

Caracterização laboratorial de resíduos de mineração como agregado alternativo para misturas asfálticas

Os processos de extração e beneficiamento do minério de ferro, ao mesmo tempo em que fomentam a economia e o desenvolvimento mundial, geram grandes quantitativos de resíduos que necessitam de destinação e/ou disposição adequada. Por sua vez, o grande apelo ambiental gerado por esse cenário, exige soluções técnicas e econômico-sustentáveis para que as mineradoras e o meio ambiente possam coexistir. O Brasil, que possui matriz de transportes pautada no modal rodoviário, com predominância dos pavimentos flexíveis à base de misturas asfálticas na camada de revestimento, insere-se no mercado mundial com uma economia diretamente associada à extração mineral e, recentemente, sofreu seu maior desastre ambiental por rompimento de barragem de resíduos dessa natureza, com perdas ambientais, materiais e humanas. No presente trabalho abordou-se a caracterização físico-química de resíduos do processo de beneficiamento do minério de ferro para utilização em misturas asfálticas, através dos ensaios de granulometria convencional e por difração a laser, Aggregate Image Measurement System (AIMS), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), equivalente de areia, densidade, Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), lixiviação e solubilização. A caracterização laboratorial demonstrou que o resíduo se comporta como um agregado miúdo e de enchimento, tendendo às areias finas siltosas, atendendo aos parâmetros físico-químicos, mineralógicos e geotécnicos exigidos pelas normas técnicas vigentes, ficando sua utilização em misturas asfálticas como agregado alternativo condicionada a pequenos percentuais em substituição de agregado miúdo e filler.

Palavras-chave: Resíduo de Mineração; Caracterização de Agregado; Mistura Asfáltica.

Laboratory characterization of mining waste as an alternative aggregate for asphalt mixtures

The processes of extraction and beneficiation of iron ore, while promoting the economy and world development, generate large amounts of waste that need adequate destination and/or disposition. In turn, the great environmental appeal generated by this scenario requires technical and economical-sustainable solutions so that mining companies and the environment can coexist. Brazil, which has a transport matrix based on the modal road, with predominance of flexible pavements based on asphalt mixtures in the coating layer, is part of the world market with an economy directly associated with mineral extraction and recently suffered its greatest disaster environmental degradation due to the rupture of a dam of this type with environmental, material and human losses. In the present work, the physico-chemical characterization of residues of the process of iron ore beneficiation for use in asphalt mixtures was carried out through conventional granulometry and laser diffraction tests, Aggregate Image Measurement System (AIMS), Electron Microscopy (MEV), sand equivalent, density, Dispersive Energy Spectroscopy (EDS), leaching and solubilization. The laboratory characterization showed that the residue behaves as a small aggregate and filler, tending to the fine silty sands, taking into account the physical-chemical, mineralogical and geotechnical parameters required by the current technical standards, being its use in asphalt mixtures as an alternative aggregate conditioned to small percentages in replacement of little aggregate and filler.

Keywords: Mining Residue; Characterization of Aggregate; Asphalt Mixture.

Topic: Engenharia Geotécnica

Received: 10/06/2018

Approved: 24/07/2018

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Quincio Muniz Pinto Netto
Instituto Militar de Engenharia, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1796291226520794>
quincio@hotmail.com

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães 
Instituto Militar de Engenharia, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8890983301899546>
<http://orcid.org/0000-0001-9244-7034>
cap-guimaraes@hotmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0009

Referencing this:

PINTO NETTO, Q. M.; GUIMARÃES, A. C. R.. 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, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0009>

INTRODUÇÃO

A mineração brasileira possui posição de destaque no cenário global, tanto em produção quanto em reservas, constituindo-se como um importante setor para movimentação da economia e desenvolvimento do país. No segmento de minerais industriais, o minério de ferro representa uma das matérias-primas mais presentes no dia-a-dia das pessoas, sendo utilizado em uma variedade de produtos e processos essenciais para a vida cotidiana.

Entretanto, associado a esse cenário propício ao país encontra-se a geração de estéreis e resíduos, subprodutos inerentes ao processo de lavra e beneficiamento do minério de ferro, os quais exibem características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis em função da litologia do maciço rochoso e do próprio processo de beneficiamento. A destinação desses rejeitos tem sido fonte de preocupação em todo o Brasil, principalmente na região do chamado Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais, onde recentemente ocorreu rompimento de uma das barragens de resíduos operada pela Mineradora Samarco, trazendo à tona a necessidade por alternativas econômico-sustentáveis para utilização desse material (ARÊDES, 2016).

O Brasil, que ainda possui matriz de transportes pautada no modal rodoviário, com predominância dos pavimentos flexíveis em mais de 95% das estradas pavimentadas que compõem a malha viária nacional, representa um potencial para pesquisa e utilização dos resíduos da mineração do ferro como agregado alternativo em misturas asfálticas. Tal fato pode ser denotado através dos dados apresentados no anuário do Sistema Nacional de Viação, que apresenta 1.720.643,2 km de malha rodoviária catalogada, das quais apenas 12,2% encontram-se em condições ótimas, 9,2% estão em fase de planejamento para recuperação do pavimento e 78,6% dessas rodovias não são pavimentadas (DNIT, 2015).

Dessa forma, a pavimentação asfáltica pode ser considerada uma alternativa para solução do passivo ambiental gerado pela mineração do ferro, haja vista a possibilidade de melhoria nas características técnicas da mistura asfáltica produzida e da utilização em larga escala de um grande volume de resíduos em substituição do agregado convencional. Do ponto de vista técnico, o comportamento mecânico da mistura asfáltica é diretamente influenciado pelas características dos seus compostos e pelo modo de interação entre eles. A constituição de uma mistura asfáltica é feita de ligante asfáltico, materiais granulares e materiais de enchimento, em proporções específicas e pré-definidas em projeto (BERNUCCI et al., 2007).

Contudo, sabe-se que os agregados compõem fração importante na estruturação da camada de revestimento asfáltico e influenciam diretamente no seu desempenho, estando sua seleção condicionada ao tipo de aplicação, disponibilidade, custo e qualidade. Nesse contexto, o presente trabalho realizou caracterização físico-química no resíduo do processo de beneficiamento do minério de ferro, fornecendo parâmetros para sua utilização em misturas asfálticas e propondo limites de utilização através da análise e comparação com outros estudos sobre resíduos na pavimentação.

MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo estudado provém do beneficiamento do minério de ferro e foi coletado na Barragem do Germano, pertencente ao complexo de barragens de rejeito da Mineradora Samarco S.A., situada no município de Mariana/MG. Na pesquisa, foram realizados ensaios de caracterização física, como granulometria convencional e por difração a laser, *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), equivalente de areia e densidade. Para a caracterização química, utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS, lixiviação e solubilização).

Caracterização física

O ensaio de granulometria convencional por peneiramento e sedimentação seguiu as preconizações da norma DNER-ME 083 (DNER, 1998), referente aos procedimentos para obtenção da composição granulométrica de agregados miúdos para misturas asfálticas, sendo realizado no Laboratório de Solos do Instituto Militar de Engenharia (IME).

Para o referido ensaio, foram utilizadas duas amostras de aproximadamente 5 kg resíduo, dispostos em bandeja e colocados em estufa a 60°C por 24 horas para garantir a secagem do material. Posteriormente todas as amostras foram quarteadas e iniciado o procedimento de peneiramento e sedimentação, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1: Quarteador amostral (a), conjunto de peneiras (b) e amostra após peneiramento (c).

Quanto ao ensaio de granulometria por difração a laser, realizado no Laboratório de Geotecnia do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), foram utilizados os critérios estabelecidos pela norma ISO 13320 (ISO, 2009). Para o referido ensaio, foram utilizadas duas amostras do material passante na peneira número 200, de abertura 0,075 mm, após a realização do peneiramento na granulometria convencional, conforme está na Figura 2.

Dessa forma, o ensaio de granulometria por difração a laser analisa as dimensões das partículas inferiores a 0,075 mm, caracterizado como material fino ou de enchimento para misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico. Os ensaios de equivalente de areia e densidade real de agregados miúdos, realizados no Laboratório de Solos do IME, seguiram os procedimentos e especificações das normas técnicas DNER-ME 054 (DNER, 1997) e DNER-ME 084 (DNER, 1995), respectivamente, conforme demonstrado na Figura 3.



Figura 2: Equipamento Malvern Mastersizer 2000 (a), ensaio em andamento (b) e amostra seca (c).



Figura 3: Ensaio de equivalente de areia (a), aferição do equivalente de areia (b) e ensaio de densidade (c).

Para o ensaio de equivalente de areia foram preparadas 3 amostras de resíduos de mineração, previamente secos em estufa a 60°C por 24 horas, dispostos em proveta cilíndrica transparente e calculada a relação volumétrica entre a altura do nível superior do resíduo e a altura do nível superior da suspensão argilosa. Para o ensaio de densidade foram utilizadas duas amostras do resíduo, previamente seco com as mesmas condições do ensaio de equivalente de areia, posteriormente calculada a densidade através da relação entre a massa do volume da amostra e a massa de igual volume de água destilada ou deionizada. Quanto ao ensaio AIMS, que não possui norma técnica brasileira para especificação, seguiu as preconizações estabelecidas na norma americana FHWA/TX 5-1707 (FHWA, 2004), sendo realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4: Equipamento AIMS (a), bandeja transparente 19 mm (b) sistema de captura de imagem (c).

O ensaio AIMS consiste no processamento de imagens para avaliação das características externas dos agregados, tais como o índice de forma 2D e 3D, angularidade, textura e esfericidade, divididos em etapas de acordo com as peneiras utilizadas na granulometria dos mesmos. Entretanto, para agregados miúdos, são avaliados somente os dados relativos ao índice de forma 2D e angularidade.

Caracterização química

A caracterização química foi realizada no Laboratório de Ciência dos Materiais do IME, através do equipamento MEV em associação com o EDS, que são ferramentas essenciais no estudo de caracterização microscópica de materiais, conforme Figura 5.

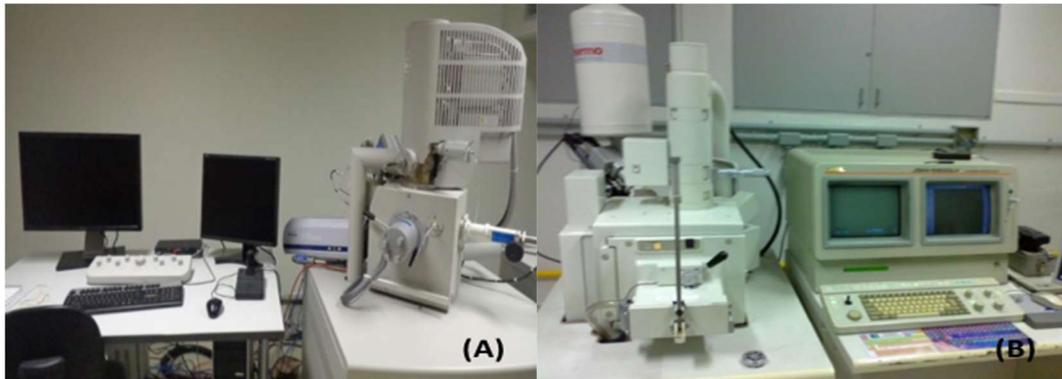


Figura 5: Equipamento MEV (a) e equipamento EDS (b).

O ensaio MEV consiste na utilização de um feixe de elétrons primários com diâmetro pequeno que, ao chegar na superfície do material analisado deverá interagir com os átomos do mesmo. Dessa forma, os elétrons presentes na superfície da amostra são denominados de elétrons secundários, enquanto os demais ficam retro espalhados. A interação desse feixe de elétrons na parte superior da amostra gera imagens de alta resolução, sendo os elétrons secundários responsáveis pela geração de imagens com detalhamento profundo.

Para o ensaio EDS, utiliza-se uma câmara de espectroscopia de energia dispersiva acoplada ao equipamento MEV, que assim permitirá a identificação dos raios-X emitidos pela amostra e, conseqüentemente, determinar e quantificar de forma rápida os elementos químicos presentes em determinado material. Ressalta-se ainda que o ensaio MEV e EDS, por se tratar de uma análise microscópica com utilização de recursos da câmara de espectroscopia de energia dispersiva, não possui norma técnica específica, sendo realizado apenas os procedimentos laboratoriais e computacionais padrões para obtenção dos resultados necessários.

Os ensaios de lixiviação e solubilização, realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, seguiram as preconizações estabelecidas nas normas técnicas NBR 10004 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004b) para determinação dos elementos contaminantes presentes no resíduo, classificação e risco de contaminação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição granulométrica

Com base no ensaio convencional e segundo a escala ABNT, a composição granulométrica do resíduo apresentou 1% de argila, 36% de silte, 56% de areia fina e 7% de areia grossa, conforme observado na Figura 6. Da mesma forma, realizou-se o ensaio de granulometria por difração a laser para conhecimento da

composição granulométrica das partículas de material fino, também conhecido como material de enchimento para misturas asfálticas, passante na peneira de número 200, de abertura 0,075mm, conforme as Figura 7.

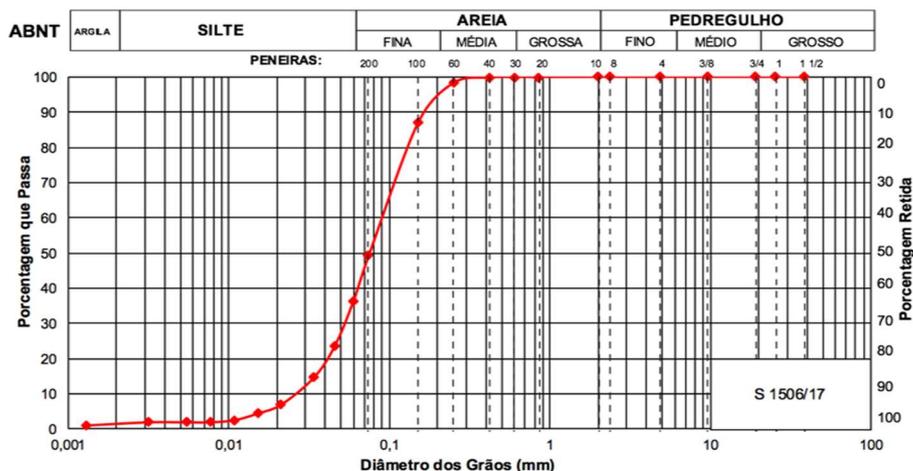


Figura 6: Curva e composição granulométrica do resíduo.

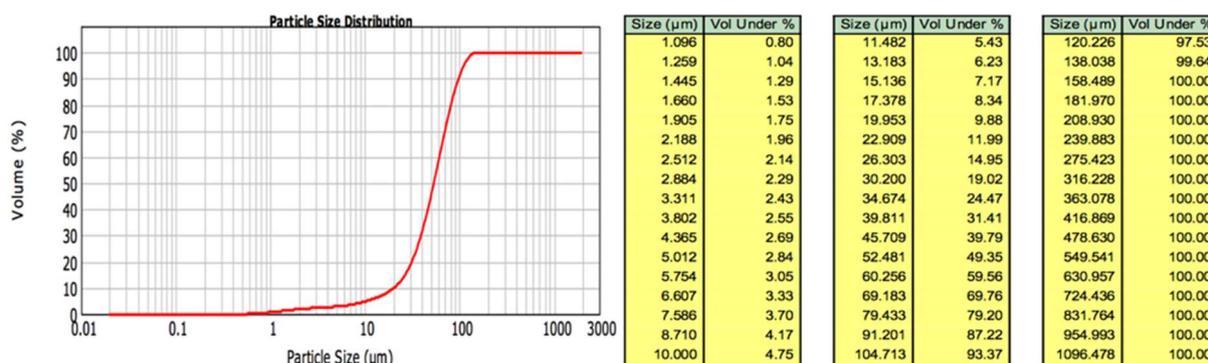


Figura 7: Curva granulométrica das partículas de resíduo por difração a laser.

Contudo, o ensaio de granulometria por difração a laser apontou que 90% das partículas de resíduo encontram-se distribuídas entre as faixas 1 µm e 100 µm, bem como o tamanho médio das mesmas corresponde a 52 µm. Com a análise das curvas granulométricas em ambos os ensaios, pode-se afirmar que o resíduo apresentou distribuição adequada para sua classificação como agregado miúdo, composto basicamente por silte e areia fina.

Acredita-se que 60% a 70% dos resíduos de mineração do Quadrilátero Ferrífero apresentam granulometria tendendo às areias finas e médias siltosas (CAMPANHA, 2011). Com isso, a composição granulométrica do resíduo apresentou valores dentro do esperado e observado em outras bibliografias, caracterizando-se como um agregado miúdo e filler, tendendo às areias finas siltosas.

Aggregate Image Measurement System (AIMS)

O ensaio AIMS consiste no processamento de imagens digitais para análise da forma tridimensional, bidimensional, angularidade, textura, esfericidade, achatamento e lamellaridade. Entretanto, o resíduo, por se tratar de um material fino, limita-se às variáveis angularidade e forma 2D do material retido na peneira número 100, de abertura 0,15 mm, e peneira número 200, com abertura 0,075 mm, conforme a Figura 8.

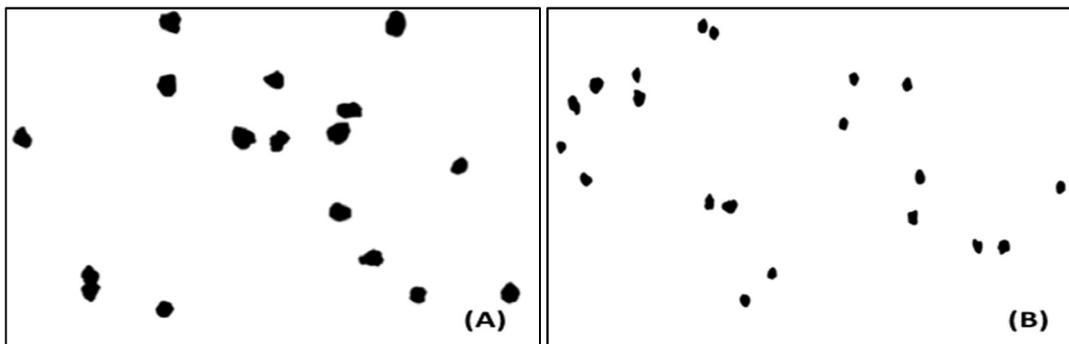


Figura 8: Ensaio AIMS no resíduo retido na peneira n. 100 (a) e retido na peneira n. 200 (b).

Índice de forma

Pela análise bidimensional do índice de forma, os resíduos retidos na peneira de número 100 (0,15 mm) apresentaram as seguintes proporções: circular 53%, semi-circular 35%, semi-alongado 9% e alongado 3%, caracterizando-se como material tendendo de circular a semi-circular pela classificação AIMS, de acordo com o gráfico da Figura 9.

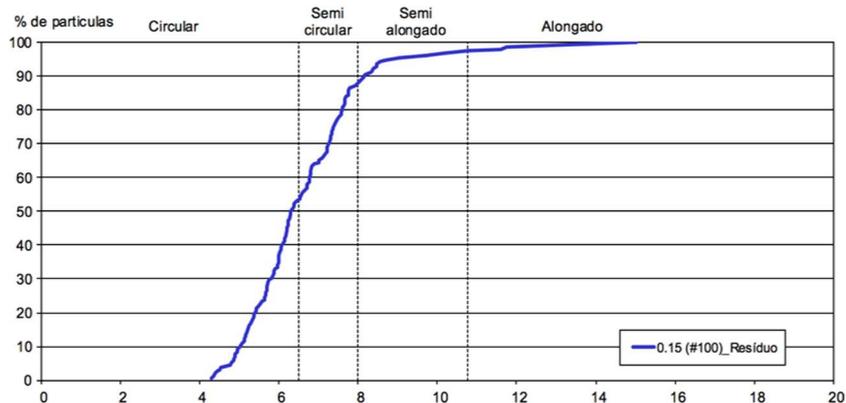


Figura 9: Índice de forma 2D do resíduo retido na peneira n. 100 (0,15 mm).

Quanto aos resíduos retidos na peneira de número 200 (0,075 mm) ensaiados no AIMS, a distribuição do índice de forma bidimensional se apresentou diversificada, com circular 17%, semi-circular 35%, semi-alongado 38% e alongado 10%. Dessa maneira, segundo a classificação AIMS, essas partículas de resíduo apresentam forma tendendo de semi-circular a semi-alongado, conforme ilustrado no gráfico da Figura 10.

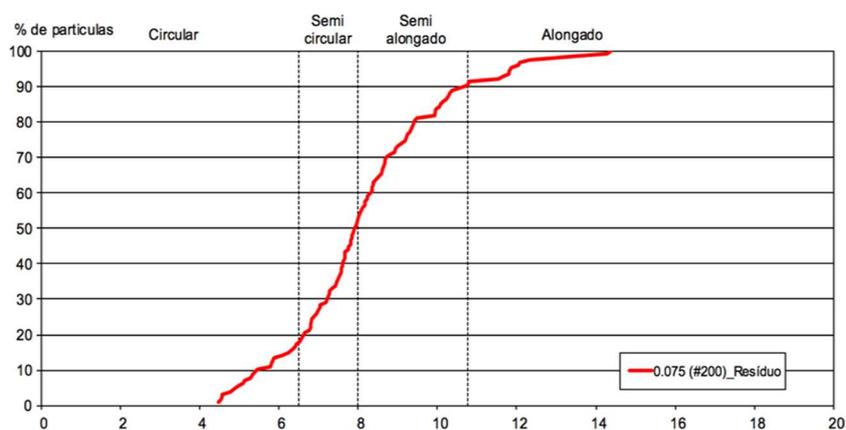


Figura 10: Índice de forma 2D do resíduo retido na peneira n. 200 (0,075 mm).

Angularidade

Da mesma forma, utilizou-se o AIMS para análise da angularidade do resíduo de mineração, subdividido de acordo com o procedimento de execução do ensaio, bem como da granulometria previamente conhecida pelo ensaio convencional e por difração a laser. Para agregados miúdos e/ou materiais finos, são utilizadas amostras retidas na peneira de número 100 e, passantes na mesma, mas retidas na peneira número 200. Para as partículas de resíduo retidas na peneira número 100 (0,15 mm), a angularidade se apresentou distribuída como arredondado 17%, sub-arredondado 65%, sub-angular 16% e angular 2%, caracterizando esse material como sub-arredondado, de acordo com o gráfico da Figura 11.

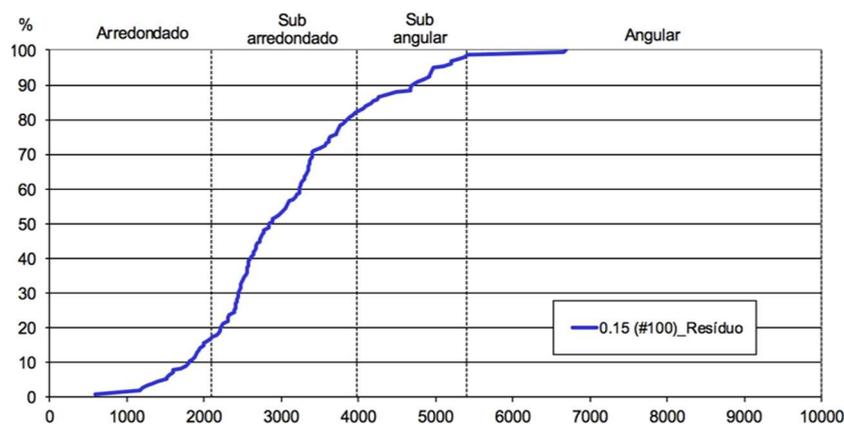


Figura 11: Angularidade do resíduo retido na peneira n. 100 (0,15 mm).

Quanto aos resíduos retidos na peneira de número 200 (0,075 mm), sua angularidade se apresentou distribuída em arredondado 52%, sub-arredondado 37%, sub-angular 10% e angular 1%, denotando uma tendência de arredondado para sub-arredondado, conforme o gráfico da Figura 13.

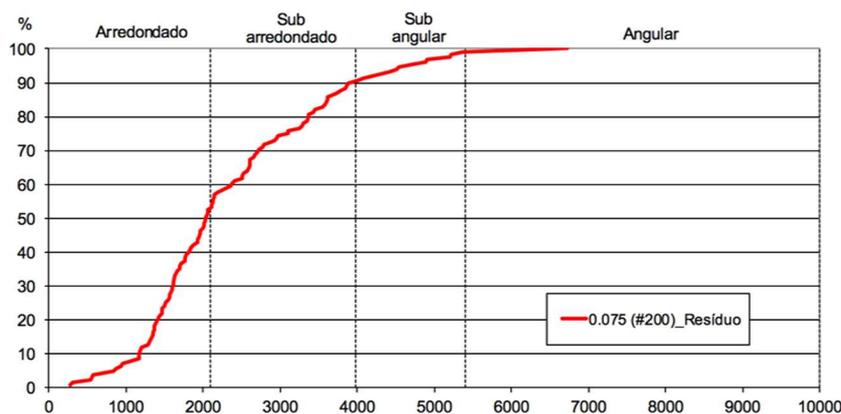


Figura 12: Angularidade do resíduo retido na peneira n. 200 (0,075 mm).

Equivalente de areia

Quanto ao ensaio de equivalente de areia, que determina a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos, realizado em três amostras de resíduo, os resultados apresentaram a média de 75%, o que demonstra compatibilidade com a norma vigente por estar acima do mínimo de 55% exigido para misturas do tipo concreto asfáltico, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Valores do ensaio de equivalente de areia.

Resíduo	Leitura Areia	Leitura Argila	Equivalente de Areia %	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Média (EA) %	Limite Norma
Amostra 1	7,8	10,8	72,22	0,023	0,033	70,00	>= 55
Amostra 2	7,7	11,0	70,00	0,001	0,000		
Amostra 3	7,5	11,1	54,8	0,017	0,025		

Densidade real

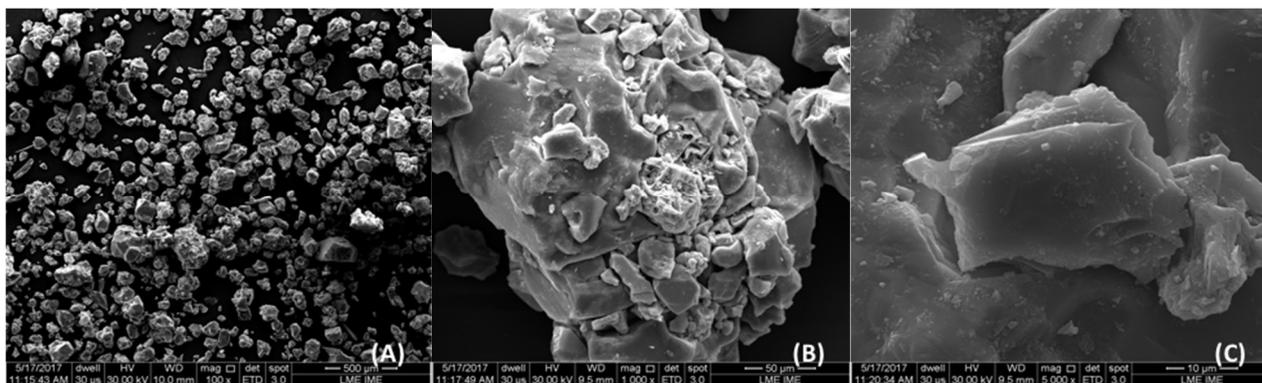
Quando ao ensaio de densidade real dos grãos, o resíduo apresentou 2,806 g/cm³, um valor considerado alto, porém justificável por se tratar de material proveniente do beneficiamento do minério de ferro, o que deverá ser comprovado pela análise de EDS.

Tabela 2: Valores do ensaio de densidade real dos grãos.

Resíduo	Picnômetro	Massa Picnômetro	Massa Picnômetro + Amostra	Massa Picnômetro + Amostra + Água	Massa Picnômetro + Água	D. Real (Gsa) g/cm ³	Média (Gsa) g/cm ³
Amostra 1	500,10	114,42	165,15	406,66	374,04	2,801	2,806
Amostra 2	500,20	116,29	167,11	409,09	376,30	2,810	

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O ensaio MEV foi realizado com o objetivo de obter imagens ampliadas do resíduo, com diferentes graus de magnificação, permitindo distinguir detalhes não revelados a olho nu, conforme ilustrado na Figura 13. As figuras apresentadas mostram a heterogeneidade do tamanho das partículas da amostra e possibilita identificar que a superfície dos grãos é lisa com ausência de poros, apresenta algumas fissuras e sua forma pode ser interpretada como irregular.

**Figura 13:** Microscopia do resíduo com aumento de 100x (a), 1000x (b) e 5000x(c).

Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

A determinação dos elementos presentes no resíduo via EDS foi realizada analisando as mesmas frações da amostra considerada no MEV. Contudo, observou-se nos resultados alta concentração de sílica e ferro, presença de alumínio e oxigênio. Porém, foi observado ainda que o oxigênio presente estava na forma de óxido, reagindo com os demais elementos químicos (FeO, SiO₂ e Al₂O₃). Dessa forma, os elementos químicos encontrados e seus quantitativos são justificáveis, uma vez que todas as amostras caracterizadas no ensaio são oriundas do beneficiamento do minério de ferro, conforme a Figura 14.

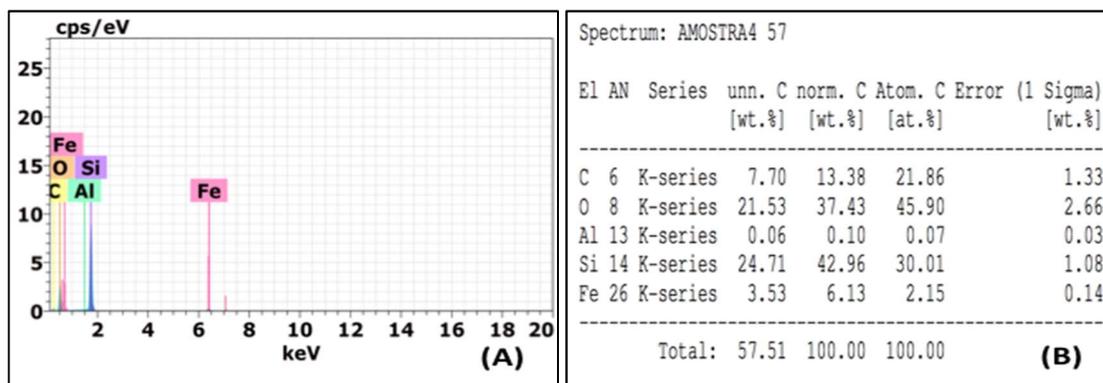


Figura 14: Composição (a) e quantitativos (b) dos elementos químicos pelo EDS.

Nas partículas que apresentam variação de 60 a 140 μm , observa-se uma concentração de sílica maior que de ferro, enquanto as partículas com ordem de tamanho menores que 20 μm , apresentam uma porcentagem maior de ferro, quando comparado a sílica, fato este que pode ser explicado pelo alto grau de beneficiamento do material. Dessa forma, a composição química do resíduo apresentou valores e materiais compatíveis com as características do maciço rochoso e processo de beneficiamento.

Lixiviação e solubilização

Os resultados da análise ambiental através dos ensaios de lixiviação e solubilização, que avaliam a presença de contaminantes no resíduo, demonstraram que no material não há presença de impurezas orgânicas, bem como sua classificação foi enquadrada como II B, referente aos materiais não perigosos e inertes. Dessa forma, do ponto de vista químico, não há restrição que impeça sua utilização na pavimentação asfáltica.

CONCLUSÕES

Quanto à granulometria, o resíduo do beneficiamento mostrou ser um agregado miúdo, tendendo às areias finas siltosas, sendo a sua composição de aproximadamente 42% de material passante na peneira 0,075 mm (n. 200). Dessa forma, pode-se afirmar que sua utilização em camadas de revestimento asfáltico fica restrita à pequenas substituições em percentuais de fíler e areia ou pó de pedra. Entretanto, para as camadas de base e sub-base, acredita-se que tal percentual poderá ser mais expressivo.

Do ponto de vista da densidade real dos grãos, o valor de 2,806 g/cm^3 pode ser considerado elevado quando comparado aos valores comumente encontrados em agregado miúdo de características granulométricas semelhantes. Entretanto, tal fato pode ser explicado por se tratar de um material com alta concentração de silício e ferro em sua composição, conforme observado no ensaio EDS.

O resíduo foi analisado pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), e os resultados demonstraram uma estrutura heterogênea, com grãos de superfície lisa e irregular. Porém, sabe-se que o fenômeno físico da heterogeneidade nos resíduos está associado aos processos de extração e beneficiamento, não sendo impeditivo para utilização em misturas asfálticas desde que alcançado o intertravamento dos agregados, tampouco para as camadas de base e sub-base.

Por sua vez, o ensaio de espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS) denotou alta concentração de silício e ferro na composição químico-mineralógica do resíduo, sendo justificável por se tratar de um rejeito do beneficiamento de minério de ferro. Quanto ao ensaio de equivalente de areia, necessário para utilização de solos e/ou agregados miúdos em pavimentação, os valores encontrados foram acima do mínimo estabelecido pela norma técnica comumente utilizada para dosagem do tipo concreto asfáltico, permitindo sua utilização nesse tipo de mistura.

Do ponto de vista ambiental, o resíduo foi caracterizado como Classe II B, que corresponde a materiais não perigosos e inertes pela classificação ABNT, permitindo assim sua utilização em misturas asfálticas para pavimentação. A litologia do maciço rochoso e os processos de extração e beneficiamento do minério de ferro exercem influência direta nas características dos resíduos gerados, sendo necessários ensaios de caracterização para conhecimento das variáveis. Contudo, conclui-se que a utilização de resíduos da mineração do ferro na pavimentação representa uma solução econômico-sustentável, pela substituição parcial de agregado convencional, bem como uma alternativa técnica, pois suas características físico-químicas, mineralógicas e geotécnicas atendem ao exigido nas normas de pavimentação.

AGRADECIMENTOS: Ao Instituto Militar de Engenharia (IME) e ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), pelo apoio e utilização dos laboratórios para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10004/04:** Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10006/04:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ARÊDES, M. L. A.. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro.** Dissertação (Mestrado Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, 2016.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. **Pavimentação Asfáltica:** Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2007.

CAMPANHA, A.. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 2011.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 084:** Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 054:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 083:** Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Sistema Nacional de Viação – SNV 2015 Completo.** Rio de Janeiro: DNIT, 2015.

FHWA. Federal Highway Administration. **FHWA/TX-05/5-1707-01-1:** Aggregate imaging system (AIMS): basics and applications. Austin: FHWA, 2004.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 13320/09:** Particle size analysis – laser diffraction methods. Vernier: ISO, 2009.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenera Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.