

# Contribuição ao estudo da utilização de rejeito de ferro e cobre in natura da mineração nas camadas de pavimento flexível

Diego Augusto Santos <sup>1</sup> 

Lorena Bruna Souza Leão <sup>1</sup> 

Giovanna da Silva Nogueira <sup>1</sup> 

Marcus Vinicius Teixeira Barbosa <sup>1</sup> 

Guilherme de Almeida Silva <sup>1</sup> 

Rayssa Monique Martins Gama <sup>1</sup> 

Josias Rossi Ladeira <sup>1</sup> 

Getúlio Francisco Manoel <sup>1\*</sup> 

## Resumo

A mineração desempenha um papel fundamental na sociedade contemporânea, respondendo por uma variedade de recursos minerais utilizados em diversas atividades. Através da mineração, são obtidos minérios de ferro, cobre, e outros que são amplamente empregados na produção de diversos materiais, tais como aço, alumínio, ligas metálicas e uma ampla gama de outros produtos. No entanto, a disposição de rejeitos oriundos do processo de beneficiamento de minerais se torna um grande desafio para a mineração, com impactos ambientais que podem ser representados tanto pelas possibilidades de rupturas de barragens de rejeitos, quanto pela devastação de áreas nativas e poluição hídrica. A disposição de rejeitos representa um dos desafios a sustentabilidade da indústria de mineração. Uma das alternativas seria empregar os rejeitos na construção das camadas dos pavimentos flexíveis, dado o volume disponível de rejeito e a volume de materiais naturais necessário para a construção de pavimentos. Este estudo avalia a aplicabilidade de rejeitos de minério de ferro e cobre do ponto de vista técnico, depositados em barragens, para sua utilização em pavimentos rodoviários. Os resultados deste trabalho sugerem que o rejeito de minério de ferro pode ser utilizado de forma mais abrangente tanto na camada de reforço de subleito quanto na mistura asfáltica. Por outro lado, o rejeito de cobre apresenta limitações de uso na utilização como reforço de subleito e não é indicado para a utilização na massa asfáltica.

**Palavras-chave:** Mineração; Rejeitos de mineração; Pavimentação; Sustentabilidade.

## Contribution to the study of the use of raw iron and copper mining waste in flexible pavement layers

## Abstract

Mining plays a fundamental role in contemporary society, accounting for a variety of mineral resources used in various activities. Through mining, iron, copper, and other ores are obtained and are widely used in the production of various materials, such as steel, aluminum, metallic alloys and a wide range of other products. However, the disposal of tailings from the mineral processing process becomes a major challenge for mining, with environmental impacts that can be represented both by the possibilities of tailings dam failures and by the devastation of native areas and water pollution. Tailings disposal represents one of the sustainability challenges of the mining industry. One of the alternatives would be to use the waste in the construction of flexible pavement layers, given the available volume of waste and the volume of natural materials necessary for the construction of pavements. This study evaluates the applicability of iron ore and copper waste from a technical point of view, deposited in dams, for use in road pavements. The results of this work suggest that iron ore waste can be used more extensively both in the subgrade reinforcement layer and in the asphalt mixture. On the other hand, copper waste has limitations in its use as subgrade reinforcement and is not recommended for use in asphalt mix.

**Keywords:** Mining; Mining tailings; Paving; Sustainability.

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

\*Autor correspondente: getmanoel@yahoo.com.br



## 1. Introdução

Os recursos minerais desempenham um papel fundamental na sociedade, visto que esta matéria-prima pode ser transformada em produtos de extrema relevância por meio da mineração. A mineração representa 4,2% do PIB e 20% das exportações brasileiras [1]. Os minérios mais explorados no Brasil são: Ferro, bauxita, manganês e nióbio [2]. Contudo, a atividade de mineração gera uma grande quantidade de materiais que são descartados e dispostos em barragens ou empilhamentos, chamados de rejeitos [1]. Um dos maiores desafios associados à mineração é a disposição destes rejeitos oriundos do processo de beneficiamento de minérios [3].

Os rejeitos podem ser dispensados de várias formas, como em cavas e minas exauridas, a céu aberto depositados em barragens de ou em formação de pilhas secas. A disposição em cavas e minas exauridas não atendem a toda demanda do volume de rejeitos disponibilizados. A opção de empilhamento é uma vertente que está sendo muito estudada ultimamente, e que já é utilizado por muitos países do hemisfério norte. Porém, no Brasil, nosso regime de chuva muito elevada em relação a países do hemisfério norte traz alguns problemas operacionais e por isso as empresas estão fazendo estudos e executando suas obras de modo cauteloso. A maior parte dos rejeitos brasileiros ainda são depositadas em barragens contidas, e isso representa um monitoramento constante por parte das agências reguladoras e pelas próprias empresas mineradoras. Haja visto os recentes acidentes de ruptura de barragens ocorridos em Minas Gerais atingindo as cidades de Mariana e Brumadinho, a Agência Nacional de Mineração – ANM tem adotado medidas cada vez mais restritivas visando a segurança operacional das barragens de rejeitos. Só o estado brasileiro de Minas Gerais possui 347 barragens de rejeitos catalogadas pela ANM, o que nos dá uma dimensão da quantidade de materiais depositados nas barragens [4]. Em 2018, a Fundação Estadual de Meio Ambiente - FEAM emitiu o Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração correspondente ao ano de 2017, com cerca de 562 milhões de toneladas de resíduos, sendo 51,55% referem-se ao rejeito, 48,41% ao estéril e 0,04% são resíduos diversos [5]. Devido à alta produção de rejeito, e a necessidade de tornar a indústria cada vez mais sustentável, faz-se necessário o desenvolvimento de soluções que possam reaproveitar esse material, ou promover uma destinação mais adequada com menor risco operacional. Neste contexto, a pavimentação se enquadra como alternativa viável [6,7].

O ferro (Fe) é um elemento metálico encontrado comumente em depósitos de formação de itabirito através de minerais, como hematita, magnetita, etc [8]. O cobre (Cu) é um material dúctil, maleável, que apresenta coloração avermelhada e que possui um papel fundamental no desenvolvimento industrial, visto que este metal é um bom condutor elétrico [9]. O pavimento, principal modal de transporte brasileiro, é uma estrutura construída composta por camadas de espessuras finitas, com a finalidade de suportar as cargas oriundas do tráfego e promover melhores condições de rolamento aos

usuários [10-13]. A pavimentação demanda uma grande quantidade de material para sua execução. Como exemplo, em apenas 1 km de via simples de tráfego médio, podemos consumir cerca de 5 a 10 mil m<sup>3</sup> de materiais, incluindo solos, britas e material asfáltico [11]. Neste contexto, os rejeitos se apresentam como materiais potencialmente disponíveis para esta tarefa na pavimentação, pois, além de não ter valor comercial, sua utilização pode reduzir o volume depositado nas barragens, o volume de escavação de material natural, os riscos de acidentes ambientais decorrentes de rompimentos de barragens e mantem a sustentabilidade da mineração.

Este estudo tem como objetivo ampliar a discussão sobre a viabilidade da aplicação de rejeitos de minério de ferro e cobre provenientes da mineração em pavimentos flexíveis rodoviários.

### 1.1 O estado da arte

A preocupação na utilização de resíduos industriais é mundial, visto que a sustentabilidade é o que vai garantir a existência das próximas gerações. Por mais estáveis que as barragens de rejeitos possam ser, sempre haverá algum risco associado, o que gera incertezas. Os grandes volumes de rejeitos gerados pela mineradora devem ser inseridos no contexto da sustentabilidade e atender a várias demandas, incluindo a utilização como materiais cimentícios suplementares em estruturas construídas [12,14-16]. Aproximadamente 20 a 25 bilhões de toneladas de resíduos de mineração são produzidos por ano [17], onde cerca de 39% são de minério de ferro.

O trabalho de Cao et al. [17] relatou que o rejeito de minério de ferro pode ser utilizado na mistura com Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP, de alta viscosidade, ou com a adição de 1,7% de cal hidratada para dopar o CAP, devido a acidez do rejeito. Cao utilizou rejeitos originário de basaltos e calcáreo, com granulometria fina (< 0,6mm). Os rejeitos foram misturados ao CAP modificado com o copolímero SBS (Estireno butadieno estireno) e apresentou resultados muito satisfatórios. Apaza et al. [18] também utilizou rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas frias de micro revestimento, com resultados satisfatórios. O micro revestimento é uma mistura nobre com alta tecnologia na sua produção e utilização [11]. De acordo com Santos e Meneguelli [14], o rejeito de minério de ferro arenoso, quando associada a solo argiloso na proporção 40% e 60% respectivamente, apresentou resultados positivos para que o agregado natural de uma camada de sub-base, garantindo boa trabalhabilidade da composição e facilidade de execução. Oda et al. [6], atribuiu que a utilização de rejeitos de mineração trás pontos relevantes como a destinação de maneira segura e sustentável do rejeito em caráter definitivo, reduzindo o consumo de material natural em obras de pavimentação e reduzindo os impactos ambientais e custos da obra. Mourão et al. [19] realizou misturas de CAP com rejeitos de minério de ferro, e os ensaios de caracterização do CAP modificado indicaram melhorias nas propriedades do CAP. Neste trabalho foram

utilizados percentuais de 9, 17, 29 e 40% de rejeito fino, e embora não tenha sido feitos ensaios com corpos de prova Marshall ou módulo de resiliência, os autores indicaram aumento de rigidez do CAP, com possibilidade de utilização nas misturas asfálticas.

Utilizando resíduos de escória de aço de forno elétrico a arco e rejeitos de mina de cobre da Malásia, Oluwasola et al. [20] conseguiu reduzir a utilização de materiais virgens. Porém, salientaram que a utilização de escórias de aço em grandes quantidades pode não ser adequadas para a produção do concreto asfáltico, devido a sua expansibilidade. Isto se deve a presença de cal livre e óxidos de magnésio. Mas podem ser utilizadas parcialmente na mistura de concreto, para estabilização de sub-base e mistura asfáltica quente [20], procedimento já normalizado pela norma - ASTM D5106 (*American Society for Testing and Materials*) Tendo como base a especificação Superpave (AASHTO M323 - *American Association of State Highway and Transportation Officials*) para dosagens de misturas asfálticas. Oluwasola et al. [20] e Trampus e França [21]) mostraram que os resultados com rejeitos da produção de aço e da produção de cobre, apresentaram superioridade significativa nos testes de desempenho. Também demonstraram que a escória de aço e o rejeito de cobre satisfizeram as especificações para obras rodoviárias da Malásia, exceto para a absorção de água. Os autores atribuíram a alta porcentagem de absorção ao maior número de poros em sua área superficial em comparação com o granito, mas que este resultado não é um grande problema, pois esses materiais tiveram a menor formação de trilha de roda no pavimento. A vantagem ambiental desses materiais supera as possíveis deficiências, pois reduz custos e recursos naturais na construção de estradas [20]. Silva et al. [4] utilizou rejeitos de minério de ferro para a confecção de blocos intertravados para a pavimentação, com concentrações variando de 0, 50 e 100% em substituição a areia fina usada na produção do bloco.

Embora concluíssem que esse tipo de rejeito não atende a substituição total da fração de areia, eles perceberam que podem substituir parcialmente a areia, corroborando a ideia do avanço para a sustentabilidade da mineração.

Nem sempre rejeitos de mineração podem ser utilizados na construção de pavimentos. Os trabalhos de Lam et al. [22] utilizando de rejeitos da mineração do cobre para a produção de paralelepípedo com adição de cimento, mostraram que estes rejeitos não atendem a especificação chilena de construção. As misturas cimento-rejeitos não atingiram as resistências necessárias para a confecção de paralelepípedos. Por outro lado, os rejeitos apresentam teores de finos, passados na peneira #200 (0,075mm), superiores aos padrões, aumentando consideravelmente o consumo de água, o que implicou na adição considerável de agentes plastificantes para reduzir essa quantidade de água utilizada. Este trabalho indica que a utilização de rejeitos de mineração deve ser pontuada e categorizada de acordo com a região e a característica dos rejeitos. Valer ressaltar que os rejeitos são ímpares, pois envolvem desde a sua origem

(pedologia) ao seu processamento, que por mais semelhantes que sejam com outros rejeitos de natureza próxima, possuem propriedades que devem ser estudadas individualmente. A prática experimental diária com rejeitos de mineração nos leva a este entendimento. Esse fundamento é corroborado com as pesquisas de Xu et al. [23] que utilizou rejeitos como microestruturas cimentantes em aterro, junto com outros materiais, obtendo resultados favoráveis. O uso de rejeitos em pavimentação também foi descrito no capítulo especial do livro “Qualidade e Sustentabilidade na Construção Civil” de Oda et al. [6], trazendo as particularidades e uma revisão teórica sobre o estado da arte na utilização destes materiais, mostrando a combinação com o concreto e sua utilização em estabilização e camadas de solos. O estado da arte na utilização dos rejeitos de mineração está exatamente no entendimento das propriedades intrínsecas destes materiais e suas aplicações pontuais, como destacados neste trabalho.

## 2 Materiais e métodos

Os métodos utilizados neste trabalho são padronizados pelas Normas Brasileira - NBR da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, aplicáveis a solos e agregados minerais, uma vez que não existem normas específicas para rejeitos de mineração. Também serão utilizadas normas Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT (antigo DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagens) específicas para os materiais utilizados na pavimentação. Esclarecendo, o nome DNER, citado neste trabalho, deixou de existir em 2003, passando a ser o atual DNIT, sem que a nomenclatura das normas fosse alterada, mantendo a codificação original. Em alguns casos, serão citadas normas internacionais da *American Society for Testing And Materials* - ASTM que também são aceitas pelo DNIT.

### 2.1 Ensaio de caracterização de agregados

Foram coletadas amostras de rejeitos do beneficiamento de minério de ferro e rejeitos do beneficiamento de cobre, provenientes de jazidas localizadas no quadrilátero ferrífero do estado de Minas Gerais, conforme a norma brasileira DNER-PRO 003/94.

A caracterização granulometria visa conhecer a distribuição das frações de agregados. Na composição do Concreto Betuminoso Usinado a Quente - CBUQ, o DNIT determina faixas adequadas ao projeto da camada de rolamento com valores limites mínimos e máximos aceitáveis por faixa granulométrica. Paralelamente também foram realizados ensaios em amostras comerciais de brita 1, brita 0, areia e pó de pedra visando posteriormente a composição do CBUQ. Os resultados de granulometria foram apresentados na Tabela 1.

As amostras coletadas foram devidamente misturadas, homogeneizadas e representam um pool de pontos de duas barragens distintas de uma mesma região, sendo a primeira

**Tabela 1.** Resultados de granulometria dos agregados conforme especificação DNIT

Peneiras		% Passante Acumulado					
Pol	mm	RF	RC	Brita 1	Brita 0	Areia	Pó de pedra
1"	25,4			100,0			
3/4"	19,1			96,6			
1/2"	12,7				100,0		
3/8"	9,5			4,9	97,8		
1/4"	6,4	100,0	100,0			100,0	
Nº 4	4,8	99,8	98,7	0,02	54,2	99,8	100,00
Nº 8	2,4	98,5	61,4		11,5	96,3	99,9
Nº 10	2,0	90,2	51,3		8,9	94,96	99,6
Nº 16	1,2	81,9	50,3				
Nº 30	0,59	37,2	49,0				
Nº 40	0,42	28,0	48,0		2,6	28,2	51,5
Nº 50	0,3	24,2	45,3				
Nº 80	0,18				1,5	14,3	18,4
Nº 100	0,15	12,9	21,7				
Nº 200	0,075	0,6	0,7		0,6	1,1	3,0

**Tabela 2.** Resultados do ensaio de compactação e CBR

Característica	RF	RC	Norma
Densidade seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	3,3850	3,2054	DNIT ME 413/2021
Umidade ótima (%)	10,9	11,5	NBR 7182/20
CBR (%)	7	8	NBR 9895/16
Expansibilidade (%)	<0,05	<0,05	
Limites de Atterberg: Limite de liquidez (%) e índice de plasticidade	NP*	NP*	NBR 6459 e NBR 7180/16
Equivalente de areia (%)	57,0	23,2	DNER-ME 054/97
Densidade real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	3,7540	3,5740	NBR 7182/20

\* NP = Não Plástico.

**Tabela 3.** Resultados dos ensaios do CAP 30/45

Ensaio	Resultado	Metodologia
Densidade 20/4 °C (g/cm <sup>3</sup> )	1,0069	ASTM D70
Viscosidade CP a 135 ° C	400	NBR 15184 e ASTM D4402
150 ° C	203,5	
177 ° C	76,0	
Penetração (mm <sup>-1</sup> )	40	NBR 6576
Ponto de amolecimento (°C)	53,0 °C	NBR 6560
Índice de Susceptibilidade Térmica - IST	-1,0	Calculado
Adesividade ao agregado graúdo	Passa	DNER ME078/94
Adesividade ao agregado miúdo	Pó de pedra – ótima	DNER ME 079/94

RC e RF: 0 / 4: satisfatória

do processamento de minério de ferro e a segunda do processamento de cobre. A origem exata da composição das amostras que foram coletadas, tanto da barragem de rejeito de ferro quanto da barragem de rejeito de cobre não será informada, atendendo a solicitação dos fornecedores dos rejeitos. Embora os rejeitos aqui sejam tratados como uma amostra composta representativa, todos os ensaios realizados foram feitos em triplicata reportando nas Tabelas 2 e 3 os resultados médios obtidos. A caracterização de agregados para o DNIT possui uma gama de ensaios que devem ser

realizados. Entretanto, neste trabalho de viabilidade técnica, foram realizados apenas os ensaios mais críticos que são mandatórios para a construção de camadas de base para a pavimentação.

O ensaio de adesividade representa a interação entre o agregado e do CAP. A adesividade indica a capacidade do agregado ser recoberto por uma película de ligante, promovendo a adesão sem que haja soltura do agregado. Essa adesão se dá devido a diferença de carga elétrica entre o agregado e o ligante. Materiais que não apresentam

adesividade carecem de uso de aditivos para a estabilização do concreto asfáltico. Caso os resultados de adesividade dos agregados não sejam satisfatórios, neste trabalho não serão utilizados aditivos melhoradores de adesividade, visto que o propósito é avaliar o rejeito in natura.

A caracterização química dos rejeitos não foi realizada, uma vez que a empresa fornecedora do rejeito certifica que são rejeitos inertes em relação a contaminação ambiental por lixiviação ou qualquer outro processo, e sem risco para a manipulação dos mesmos em laboratório.

Neste trabalho estas amostras serão denominadas apenas como “rejeito de ferro - RF” e “rejeito de cobre - RC”. A preparação das amostras consistiu em secagem a temperatura ambiente, seguida de destorroamento e homogeneização, garantindo a representatividade do volume amostral. A Figura 1 mostra o aspecto das amostras de rejeitos de minério de ferro e cobre, respectivamente.

### 3 Resultados e discussões

A caracterização das amostras foi realizada com base nos ensaios obrigatórios de especificação do DNIT para a construção de pavimentos.

#### 3.1 Caracterização do rejeito para uso nas camadas do pavimento

Observa-se, conforme o Tabela 1, que os rejeitos tem grande porção de arenosos, o que implica em não apresentar limite de liquidez e plasticidade, conforme resultados de ensaio apresentados na Tabela 2. Este fato sugere que os rejeitos podem ser adicionados em uma composição com solos mais

argilosos, promovendo uma estabilização da camada, com melhor distribuição e estabilidade granulométrica, o que poderia reduzir algumas propriedades como expansibilidade e/ou plasticidade dos solos, conforme corrobora os trabalhos de Santos e Meneguelli [14]. Este fato sugere também que sua utilização pura em uma camada do pavimento não seria recomendável, mas sim, uma utilização composta com um material argiloso, visando atender as especificações de determinada camada do pavimento.

O ensaio de índice de suporte California – CBR, é um dos principais ensaios na determinação da resistência das cargas pra as camadas de base e sub-base dos pavimentos. A especificação DNI ES 098/2007 e 031/2006 estabelecem os limites mínimos e máximos de valores para cada camada do pavimento [11]. Os resultados do CBR e expansibilidade dos RF e RC, sugerem que eles poderiam ser utilizados diretamente na camada de reforço de subleito, tendo CBR >2% e a expansibilidade é menor que 1% (limite mínimo recomendável pelo DNIT). Entretanto, não poderiam ser utilizados diretamente em camada de sub-base, onde o CBR deve ser maior que 20%. Como observação, a maioria dos solos brasileiros não apresentam CBR > 20%, e neste caso, os solos utilizados nas camadas de base precisam ser estabilizados com aditivos químico ou composição com outros materiais. Reforçando os trabalhos de Santos e Meneguelli [14], a composição granulométrica com outros solos é bem vista neste aspecto.

O resultado de ensaio de equivalente de areia reportado na Tabela 2, mostra que o RC < RF. O limite DNIT para camadas estabilizadas para solos lateríticos é de 30% (DNIT ES 098/2007) e para composição do CBUQ é > 55% (DNIT ES 031/2006). O valor de 23,2% para o RC



Figura 1. Amostra de RF (a) e RC (b).

o inviabiliza para a utilização na camada de sub-base ou para compor o CBUQ, mas poderia ser para a camada de reforço de subleito, que não apresenta esta especificação. Entretanto, o RF apresenta valores satisfatórios tanto para a camada de sub-base quanto o CBUQ. Para a composição do CBUQ, o RF substituiria parte das frações arenosas, uma vez que sua granulometria se apresenta nas frações finas. É importante salientar neste aspecto que os rejeitos variam significativamente de uma jazida para outra, e que a caracterização dos rejeitos deve ser realizada de modo pontual, e não generalizada. Isso implica que mesmo que o rejeito utilizado neste estudo não se enquadre para compor o CBUQ, como o RC, outro rejeito de outra localidade poderia ter essa propriedade com valor diferente. Essa observação se faz necessária, considerando que cada rejeito de uma localidade é ímpar, conforme corrobora Boger, e Sofrá e Boger, (Appud [21]). O equivalente de areia na amostra de pó de pedra de rocha gnaisse atende a todas as especificações DNIT [13]. O equivalente de areia na amostra de pó de pedra de rocha gnaisse atende a todas as especificações DNIT. Ainda na Tabela 2, sobre os limites de Altberg, os rejeitos não apresentam plasticidade, confirmando a característica arenosa dos mesmos.

A Tabela 3 mostra os resultados de ensaio de caracterização do asfalto (CAP 30/45) utilizado na composição do CBUQ com os rejeitos.

### 3.2 Resultados dos ensaios em relação à composição da mistura asfáltica

O ensaio de adesividade ao agregado graúdo está aceitável dentro das especificações do DNIT [11 e 13]. A adesividade ao agregado miúdo para o pó de pedra foi boa, no entanto, para os rejeitos foi apenas satisfatória, exceto para a solução “0”, que foi má, devido a diferença de cargas entre o rejeito e o CAP. Isto não determina ser um problema, mas implica que para o uso destes rejeitos no

CBUQ, deve-se utilizar um dope, como a cal hidratada [16], garantindo a adesividade das frações finas da massa asfáltica. A dosagem do dope, em geral varia de entre 1 a 2%, deve ser determinada experimentalmente na produção do CBUQ.

O CBUQ, é uma mistura asfáltica produzida com agregados pétreos (neste trabalho foram utilizados Brita 1, Brita 0, Areia e Pó de pedra calcáreo) e CAP. Neste CBUQ, utilizamos como parâmetro a faixa granulométrica “C” do DNIT, cuja granulometria percentual é apresentada na Tabela 4. Primeiramente foi feito Corpos de Prova - CP sem os rejeitos e posteriormente com os rejeitos, substituindo a fração areia, para efeitos comparativos.

A diferença dos percentuais dos corpos de prova – CP com rejeito e sem rejeito se faz necessário para enquadrar a especificação DNIT faixa “C”, uma vez que os rejeitos substituem grande parte da fração arenosa e fração fina da faixa, como apresentado na Figura 2.

Os corpos de prova da metodologia Marshall (CP) - DNIT ES 031/2006, foram compostos com 75 golpes por face (carga para alto tráfego). O teor ótimo de CAP foi determinado com base no volume de vazios ( $V_v$ ) e na relação betume vazios (RBV), para faixa “C” com os agregados sem os rejeitos pela metodologia Marshall. Em seguida, foi substituída a fração fina dos agregados pelos rejeitos de ferro e cobre separadamente, e feito nova dosagem Marshall seguindo a Tabela 4 e mantendo-se o teor ótimo de CAP encontrado, conforme a Tabela 5.

Conforme DNIT ES 031/2006 os limites aceitáveis da estabilidade Marshall para 75 golpes é  $> 500$  Kgf e fluência entre 3,0 a 4,5 mm. Os resultados dos ensaios estão dentro dos valores limites da especificação DNIT, o que indica que neste aspecto, os rejeitos, mesmo com valores mais baixos que o CP com areia, não prejudicam a estabilidade se utilizados na massa asfáltica, pois estão acima do valor mínimo de referência. Em um projeto de pavimentação, é recomendável determinar o teor de CAP no CBUQ já com a adição direta de rejeito, o que otimizaria ainda mais a utilização do rejeito e do teor de CAP. A opção de substituir apenas a fração fina é uma avaliação de consistência pontual visando viabilizar o projeto.

Tem sido observado que em alguns estados do Brasil, como São Paulo, a fluência máxima é de 4mm. Nos resultados apresentados, esse valor pode ser facilmente ajustado, bastando fazer a correção da fração fina do CBUQ, que, no primeiro plano, é responsável direto pela fluência da massa asfáltica.

**Tabela 4.** Composição do CBUQ com agregados e com rejeitos

Agregados	Composição sem rejeito	Composição com RF e RC separadamente
Brita 1 (%)	17	17
Brita 0 (%)	36	33
Areia (%)	21	5
Pó de Pedra (%)	26	20
Rejeito (%)	0	25

**Tabela 5.** Resultados Marshall

Característica	CP com RF	CP com RC	CP sem rejeito	Norma
Teor ótimo de CAP		5,8% ± 0,3%		DNER ME 043/95; DNIT ES 031/06
Estabilidade Marshall (Kgf)	1481	1268	2460	
Fluência Marshall (mm)	4,0	3,9	4,5	

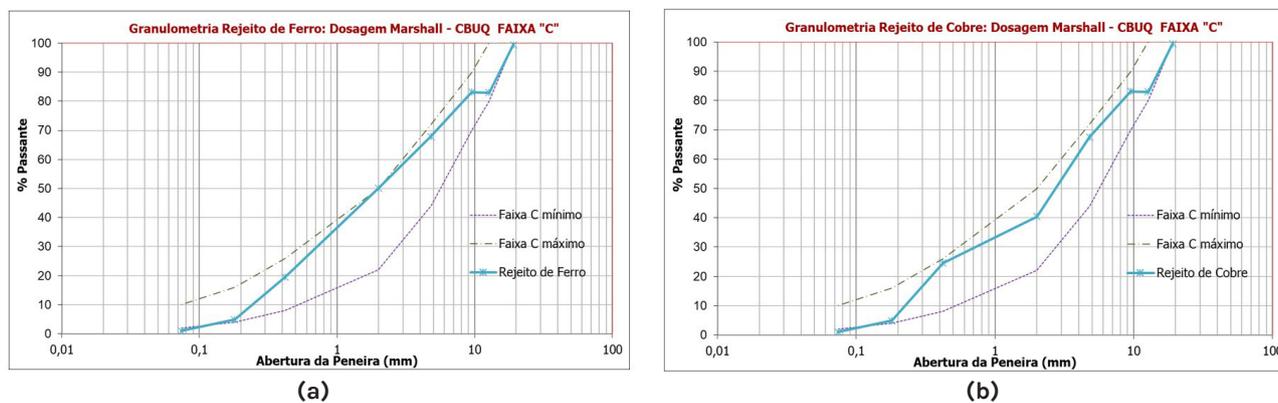


Figura 2. Curvas granulométricas com RF (2a) e RC (2b) e com agregados pétreos.

#### 4 Conclusões

Rejeitos de mineração são subprodutos oriundos do processamento e beneficiamento de minerais nobres, como o ferro e o cobre, e representam um passivo que são dispostos, na maioria das vezes, em barragens. e mesmo que esses rejeitos fossem dispostos em pilha, continua sendo passivos da mineração. No entanto, esses rejeitos apresentam um grande potencial para serem reaproveitados na pavimentação. A utilização de RF tem mais qualificações que atendem as especificações de serviço da pavimentação, seja como camada de reforço de subleito, ou na composição percentual de sub-base, ou ainda na substituição parcial de frações arenosas na composição do CBUQ, dada sua granulometria e características dentro das especificações do DNIT. Isso implicaria na redução direta da quantidade de naturais britados extraídos das jazidas. Por outro lado, o RC apresenta limitações em suas propriedades, como o equivalente de areia, que limita as utilizações na camada de sub-base, mas que poderia ser utilizado substituindo

diretamente um material de uma camada de reforço de subleito, junto com um percentual ajustado de solo argiloso, conforme Santos e Meneguelli [14]. Entretanto, o RC analisado não poderia compor a massa asfáltica devido ao valor do equivalente de areia ser menor que o mínimo de 55%, estipulado pelo DNIT.

Os rejeitos são de natureza heterogênea, devido a variação de origem pedológica na extração, o que poderia trazer alguns cuidados na sua utilização na pavimentação. Como exemplo, a recomendação é que possam ser processados em lotes de materiais que garantam a homogeneidade em volumes definidos, com controle das propriedades básicas de cada lote. O controle da qualidade destes materiais deve ser mais efetivo garantido que as possíveis variações estejam sob controle. As características básicas como massa específica, granulometria, limites Atterberg, CBR e expansibilidade, devem ser periodicamente revistas.

Por fim, essa possibilidade de utilização dos rejeitos de mineração representam uma menor extração materiais naturais britados finos, aumentando a sustentabilidade operacional da atividade de mineração.

#### Referencias

- 1 Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não Energéticas. Brasília: IPEA; 2012. p. 10.
- 2 Damasceno GC. Especialização em mineração e meio ambiente: geologia, mineração e meio ambiente. Cruz das Almas: SEAD/EAD UFRB; 2017. 51 p.
- 3 Alves PIA. Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens [dissertação]. Ouro Preto: UFOP; 2020.
- 4 Silva RMR, Nunes RM, Nogueira FC, Silva FL. Aproveitamento do rejeito de minério de ferro da Mina do Andrade para a confecção de blocos intertravados. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração; 2023;20:e2660. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20222660>.
- 5 Fundação Estadual do Meio Ambiente. [acesso em 2015 fev. 2023]. Disponível em: <https://feam.br/w/feam-publica-inventario-de-residuos-solidos-da-mineracao>
- 6 Oda S, Sá TSW, Toledo RD Fo, Balthar VKCBLM. Uso de rejeitos de mineração em pavimentos rodoviários: um referencial teórico. São Paulo: Editora Científica Digital; 2021. <https://doi.org/10.37885/210805932>.

- 7 Gurgel JFS, Xavier SCR, Amaral IBC, Araujo AD, Reis AB. Coprocessamento de rejeito do Garimpo Areinha (Diamantina/MG) para produção de cerâmica vermelha. *Revista Matéria*. 2020;25(3):e-12814. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200003.1114>.
- 8 Dantas AAN. Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação [dissertação]. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2015.
- 9 Silva AGG. Cadeia produtiva do cobre. Belo Horizonte: UFMG; 2011.
- 10 Lima CDA, Motta LMG, Aragão FTS. Ensaios de deformação permanente: efeito do número de ciclos na interpretação do comportamento de solos e britas. *Revista Matéria*. 2021;26(3):e13044. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13044>.
- 11 Bernucci LB, Motta LMG, Ceratti JAP, Soares JA. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA; 2008. 11 p.
- 12 Dias N. Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional [dissertação]. Vitória: UFES; 2017
- 13 Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT; 2006. 95 p.
- 14 Santos JR, Meneguelli MRS. Estudo da viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério de ferro na camada de sub-base de pavimentação rodoviária. Espírito Santo: IFES; 2021.
- 15 Medeiros MA, Luz TEB, Dantas AAN, Costa VP. Levantamento quantitativo de resíduos oriundos da mineração no estado do Rio Grande do Norte para potencial uso em obras rodoviárias. In: Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG 2016; 2016 outubro 19-22, Belo Horizonte, Minas Gerais. São Paulo: ABMS; 2016.
- 16 Simonsen AMT, Solismaa S, Hansen HK, Jensen PE. Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. *Waste Management*. 2020;102:710-721. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.037>.
- 17 Cao L, Zhou J, Zhou T, Dong Z, Tian Z. Utilization of iron tailings as aggregates in paving asphalt mixture: a sustainable and eco-friendly solution for mining waste. *Journal of Cleaner Production*. 2022;375:134126.
- 18 Apaza FR, Guimarães ACR, Vivoni AM, Shroder R. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction & Building Materials*. 2021;266:121020. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121020>.
- 19 Mourão BG, Martinez JGB, Carvalho JC, Lucena LC. Ligante asfáltico modificado com rejeito de mineração de ferro. In: Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG 2016; 2016 Outubro 19-22; Belo Horizonte, Minas Gerais. São Paulo: ABMS; 2016.
- 20 Oluwasola EA, Hainin MR, Aziz MMA. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*. 2015;2:47-55.
- 21 Trampus BC, França SCA. Reologia aplicada ao desaguamento de polpas minerais para a produção de pastas - Rheology applied to dewatering of mineral pulps to paste production In: Anais da VI Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM; 2017; Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro: CETEM.
- 22 Lam EJ, Zetola V, Ramirez Y, Montofré IL, Pereira F. Making paving stones from copper mine tailings as aggregates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(7):2448.
- 23 Xu W, Cao P, Tiam M. Strength development and microstructure evolution of cemented tailings backfill containing different binder types and contents. *Minerals (Basel)*. 2018;8:167.

Recebido: 28 Fev. 2024

Aceito: 12 Set. 2024