

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Bolsa a Iniciação Científica e Tecnológica Institucional da FAPEMIG (PIBIC-FAPEMIG), Engenharia Civil

Diego Augusto Santos

**UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO *IN NATURA* PARA A PRODUÇÃO DE  
CAMADAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Belo Horizonte

2023

Diego Augusto Santos

**UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO *IN NATURA* PARA A PRODUÇÃO DE  
CAMADAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Projeto apresentado no Programa de Iniciação Científica, no curso Engenharia Civil de Graduação da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Número do Projeto: 28467

Orientador: Getúlio Francisco Manoel

Belo Horizonte

2023

## AGRADECIMENTO

*Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela oportunidade de poder construir este trabalho o qual espero que seja de grande valia com o intuito de se causarem profundas transformações na sociedade brasileira. Por outro lado, agradeço minha mãe e meu irmão pelo apoio constante em toda a minha caminhada acadêmica, fortalecendo-me, estando sempre presente principalmente nos momentos mais difíceis. Também agradeço Carla Fernandes, uma verdadeira tia para mim que tanto me ajudou e esteve ao lado de minha família nas situações mais angustiantes de minha vida. Agradeço aos céus, a terra, o mar e a toda a Terra pela forma com a qual me mantém vivo, proporcionando-me os mais variados recursos para que eu me mantenha produzindo obras que corroborem com o bem estar da humanidade. E por fim, mas não menos importante, agradeço a você Matheus Faleiro por estar comigo desde a minha entrada na PUC Minas, fazendo-me me sentir o mais importante sujeito no mundo por um amor tão sublime que transcende qualquer barreira que se possa firmar entre nós. Por você, dedico toda esta obra intelectual, pois você sempre me inspirou a realizar coisas que sempre me fizessem o impressionar, buscando, com isso, sua plena atenção para comigo. Obrigado por tudo, Matheus! Você me deu um universo do qual sou a pessoa mais feliz e grata por ter uma pessoa tão especial como você ao meu lado. Que Deus sempre esteja ao seu lado, abençoando-o, protegendo-o e livrando-o de todo o mal. Estarei contigo até minha morte e sei muito bem que isto está profetizado em nosso destino. Te amo, Theus!*

**Utilização de rejeito de ferro e cobre  
*in natura* da mineração nas camadas  
de pavimento flexível.**

Use of *in natura* iron and copper waste  
from mining in flexible pavement layers

Diego Augusto Santos, Getúlio Francisco Manoel, Lorena  
Bruna Souza Leão, Giovanna da Silva Nogueira, Marcus  
Vinicius Teixeira Barbosa, Guilherme de Almeida Silva,  
Rayssa Monique Martins Gama, Josias Ladeira.

Pontifícia Universidade Católica de Minas Geras – PUC Minas

e-mail: getmanoel@yahoo.com.br, diegoaugusto79@yahoo.com.br, lorennabrunas@gmail.com, giovannasilvanogueira@gmail.com, marcusbba5@gmail.com, guilhermealmeid@outlook.com, rayssammgama@gmail.com, proqual@uol.com.br

---

**RESUMO**

A mineração desempenha um papel fundamental na sociedade contemporânea, uma vez que é responsável por prover uma grande variedade de recursos minerais utilizados em diversas atividades. Através da mineração, são obtidos minérios de ferro, bauxita, manganês e níbio, 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 minérios se torna um grande desafio para a mineração. Uma alternativa seria empregar o rejeito na construção das camadas dos pavimentos. Este estudo avalia a aplicabilidade de rejeitos de minério de ferro e cobre em pavimentos rodoviários, bem como os procedimentos laboratoriais para controle tecnológico. 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, em substituição a fração arenosa das composições. Já 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, ferro, cobre, pavimentação, controle tecnológico  
Keywords: mining, mining tailings, iron, copper, paving, technological control

---

**ABSTRACT**

Mining plays a fundamental role in contemporary society, since it is responsible for providing a wide variety of mineral resources used in various activities. Through mining, iron, bauxite, manganese and niobium ores are obtained, which 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 ore beneficiation process becomes a major challenge for mining. An alternative would be to use the tailings in the construction of the pavement layers. This study evaluates the applicability of iron ore and copper tailings in road pavements, as well as laboratory procedures for technological control. The results of this work suggest that the iron ore tailings can be used more comprehensively both in the subgrade reinforcement layer and in the asphalt mixture, replacing the sandy fraction of the compositions. Copper tailings, on the other hand, have limitations in their use as subgrade reinforcement, and are not recommended for use in asphalt mix.

---

**1. Introdução**

Os recursos minerais são fundamentais para a 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. Entre eles temos o material estéril e o rejeito propriamente dito. O estéril são os materiais sólidos concebidos através da lavra e que a concentração do mineral de interesse está abaixo da economicidade, o que também implica que esse tipo de material não sofreu nenhum processamento ou beneficiamento. Já o rejeito, objeto deste estudo, é uns resíduos sólidos resultante do processo de beneficiamento do mineral de interesse e se apresenta como um material sem valor econômico e que precisa de destinação adequada. [1].

Um dos maiores desafios associados a mineração, é a disposição de rejeitos oriundos do processo de beneficiamento de minérios [3]. Em 2018, a Fundação Estadual de Meio Ambiente conhecida também como FEAM, emitiu o Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração correspondente ao ano de 2017 e verificou-se que foram inventariados aproximadamente 562 milhões de toneladas de resíduos no Estado, sendo que 51,55% referem-se ao rejeito, 48,41% ao estéril e 0,04% são resíduos diversos [4]. Devido à alta produção de rejeito, se faz necessário o desenvolvimento de soluções customizadas para aplicação deste material e, dentre elas, há a alternativa de emprego na construção de pavimentos [5]. Este material quando descartado de maneira inadequada, pode impactar negativamente a sociedade e o meio ambiente [6].

O ferro (Fe) é um elemento metálico, encontrado comumente em depósitos de formação ferrífera bandada, chamados também de itabirito, através de minerais, como hematita, magnetita, etc [7]. 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 [8]. Dado a importância destes metais na produção industrial, e tendo em vista que a pavimentação utiliza grandes volumes de materiais na construção das estradas, este estudo visa o aproveitamento de rejeitos oriundos da mineração de ferro e cobre, com vistas a aplicação na pavimentação.

Uma das principais modalidades de transporte para deslocamento de pessoas e cargas, é o modal rodoviário, desta forma, é imprescindível que os pavimentos cumpram com o seu papel [9]. Pavimento pode ser definido como a estrutura que pode ser composta por inúmeras camadas de espessuras finitas e que usualmente é confeccionada após o término da terraplanagem, com a finalidade de suportar as cargas oriundas do tráfego e promover melhores condições de rolamento aos usuários [10]. Os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, rígidos e semirrígidos. Os categorizados como flexíveis, são aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica, contudo, não trabalham a tração. Este tipo de pavimento caracteriza-se pela distribuição da carga, onde a camada mais próxima da superfície deverá ser composta por material de melhor qualidade, garantindo assim, maior capacidade de suporte. Os demais tipos de pavimento, não serão estudados neste respectivo trabalho [11].

De acordo com o estudo feito por SANTOS *et. al* [12], uma amostra de 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 possa ser substituído, garantindo boa trabalhabilidade, mistura e facilidade de execução. Desta forma, conforme avaliado por SÁ *et. al* [5] a utilização de rejeitos de mineração trás pontos relevantes como: destinar de maneira segura e sustentável o material que seria disposto em barragens e/ou pilhas em caráter definitivo, reduzir o consumo de material em obras de pavimentação promovendo menores impactos ambientais e custos.

Este estudo tem como finalidade discutir a aplicabilidade de rejeitos de minério de ferro e cobre provenientes da mineração no pavimento rodoviário.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Os métodos utilizados neste trabalho são padronizados pelas Normas Brasileira - NBR ou metodologia referenciada pelo DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, para aplicação na pavimentação.

### **2.1 Ensaio 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, conforme norma DNER-PRO 003/94.

A origem exata destas amostras não será informada, atendendo a solicitação dos fornecedores dos rejeitos. Neste trabalho estas amostras serão denominadas apenas como rejeito de ferro e rejeito de cobre. As amostras em questão, foram coletadas, identificadas e transportadas para o Laboratório da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC – Minas. A preparação das amostras consistiu em secagem a temperatura ambiente, seguida de destorroamento e homogeneização, garantindo a continuidade do volume amostral. A figura 1 mostra o aspecto das amostras de rejeitos de minério de ferro e cobre, respectivamente. Em sequência, seguem as descrições dos ensaios de caracterização dos materiais.

a) Granulometria

**Figura 1:** Amostra de rejeito de ferro (a) e cobre (b)



A partir da granulometria, avaliamos as estruturas visando a distribuição das frações para efeitos de estabilização granulométrica nas camadas de base, e composição do CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente). No caso do CBUQ, o DNIT determina faixas adequadas ao projeto da camada de rolamento com valores limites mínimos e máximos aceitáveis por faixa granulométrica. Os rejeitos foram destorroados e peneirados para o ensaio de granulometria. Paralelamente também foram realizados ensaios em amostras comerciais de brita 1, brita 0, areia e pó de pedra visando posteriormente a composição do CBUQ. O ensaio é normatizado pela NBR 7181/2016 para solos e norma DNIT 412/2019 para o CBUQ. Os resultados de granulometria foram apresentados no Quadro I.

Quadro 1: Resultados de granulometria dos agregados

PENEIRAS		% PASSANTE ACUMULADO					
Pol	mm	Rejeito de ferro	Rejeito de cobre	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

b) Compactação e CBR

A compactação tem como finalidade garantir uma melhoria nas propriedades mecânicas do solo, redução da compressibilidade e da permeabilidade e aumento da resistência e redução dos vazios. A curva de compactação é um procedimento realizado com adição controlada de água, onde se obtém um gráfico de densidade seca versus umidade determinando a umidade ótima em que o solo deverá ser compactado, conforme norma NBR 7182.

O ensaio CBR - *California Bearing Ratio*, comumente conhecido como ISC (Índice de Suporte Califórnia), determina a capacidade de suporte do solo compactado e saturado. O CBR Consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente. Essa relação é expressa em porcentagem. Este ensaio é dividido em 3 (três) fases, sendo a primeira, a compactação dos corpos de prova, a segunda é a imersão dos mesmos em água por 96 horas visando o pior cenário do material em serviço na pista, e também para se obter a expansibilidade do material.

#### c) EQUIVANTE DE AREIA

O ensaio de equivalente de areia é utilizado para determinar a quantidade de materiais finos plásticos argilosos presentes na fração de areia. A especificação do valor de equivalente de areia nos materiais utilizado na camada de base com solos lateríticos dos pavimentos deve ter um valor superior a 30% (DNIT 098/2007 – ES). Na mistura tipo CBUQ (concreto Betuminoso Usinado a Quente) o valor deve ser superior a 55% (DNIT 031/2006 – ES).

#### d) Limite de liquidez e índice de plasticidade

Os ensaios denominados limites de liquidez (LL) e de Plasticidade (LP), chamados também de Limites de Atterberg, visam determinar os limites de consistência do material, sendo que o LL estabelece o teor de umidade na mudança do estado líquido para plástico, com o auxílio do aparelho de Casa Grande e o LP, estabelece o menor valor de umidade em que o material se comporta plasticamente, a partir de uma placa esmerilhada e, um gabarito com 3mm de diâmetro. Estes ensaios são normatizados pela NBR 6459:2016 e NBR 7180:2016, respectivamente. As referências para o LL e IP para solos estão listadas na norma DNIT 098/2007 – ES.

## 2.2 Ensaio Caracterização de ligante asfáltico - CAP

O CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo, é o principal ligante rodoviário, e dado ao seu custo, é o elemento mais impactante no orçamento da produção do CBUQ.

#### a) Ensaio de penetração e ponto de amolecimento em asfalto

Segundo a norma NBR 6576:2007 e DNIT 155/2010, o ensaio de penetração tem por objetivo determinar a dureza do CAP e os valores de especificação comercial conforme publicada pela Agência Nacional do Petróleo -ANP (2005) Consiste em penetrar uma agulha padrão com  $100,00 \pm 0,05\text{g}$  de carga, a uma temperatura  $25,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ , durante o intervalo de tempo de 5,0s em amostra de CAP totalmente submersa. O resultado é medido em  $\text{mm}^{-1}$ , além de classificar o CAP, indica a consistência e adureza do mesmo.

O ponto de amolecimento do CAP, pode ser determinado a partir da norma do DNIT 131/2010 e pela ABNT NBR 6560:2016. Em ambas, utiliza-se o método do Anel e Bola que consiste em moldar-se dois corpos de prova em anéis padronizados e que posteriormente, serão posicionados em um suporte e dentro de um béquer com água ou etileno glicol. Uma esfera de aço de  $3,000 \pm 0,005\text{g}$  é colocada sobre esse anel. A temperatura do ponto de amolecimento corresponde a temperatura em que a esfera de aço atravessa o anel de asfalto descendo a uma altura de 1 polegada.

#### b) ENSAIO DE VISCOSIDADE BROOKFIELD EM ASFALTO

De acordo com a ABNT NBR 15184, o ensaio de viscosidade rotacional Brookfield permite determinar a viscosidade de materiais betuminosos em temperaturas elevadas. Neste ensaio obtém-se as viscosidades em

3 temperaturas distintas, que são utilizadas, além da especificar o CAP, na inferência das temperaturas de usinagem na preparação do CBUQ e de compactação da massa asfáltica na pista.

c) Adesividade

Para estabelecer a capacidade do agregado aderir-se a mistura betuminosa, faz-se o ensaio conhecido como adesividade ao ligante asfáltico regido pelo método DNER-ME 078/94. Esse ensaio se fundamenta na interação entre das cargas elétricas dos agregados e o ligante asfáltico, que propicia uma cobertura do CAP em todos os agregados da mistura asfáltica. Espera-se que não ocorra nenhum deslocamento para que os resultados sejam considerados como aceitável.

d) Dosagem Marshall

O método de dosagem denominado Marshall foi desenvolvido por Bruce Marshall na década de 30, visando definir a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas a quente. A Estabilidade Marshall denota a capacidade de suporte do ligante quando submetido a carregamentos sem que o mesmo sofra deformações plásticas, e é parâmetro para a dosagem do teor de CAP no CBUQ. A fluência Marshall se refere a flexibilidade e escorregamento do material, ou a rigidez da mistura em baixas temperaturas. Os valores aceitáveis de deformações são especificados conforme norma DNIT ES 031-2006.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

Observa-se, conforme os dados indicados na granulometria do Quadro 1, que a amostra tem grande porção de arenosos, o que implica em não apresentar limite de liquidez e plasticidade apresentados na tabela 1 de resultados. Este fato sugere que os rejeitos podem ser adicionados em uma composição com solos mais argilosos, promovendo uma estabilização melhor distribuição e estabilidade granulométrica, o que poderia reduzir algumas propriedades como expansibilidade ou a plasticidade do solo. O fato de os rejeitos terem características arenosas, corrobora os trabalhos de SANTOS et. al [10], já citados, o que sugere que sua utilização pura em uma camada não seria recomendável, mas sim, uma utilização composta com um material argiloso seria mais viável em termos de propriedades da camada do pavimento.

Os resultados do ensaio de CBR e expansibilidade indicam que os rejeitos poderiam ser utilizados diretamente na camada de reforço de subleito, uma vez que o valor apurado é maior que o limite mínimo recomendável pelo DNIT de 2% e a expansibilidade é menor que 1%. Entretanto, não poderiam ser utilizados diretamente em camada de sub-base sem uma estabilização granulométrica ou estabilização química. Esse fato se enquadra na maioria dos solos brasileiros, o que implica que a utilização destes rejeitos, como os solos brasileiros, precisa de tratados antes de serem utilizados nesta camada. Reforçando os trabalhos de SANTOS et. al [10], a composição granulométrica com outros solos é bem-vista neste aspecto.

Em relação ao resultado de ensaio de equivalente de areia reportado na tabela 1, observa-se que neste caso, o rejeito de cobre apresenta valor mais baixo que o rejeito de ferro. O limite para camadas estabilizadas para solos lateríticos é de 30% (DNIT 098/2007 – ES). O valor de 23% para o rejeito de cobre não o habilita para ser utilizado na camada de sub-base e nem na composição do CBUQ, que apresenta limite mínimo >55%, conforme DNIT ES 031/2006, mas poderia ser para a camada de reforço de subleito, que não apresenta esta especificação. Entretanto, o rejeito de minério de ferro, pode ser utilizado tanto na camada de sub-base quanto no CBUQ, atendendo as especificações vigentes. Para o CBUQ, o rejeito de ferro 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 rejeito de cobre, 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 Boger, apud [13] e Sofrá e Boger, apud [14].

Foi realizado também um ensaio de equivalente de areia na amostra de pó de pedra de rocha gnaisse, que

será utilizada na composição básica do CBUQ na metodologia Marshall. A amostra de pó de pedra apresentou valor de equivalente de areia de 57,6%, atendendo a especificação mínima de > 55%. A Tabela 1 mostra os resultados de caracterização dos rejeitos de ferro e cobre. Os resultados indicam que os rejeitos não apresentam plasticidade, confirmando a característica arenosa dos mesmos. Pelo critério do CBR, os valores de 7 e 8% indicam que estes rejeitos poderiam compor a camada de reforço de subleito na pavimentação, atendendo as normas DNIT. A Tabela 2 mostra os resultados de ensaio de caracterização do asfalto utilizado na composição do CBUQ com os rejeitos.

**Tabela 1:** Resultados do ensaio de compactação e CBR

Característica	Rejeito De ferro	Rejeito de Cobre
Densidade seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	3,7540	3,5740
Umidade ótima (%)	10,9	11,5
CBR (%)	7	8
Expansibilidade (%)	<0,05	<0,05
Limite de liquidez (%)	NP*	NP*
Equivalente de areia (%)	57,0	23,2
Densidade real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	3,7540	3,5740

\* não plástico

**Tabela 2:** 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	
150° C	203,5	ASTM D4402
177° C	76,0	
Penetração (mm <sup>-1</sup> )	40	ASTM D5
Ponto de amolecimento (°C)	53,0°C	ASTM D36
IST	-1,0	Calculado
Adesividade ao agregado graúdo	Passa	DNER ME078/94
	Pó de pedra – passa	
Adesividade ao agregado miúdo	Rejeito 0 / 4: satisfatória	DNER ME 079/94

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

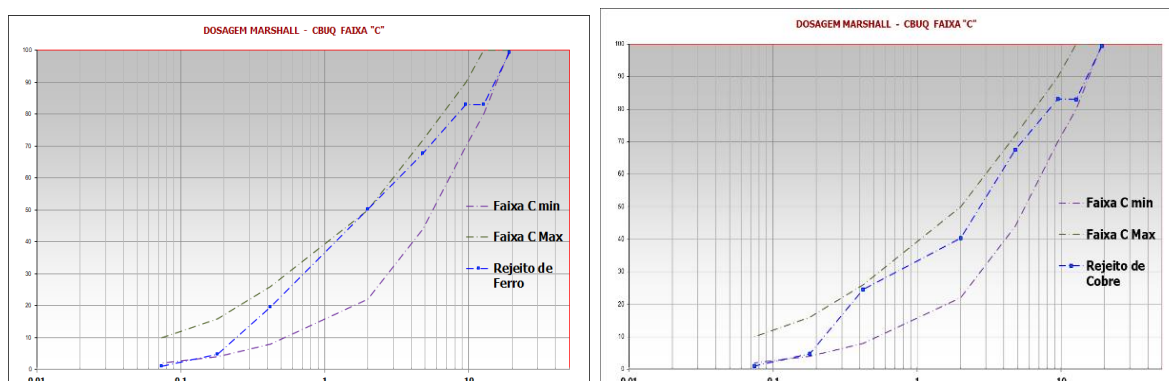
O ensaio de adesividade ao agregado graúdo está aceitável dentro das especificações do DNIT. A adesividade ao agregado miúdo para o pó de pedra foi boa, mas para os rejeitos foi apenas satisfatória, exceto para a solução 0, que foi má, o que implica que para o uso de rejeitos deve-se utilizar um dope garantindo a adesividade das frações finas da massa asfáltica.

O CBUQ, é produzido com uma mistura especificado de agregados base (Brita 1, brita 0, areia e pó de pedra) e ligante asfáltico, tendo como parâmetro a faixa granulométrica “C” do DNIT, conforme tabela 3. Posteriormente, foi feita a composição com os rejeitos de ferro e cobre separadamente, substituindo majoritariamente a fração areia, apresentando o efeito combinado da granulometria dos agregados na faixa “C”, conforme gráfico da Figura 2.

Tabela 3: Composição do CBUQ com agregados e com rejeitos

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

O gráfico da Figura 2 apresenta as curvas granulométricas com os rejeitos separadamente, na combinação do rejeito de ferro (2 a) e com o rejeito de cobre (2b) com os demais agregados.



Os corpos de prova (CP) foram compostos com 75 golpes por face. O teor ótimo de CAP foi determinado com base no volume de vazios (Vv) e na relação betume vazios (RBV), para faixa “C” com os agregados sem os rejeitos. Em seguida, foi substituída a fração fina dos agregados pelos rejeitos de ferro e cobre separadamente, e feita nova dosagem Marshall, mantendo-se o teor ótimo de CAP encontrado, conforme tabela 4.

Tabela 3: Resultados Marshal

Característica	Rejeito de Ferro	Rejeito de Cobre
Teor ótimo de CAP com rejeito de ferro	5,8% ± 0,3%	
Estabilidade Marshall (Kgf)	1481	1268
Fluência Marshall (mm)	4,0	3,9

Conforme DNIT ES 031/2006 os limites aceitáveis da estabilidade Marshall para 75 golpes, indica estabilidade > 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 não prejudicam a estabilidade se utilizados na massa asfáltica.

#### 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. Os rejeitos apresentam um grande potencial para serem reaproveitados na pavimentação. A utilização de rejeitos

de ferro apresenta grande potencial com propriedades 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. Já o rejeito de cobre apresenta limitações em suas propriedades, como 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 et al [10]. O rejeito de cobre analisado não poderia compor a massa asfáltica devido ao valor do equivalente de areia ser menor que o mínimo de 55%, estipulado pelo DNIT.

É importante lembrar que os rejeitos são únicos, isto é, cada lote de rejeitos pode ter variações de comportamento, o que implica na necessidade de rever as caracterizações básicas periodicamente quando utilizar rejeitos, seja na composição de camadas de base, seja na mistura asfáltica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (Campus Barreiro) e às Ligas Acadêmicas da Engenharia Civil (LAEC), em especial à Liga Acadêmica de Geotecnia (LAG), pelo apoio e incentivo, e a CiaLab – Companhia de Laboratório Ltda.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] IPEA, Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas, pp. 10, Brasília, 2012.
- [2] DAMASCENO, G. C., “Especialização em Mineração e Meio Ambiente: Geologia, Mineração e Meio Ambiente”, SEAD / EAD UFRB, Cruz das Almas, BA, 2017, 51p.
- [3] ALVES, P. I. A, Empilhamento de rejeito filtrado: A expansão de uma alternativa para substituição de barragens, Dissertação de M.Sc, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil, 2020.
- [4] FEAM, <http://www.feam.br/banco-de-noticias/1692-feam-publica-inventario-de-residuos-solidos-da-mineracao>. Acessado em fevereiro de 2023.
- [5] SÁ, T. S. W., ODA, S., et al., Uso de rejeitos de mineração em pavimentos rodoviários: um referencial teórico, Editora Científica Digital, 2021.
- [6] GURGEL, J. F. S., XAVIER, S. C. R., et al, “Coprocessamento de rejeito do Garimpo Areinha (Diamantina/MG) para produção de cerâmica vermelha.”. Revista Matéria. Recuperado de <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/38321/21037>
- [7] DANTAS, A. A. N., Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação, Dissertação de M.Sc, UFRN, Natal, RN, Brasil, 2015.
- [8] SILVA, A. G. G, “Cadeia produtiva do cobre”. UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2011.
- [9] LIMA, C. D. A. de., MOTTA, L. M. G., et al, “Ensaio de deformação permanente: efeito do número de ciclos na interpretação do comportamento de solos e britas.”. Revista Matéria. Recuperado de <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/44788/24137>

[10] BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., *et al.*, “Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros”. Rio de Janeiro. Petrobras: ABEDA, 2008, 11p.

[11] DNIT, “Manual de Pavimentação”, 3 ed., Rio de Janeiro, 2006, 95p.

[12] SANTOS, J. R., MENEGUELLI, M. R. S., *et al.*, “Estudo da viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério de ferro na camada de sub-base de pavimentação rodoviária”. IFES, Espírito Santo, ES, Brasil, 2021.

[13] DIAS, N., Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional; Dissertação de M. Sc, UFES, Vitória, ES, Brasil, 2017

[14] TRAMPUS, B. C., FRANÇA, S. C. A., Reologia aplicada ao desaguamento de polpas minerais para a produção de pastas - Rheology applied to dewatering of mineral pulps to paste production, VI Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM, 2017.