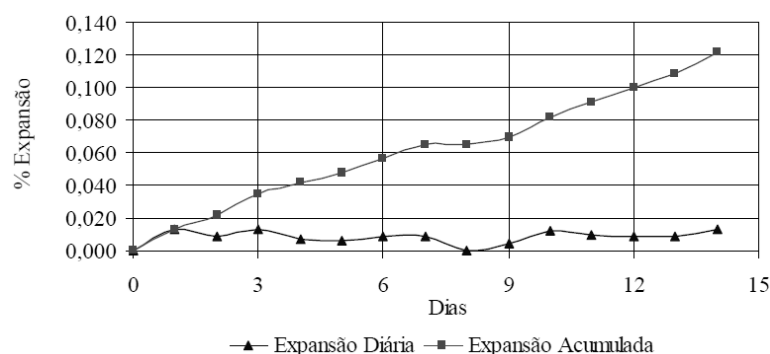


Fig.2. Expansão através do ensaio PTM 130/78 [10]

Após o conhecimento gerado por diversos autores anteriores, este estudo visa analisar a viabilidade técnica de uso da mistura solo-agregado, da escória de ferro silício-manganês, em camada de sub-base de pavimento flexível rodoviário.

3 METODOLOGIA

Sobre os materiais objeto deste estudo, a escória de ferro silício-manganês é produzida na região da cidade de Barbacena- MG - Brasil, cidade localizada próxima ao quadrilátero ferrífero mineiro. Sendo gerada durante o processo de produção da ferroliga nos fornos elétricos a arco submerso (EAF). Trata-se do resíduo de uma ferroliga, ou seja, um insumo essencial utilizado na indústria siderúrgica, tanto nos processos básicos como na refinada agregação de propriedades e valor aos aços especiais [11]. As ferroligas são ligas de ferro com outros metais, nos quais o teor do metal é maior que o teor de ferro, cujo objetivo é conferir determinadas propriedades ao aço. Quanto ao solo, trata-se de uma areia argilosa de cor avermelhada, obtida no Km 602 da rodovia BR-040, no estado de Minas Gerais.

Vale ressaltar que, neste estudo, a escória de ferro silício-manganês, devido à granulometria de suas partículas, será denominada como agregado na mistura com solo. Isto porque, economicamente, o diâmetro maior dos grãos caracteriza um menor custo com a britagem, sendo mais interessante para viabilizar o emprego do material.

Inicialmente, os materiais foram avaliados separadamente, conforme os ensaios definidos em normas brasileiras. Para a escória de ferro silício-manganês (FeSiMn), foram empregados os procedimentos destinados ao estudo dos agregados, considerando tanto as propriedades físicas quanto mecânicas. A seguir, o solo foi avaliado com intuito de obter a classificação HRB (*Highway Research Board*) / SUCS (*Unified Soil Classification System*) e, complementarmente, a classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Posteriormente, procedeu-se à análise do comportamento e desempenho mecânico da mistura solo-agregado.

Para validação do emprego da escória de FeSiMn em estruturas rodoviárias como agregado, foram realizados experimentos tais como: análise granulométrica (DNER-ME 083/98), determinação da absorção e da densidade aparente de agregado graúdo (DNER-ME 081/98), determinação da abrasão “Los Angeles” (DNER-ME 035/98) e determinação de perda ao choque no aparelho Treton (DNER-ME 399/99), cujos procedimentos foram realizados no Laboratório de Solos do Instituto Militar de Engenharia (IME).

Além disso, foram executados ensaios complementares. O primeiro deles trata da microscopia eletrônica por varredura (MEV), realizado no Laboratório de Materiais do IME. Neste teste, que permite a análise da microestrutura da partícula, foram geradas imagens com aumento de até 8000 vezes. Os resultados desse ensaio permitem analisar a forma e dimensão dos grãos, assim como a disposição dos mesmos na superfície da amostra,

possibilitando também uma percepção melhor dos vazios presentes no material e da topografia de sua superfície. Outro ensaio é o *Aggregate Imaging System* (AIMS), executado nas dependências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE). O Sistema de análise de agregados por imagens digitalizadas (AIMS) foi desenvolvido para capturar imagens e analisar a forma de uma ampla gama de tipos e tamanhos de agregados, a fim de analisar seu uso em misturas de asfalto, concreto cimento hidráulico e camadas de pavimentos [17]. Este sistema é utilizado para analisar a forma, textura e angularidade de agregados, sendo a nova metodologia para a classificação de agregados baseada na distribuição das características de forma.

Já para os solos, os ensaios foram os referentes à granulometria (DNER-ME 051/94), limites de Atterberg (DNER-ME 082/94 – Plasticidade e DNER-ME 122/94 - Liquidez) e equivalente de areia (DNER-ME 054/97). Quanto à classificação, inicialmente foram utilizadas as metodologias HRB e SUCS.

Entretanto, uma vez que apenas as classificações do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e HRB-AASHTO não têm se mostrado satisfatório quando usado em projetos de pavimentos para solos tropicais, em [18] os autores propuseram uma classificação mais apropriada, no qual separavam os solos de comportamento lateríticos daqueles não lateríticos. Portanto, o solo foi também classificado nessa metodologia. As normas utilizadas para o ensaio e classificação MCT foram as DNER-ME 256/94, DNER-ME 258/94 e DNER-ME 259/96.

Finalmente, para a mistura foram empregados os ensaios de compactação (DNIT 164/2013) e módulo de resiliência - MR (DNIT 134/2010). O objetivo do ensaio consiste em obter dados que permitam avaliar o comportamento tanto do solo quanto da mistura solo-agregado, através da aplicação de uma sequência de 18 pares de tensões, com 10 repetições de carga para cada par. O equipamento utilizado para o ensaio foi a prensa de 16 kN *Servo-pneumatic Dynamic Testing System* – DTS 16, da PAVETEST. É importante lembrar que os corpos-de-prova para este ensaio foram moldados utilizando a energia de Proctor Intermediária.

Para determinação do MR, foi utilizado o modelo composto, mostrado em [19], cuja a definição dos coeficientes k_1 , k_2 e k_3 é dada através da Equação 1.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

De posse dos dados do ensaio de módulo de resiliência – as equações definidas para cada amostra – e os demais dados necessários, como o tráfego da região para obtenção do número $N = 1,138 \times 10^7$ (conforme projeto da via), material para revestimento asfáltico, base e subleito, e localização de implantação, foi realizada a alimentação do *software* SisPav – versão 2007 [20]. Para vida de projeto, definiu-se o prazo de dez anos.

4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

4.1 Escória de ferro silício-manganês (Agregado)

Uma amostra dos resultados dos ensaios de granulometria é apresentada na Figura 2. Devido ao fator econômico do custo de britagem, o material vem sendo reduzido a diâmetros de agregado graúdo, uma vez que o objetivo da empresa tem sido apenas estocar este material em pilhas.

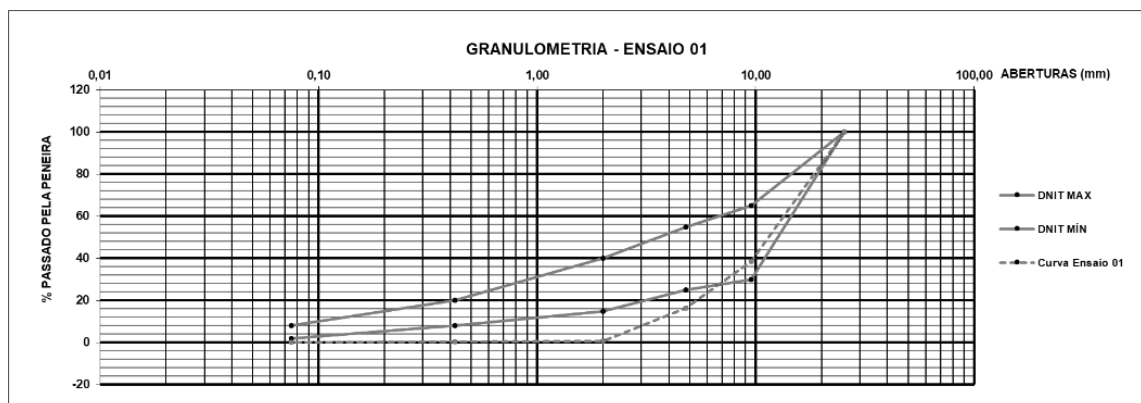


Fig.2. Resultado do Ensaio de Caracterização Granulométrica

Como pode ser notada, a composição do material apresenta predominantemente grãos graúdos, coerente com a política adotada pela empresa geradora do resíduo em reduzir custo com britagem. Entende-se que, caso não se viabilize uma forma de reduzir os grãos, uma opção viável para o uso deste material seria o emprego de mistura com solo.

Quadro 1. Resultados dos ensaios de caracterização da escória

Ensaio	Resultado
Densidade aparente do agregado graúdo	2,94 g/cm ³
Absorção	0,44%
Abrasão Los Angeles	25,53%
Perda ao choque no aparelho Treton	8,88%

Os resultados acima demonstram que o material possui densidade próxima aos valores encontrados em [10] e [11]. Para a absorção, o valor encontrado mostra-se menor que os trabalhos mencionados, os quais apresentam patamar acima de 1%.

Sobre a abrasão, esta se encontra dentro dos limites estabelecidos pela norma DNIT 407/17 – Sub-base estabilizada granulometricamente com Açobrita®, a qual define como 55% a abrasão máxima para o agregado a ser empregado em camadas de pavimento. Além disso, a escória de ferro silício-manganês encontra-se adequada também quando utilizada a norma DNIT 114/09 – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA®, que especifica o limite de abrasão como 40%. Já na perda ao choque com aparelho Treton, tendo como referência o valor de 60% para o valor máximo admissível de perda, descrito em [22] acerca de métodos de ensaio para determinação de características mecânicas de agregados e valores de aceitação, retirado de [21], o material é aceitável para uso em pavimentos.

É importante salientar que a escória em estudo apresenta características distintas das escórias de aciaria e de alto forno, conforme Figura 3. As principais diferenças residem na coloração esverdeada, na superfície lisa, no aspecto vítreo e na pouca quantidade de finos. Algumas dessas características podem ser nitidamente verificadas quando comparadas as imagens das microestruturas dos dois materiais, conforme a Figura 4. A escória de ferro silício-manganês tem a superfície lisa e quantidade de vazios nitidamente menor, justificando o aspecto mais compacto do material. Além disso, é possível notar que o material é formado por meio de camadas (estrutura similar a planos de clivagem), sugerindo que a ruptura acontece por cisalhamento, apesar de não ter sido verificado um percentual elevado de desgaste por abrasão “Los Angeles”.



Fig.3. Diferença de forma e superfície: à direita, escória de aciaria; à esquerda, escória de FeSiMn [23]

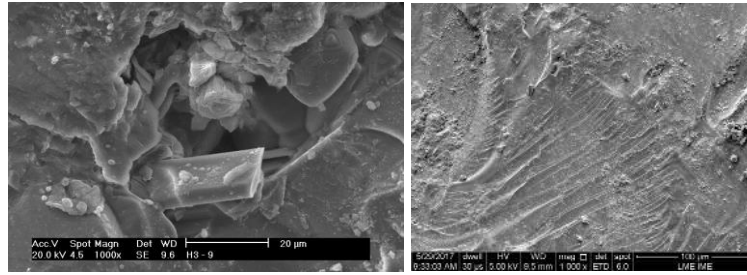


Fig.4. Imagens da microestrutura de escória de aciaria (à esquerda [23]) e escória de ferro silício-manganês (à direita) (1000x)

Sobre os resultados da análise da forma do agregado, a Figura 6 apresenta os gráficos obtidos durante o ensaio AIMS. É possível visualizar a distribuição das propriedades de angularidade, textura e esfericidade.

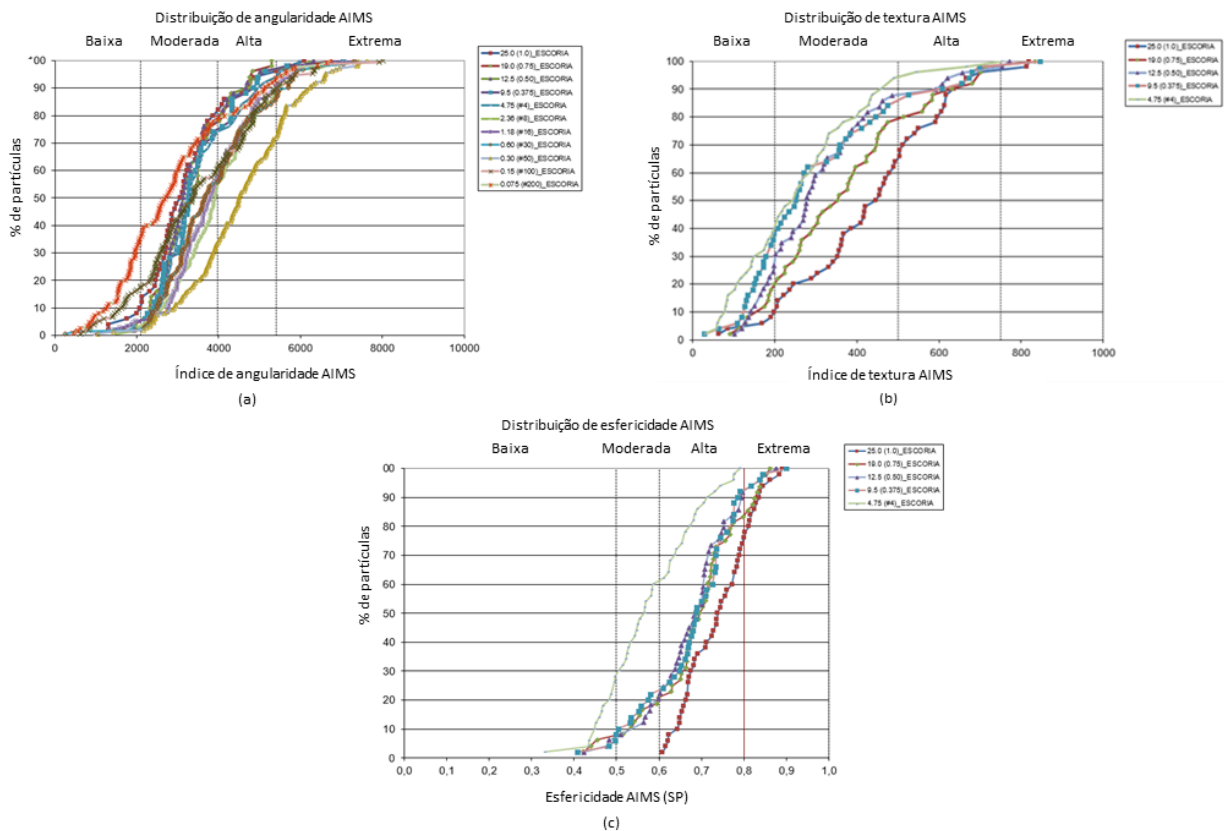


Fig.6. Propriedades de forma do agregado pelo AIMS: (a) angularidade; (b) textura; e (c) esfericidade

De acordo com o gráfico de distribuição de angularidade, o material, em geral, pode ser classificado como sub-arredondado, uma vez que mais de 90% apresentam índice de angularidade superior a 2100, sendo as amostras classificadas como moderadas em 52%.

De acordo com as especificações técnicas do Departamento de Estradas de São Paulo (Brasil) ET-DE-P00 / 008 e DNER-ME086 / 94, a esfericidade (índice de forma) do agregado deve ter um índice igual ou superior a 0.50. Como pode ser visto no gráfico de distribuição de esfericidade, mais de 90% das amostras são superiores ao índice 0.50 AIMS, exceto o agregado com 4.75mm (mais de 70% das amostras), o que sugere um atendimento às normas citadas, apesar dos diferentes métodos de ensaio. Além disso, o padrão recomenda que menos de 10% sejam de partículas lamelares, ou seja, sugere-se, por comparação, que o agregado analisado também atende a esta especificação, pois boa parte das amostras são compostas por baixa angularidade AIMS.

Sobre o gráfico de distribuição de textura, esta propriedade está intimamente ligada à força de fricção e à rugosidade da superfície; logo, quanto maior os valores deste parâmetro, maior será a resistência à deformação permanente, uma vez que a força de fricção entre os grãos será aumentada. Pode-se dizer que um material granular é mais áspero após o esmagamento, em geral [25]. Os resultados mostram que mais de 70% é superior a 200 e 55% é classificado como moderado.

4.2 Solo

O solo em estudo apresenta cor avermelhada, vestígios de cangas de minério de ferro e boa coesão quando possui umidade próxima da ótima. A região onde se encontra a jazida localiza-se nas proximidades de cavas de minérios. Sobre o resultado do ensaio de granulometria, o mesmo é apresentado na Figura 7. No Quadro 2 são consolidados os demais resultados para os ensaios e classificação de solos.

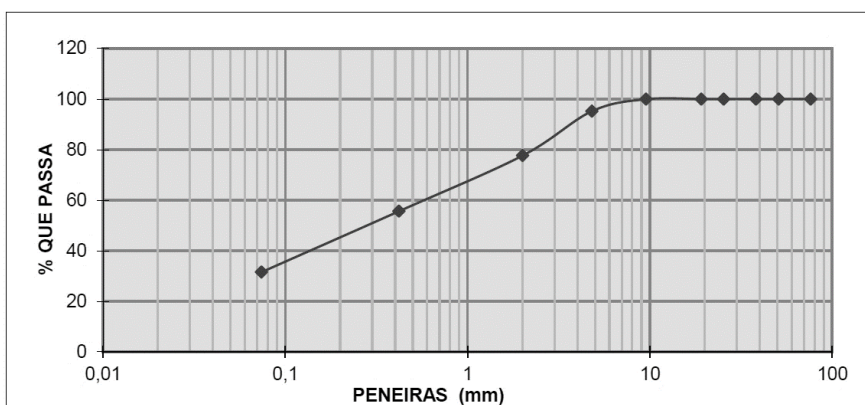


Fig.7. Resultado de granulometria para solo

Quadro 2. Resultados de ensaios e classificação de solos

Ensaio/Classificação	Parâmetros	Resultado
Limites de Atterberg	LL=34% e LP=17,4%	IP = 16,6%
Equivalente de areia	85,12%	> 30% (ok!)
Classificação HRB	p = 31,71; a = 0; b = 16,61; c = 0; d = 6,6; IG = 1,10	Areia argilosa A-2-6
Classificação SUCS		SP-SC – Areia mal graduada com argila
Classificação MCT	c' = 0,75; d' = 57,1; Pi = 5; e' = 0,74	LA' – solo arenoso laterítico

Finalmente, diante dos resultados expostos das três classificações, é possível concluir que o material em estudo é uma areia argilosa laterítica, de cor avermelhada.

4.3 Mistura solo-agregado

O presente estudo se propõe a analisar a estabilização do solo pelo emprego da escória de ferro silício-manganês. Logo, como parâmetro para definir os percentuais, foi utilizado o enquadramento granulométrico das faixas do DNIT, conforme a norma DNIT 139/10. Diante disso, os percentuais escolhidos foram 40% solo + 60% escória e 50% solo + 50% escória. O enquadramento ocorreu conforme a faixa D, ou seja, para um tráfego com $N > 10^6$.

O Quadro 3 apresenta os valores dos parâmetros para a determinação do módulo de resiliência. Para este estudo, foi usado o par de tensões de $\sigma_3 = 1,4 \text{ kgf/cm}^2$ e $\sigma_d = 4,2 \text{ kgf/cm}^2$.

Quadro 3. Resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura solo-agregado

Material	Amostra	MR	k1	k2	k3	σ_3	σ_d
Solo	1	216,25	205,489	0	0,03558	1,4	4,2
	2	250,99	241,981	0	0,0255	1,4	4,2
	3	253,64	185,519	0,1999	0,1711	1,4	4,2
Mistura 40/60	1	270,4	270,401	0	0	1,4	4,2
	2	257,6	257,601	0	0	1,4	4,2
	3	320,82	320,824	0	0	1,4	4,2
Mistura 50/50	1	251,27	251,273	0	0	1,4	4,2
	2	353,22	353,222	0	0	1,4	4,2
	3	272,96	272,957	0	0	1,4	4,2

Para o dimensionamento das camadas, foram utilizados os dados de contagem volumétrica obtidos pela empresa responsável pela manutenção e conservação da rodovia BR-040. Além disso, foram usados os valores de módulo de resiliência de projeto da rodovia para as camadas de revestimento asfáltico, base e subleito, fornecidos pela mesma empresa.

O cálculo de volume de tráfego resultou no valor de $N = 1,138 \times 10^7$, conforme projeto da via. Uma vez que o trecho estudado encontra-se no estado de Minas Gerais (Brasil), o clima adotado foi o da cidade de Belo Horizonte. Como taxa de crescimento, foi adotado o valor sugerido em [26], sendo igual a 3%. Para a vida de projeto, foi adotado o período de dez anos. Finalmente, a seguir, são apresentados os resultados para o dimensionamento das camadas de pavimento, comparando o uso exclusivo de solo com as misturas solo-agregado, na sub-base, conforme Quadro 4.

Quadro 4. Resultado do dimensionamento das camadas de pavimento

Cenário	Camada	Material	Coef. Poisson	Módulo Resiliência (Mpa)	Espessura (cm)	Fadiga do Revestimento		Estimativa de deformação permanente acumulada (cm)	Vida útil Estimada (anos)
						Eixo X (%)	Eixo Y (%)		
1	Revestimento	CBUQ	0,33	4.193,00	10	31,27	70,41	0,408	14,9
	Base	Solo laterítico	0,35	563,92	20				
	Sub-base	Solo laterítico	0,4	250,99	20				
	Subleito	Solo laterítico	0,4	57,00	-				
2	Revestimento	CBUQ	0,33	4.193,00	10	31,17	69,80	0,403	15,2
	Base	Solo laterítico	0,35	563,92	20				
	Sub-base	Mistura 40/60	0,4	270,40	20				
	Subleito	Solo laterítico	0,4	57,00	-				
3	Revestimento	CBUQ	0,33	4.193,00	10	31,57	70,13	0,402	15,2
	Base	Solo laterítico	0,35	563,92	20				
	Sub-base	Mistura 50/50	0,4	272,96	20				
	Subleito	Solo laterítico	0,4	57,00	-				

Sobre as seções de pavimento dimensionadas, os danos foram relativos à fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y), nos seguintes termos: Cenário 01 – 66,99%; Cenário 02 – 65,92%; Cenário 03 – 65,78%.

É possível notar que o solo estudado apresenta bons valores de MR, resultando em vida útil de projeto acima do estimado. Entretanto, é pouco expressivo o ganho de resistência oferecido pela escória, devendo ser levado em conta os aspectos econômicos e ambientais para que essa utilização do resíduo se mostre atraente.

5 CONCLUSÕES

Como pôde ser visto neste estudo, a escória de ferro silício-manganês mostra-se como uma solução tecnicamente viável para emprego em mistura com solo para uso em estruturas de pavimento. Mesmo com pouco ganho de resistência, o emprego deste material pode ser vislumbrado em uma destinação ambientalmente adequada se aplicado em estruturas de pavimento. Além disso, resultaria num menor impacto ambiental com a redução na extração de agregados para aplicação na rodovia, além de possível redução de custos, seja na aquisição do material ou no seu transporte.

Como características gerais do resíduo de ferro silício manganês, esta pesquisa mostrou que o material apresenta predominantemente grãos graúdos (apenas 40% da amostra passante na peneira de abertura 10 mm), densidade elevada e adequados índices para emprego em sub-base de pavimento quanto à absorção, à perda ao choque e à abrasão. Foram identificadas estruturas similares a planos de clivagem na análise microestrutural da escória, sugerindo que sua ruptura se dá, preferencialmente, por cisalhamento. Nos aspectos AIMS, as amostras dessa escória possuem, de maneira geral, angularidade de moderada a alta, textura de moderada a baixa e alta esfericidade.

6 REFERÊNCIAS

1. ONU. Organização das Nações Unidas. Nações no Brasil – Documentos Temáticos: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, 2017.
2. Estrada, F.; Botzen, W.J.W.; Tol, R.S.J. A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. *NATURE - Nature Climate Change*, Volume 7, Issue 6. 2017.
3. Jamshidi, A.; Kurumisawa, K.; Nawa, T.; Jize, M.; White, G. Performance of pavements incorporating industrial byproducts: A state-of-the-art study. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 164. Japan. 2017.
4. Euroslag - The European Slag Association. *Position Paper on the Status of Ferrous Slag*. Alemanha. 2012.
5. Nippon Slag Association. *Production and Uses of Blast Furnace Slag in Japan*. 2015.
6. Australasian. Australasian (Iron and Steel) Slag Association – *Benchmarking Report*. 2010.
7. National Slag. Common uses slag. Disponível em: <http://www.nationalslag.org/common-uses-slag>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
8. Li, Q.; Wang, Z.; Li, Y.; Shang, J. *Cold recycling of lime-fly ash stabilized macadam mixtures as pavement bases and subbases*. Nanjing Forestry University. China. 2018
9. Martins, E. *Contabilidade de Custos*. São Paulo. Atlas. 2010.
10. Nóbrega, L. M. *Caracterização mecânica de misturas asfálticas utilizando escória de ferroliga de manganês como agregado*. Tese de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2007.
11. Oliveira, R.W.H. *Caracterização da escória de ferro silício-manganês para aplicação como agregado em pavimentação ferroviária*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 2013.
12. Grubba, D. C. R. P. *Um estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos – SP. 2009.
13. Alecrim, A.V. *Estudo de resíduo de quartzito foliado para emprego em estruturas de pavimentos*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo - SP. 2009.
14. Silva Júnior, W.S. *Estudo para utilização de resíduo da fabricação de papel na construção rodoviária*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos – SP. 2010.
15. Santos, G.P.P. *Um estudo sobre a utilização da escória de ferro-níquel em pavimento rodoviário*. Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro-RJ. 2013.

16. Pires, G.M. *Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS. 2014.
17. Al Rousan, T.M. *Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system*. Tese de Doutorado. Texas A&M University. 2004.
18. Villibor, D. F.; Nogami, J.S. *Pavimentos econômicos – Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos*. Editora Arte & Ciência. São Paulo. SP. 2009
19. Guimarães, A.C. R. *Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.
20. Franco, F. A. C. P. *Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav*. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
21. Bernucci, L. B; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A. P.; Soares, J. B. *Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros*. Petrobrás. 2010.
22. IPR. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Estudos e pesquisas de rochas de pedreiras para estabelecimento de critérios de qualidade frente às normas e procedimentos existentes e sua aceitação. *Relatório final*. ECL – Engenharia, Consultoria e Economia S.A. Rio de Janeiro, 1998.
23. Rodrigues, G. L. C. *Caracterização e avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria LD não tratadas e tratadas*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil, 2007.
24. Castelo Branco, V. T. F. *Caracterização de misturas asfálticas com uso de escória de aciaria como agregado*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 2004
25. Lima, C. D. A. *Estudo da deformação permanente de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimentos*. Dissertação de Mestrado. UFRJ. 2016.
26. DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de estudos de tráfego – Publicação IPR 723*. Rio de Janeiro. RJ. 2006.