



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO  
PRETO – UFOP ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO**



**CÁSSIO FERREIRA BRIGOLINI NEME**

**AS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS, ECONÔMICAS E TÉCNICAS  
DO USO DE REJEITO DE MINÉRIO NA PAVIMENTAÇÃO  
ASFÁLTICA: UMA REVISÃO INTEGRATIVA**

**OURO PRETO - MG  
2024**

**CÁSSIO FERREIRA BRIGOLINI NEME**  
**cassio.neme@aluno.ufop.edu.br**

**AS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS, ECONÔMICAS E TÉCNICAS  
DO USO DE REJEITO DE MINÉRIO NA PAVIMENTAÇÃO  
ASFÁLTICA: UMA REVISÃO INTEGRATIVA**

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro de Produção na Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Produção.

**Professor orientador:** Mágnio Silvério Campos

**OURO PRETO - MG**  
**2024**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N433a Neme, Cassio Ferreira Brigolini.

As implicações ambientais, econômicas e técnicas do uso de rejeito de minério na pavimentação asfáltica [manuscrito]: uma revisão integrativa. / Cassio Ferreira Brigolini Neme. - 2024.  
42 f.

Orientador: Prof. Dr. Magno Campos.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Minas e recursos minerais - Rejeitos (Metalurgia). 2. Minas e recursos minerais. 3. Pavimentos de asfalto. I. Campos, Magno. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Cássio Ferreira Brigolini Neme**

### **As Implicações Ambientais, Econômicas e Técnicas do Uso de Rejeito de Minério na Pavimentação Asfáltica: uma revisão integrativa**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção

Aprovada em 20 de fevereiro de 2024.

Membros da banca

Prof.º Dr. º **Magno Silvério Campos** - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Me. **Renato Fernandes Ferreira** - Examinador Convidado - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Me. **Cristiano Luís Turbino de Franca e Silva** - Examinador Convidado - Universidade Federal de Ouro Preto

Magno Silvério Campos, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/02/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Magno Silverio Campos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/02/2024, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato Fernandes Ferreira, COORDENADOR(A) DE PROCESSOS E PROJETOS ORGANIZACIONAIS**, em 21/02/2024, às 21:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/02/2024, às 11:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0670373** e o código CRC **44E2D2CA**.

A Deus dedico mais esta etapa vencida. Aos meus pais, pelo apoio e amor incondicional, por sempre acreditarem em mim e me incentivarem. E a todos que de alguma forma estiveram presentes em mais essa conquista.

## RESUMO

NEME, Cássio Ferreira Brigolini. As implicações ambientais, econômicas e técnicas do uso de rejeito de minério na pavimentação asfáltica: Uma revisão integrativa. 2024. Monografia. Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Ouro Preto.

A atividade mineradora tem sido fundamental para o desenvolvimento econômico global ao longo das últimas décadas, proporcionando uma variedade de minerais que são componentes essenciais em diversos produtos e processos industriais. Nesse contexto, emerge a ideia de utilizar rejeitos de minério na pavimentação asfáltica como uma alternativa viável para lidar com esses desafios. Partindo desses pressupostos, o objetivo geral deste estudo é investigar as implicações econômicas e ambientais decorrentes do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica. Para tanto, a metodologia adotada para a realização deste estudo é a revisão integrativa, de caráter descritivo e exploratório, buscando garantir a abrangência e a profundidade necessárias ao estudo das implicações econômicas, ambientais e técnicas decorrentes do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica. A revisão integrativa realizada nesta monografia revelou uma ampla gama de estudos, evidenciando a viabilidade técnica e os benefícios ambientais e econômicos do uso de rejeitos de minério em pavimentos asfálticos. Os resultados destacam a potencialidade de reutilizar materiais que, de outra forma, seriam descartados, transformando-os em recursos valiosos para a construção civil. Este achado não apenas contribui para o avanço do conhecimento na área, mas também promove uma reflexão crítica sobre as práticas de engenharia, incentivando a adoção de soluções mais sustentáveis e eficientes.

**Palavras-chave:** Mineração. Rejeitos de Minério. Pavimentação Asfáltica.

## ABSTRACT

NEME, Cássio Ferreira Brigolini. The environmental, economic and technical implications of using ore waste in asphalt paving: An integrative review. 2024. Monograph. Degree in Production Engineering. Federal University of Ouro Preto.

Mining activity has been fundamental to global economic development over the last few decades, providing a variety of minerals that are essential components in various industrial products and processes. In this context, the idea of using ore waste in asphalt paving emerges as a viable alternative to deal with these challenges. Based on these assumptions, the general objective of this study is to investigate the economic and environmental implications arising from the use of ore waste in asphalt paving. To this end, the methodology adopted to carry out this study is an integrative review, of a descriptive and exploratory nature, seeking to guarantee the scope and depth necessary to study the economic, environmental and technical implications arising from the use of ore waste in asphalt paving. The integrative review carried out in this monograph revealed a wide range of studies, highlighting the technical feasibility and environmental and economic benefits of using ore waste in asphalt pavements. The results highlight the potential of reusing materials that would otherwise be discarded, transforming them into valuable resources for civil construction. This finding not only contributes to the advancement of knowledge in the area, but also promotes critical reflection on engineering practices, encouraging the adoption of more sustainable and efficient solutions.

**Keywords:** Mining. Ore Tailings. Asphalt Paving.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de seleção dos artigos para revisão integrativa .....24

**LISTA DE TABELA**

Tabela 1 - Número de estudos relacionados ao assunto .....	24
--	----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudos selecionados para a revisão integrativa .....	25
Quadro 2 - Considerações e resultados dos estudos selecionados .....	27

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	Rejeito de minério: Conceitos e tipos .....	14
2.2	Pavimentação asfáltica: Conceitos e tipos .....	15
2.3	Utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica .....	17
2.4	Benefícios econômicos do uso de rejeito de minério na pavimentação asfáltica .....	18
2.5	Benefícios ambientais do uso de rejeito de minério na pavimentação asfáltica .....	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO INTEGRATIVA</b> .....	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora tem sido fundamental para o desenvolvimento econômico global ao longo das últimas décadas, proporcionando uma variedade de minerais que são componentes essenciais em diversos produtos e processos industriais. No entanto, essa atividade também é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos, os chamados rejeitos de minério, que representam um desafio significativo em termos de gestão e disposição. Paralelamente, a indústria da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais, com um impacto ambiental considerável devido à exploração de agregados para a construção de infraestruturas como estradas e pavimentos.

Nesse contexto, emerge a ideia de utilizar rejeitos de minério na pavimentação asfáltica como uma alternativa viável para lidar com esses desafios. A perspectiva de usar um material descartado na produção de asfalto não só pode reduzir a demanda por agregados naturais, mas também contribui para a gestão adequada dos rejeitos de minério, minimizando os impactos ambientais e econômicos associados.

O objetivo geral deste estudo é investigar as implicações econômicas e ambientais decorrentes do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica. Este trabalho propõe quatro objetivos específicos, que são: 1) discutir os conceitos e tipos de rejeitos de minério e seu potencial de uso na pavimentação asfáltica; 2) explorar os diferentes tipos de pavimentação asfáltica e o papel do rejeito de minério nesses contextos; 3) avaliar os benefícios econômicos decorrentes do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica; e 4) analisar os benefícios ambientais dessa prática.

A justificativa para a realização deste estudo reside na necessidade de desenvolver alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para a gestão dos rejeitos de minério e para a construção de infraestruturas de transporte. A utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica pode trazer benefícios significativos, tanto do ponto de vista econômico, pela redução dos custos de construção, como do ponto de vista ambiental, pela minimização dos impactos associados à exploração de agregados e à gestão de resíduos.

Além disso, este estudo pode contribuir para o avanço do conhecimento na área de construção sustentável e gestão de resíduos, fornecendo insights valiosos para pesquisadores, profissionais da indústria e tomadores de decisão. Ao identificar as

potencialidades e os desafios da utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica, este trabalho pode oferecer uma base sólida para o desenvolvimento de políticas públicas e práticas industriais que promovam a sustentabilidade e a economia circular.

Finalmente, é importante ressaltar que, diante dos desafios globais de conservação de recursos e mitigação das mudanças climáticas, é imperativo explorar e implementar alternativas sustentáveis em todos os setores da economia. Nesse sentido, este estudo é relevante não só para o campo da engenharia civil e da mineração, mas também para a sociedade em geral, pois se propõe a explorar uma solução que pode contribuir para a sustentabilidade em uma escala mais ampla.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Rejeito de minério: Conceitos e tipos

De acordo com Gomes (2017) Rejeito de minério representa um termo utilizado com frequência na indústria de mineração, que se refere ao material residual originado da extração e beneficiamento dos minérios. Este material é composto, em sua maior parte, por elementos não aproveitáveis que são separados da fração útil – o minério – durante o processamento. A geração deste tipo de resíduo ocorre em grande volume e está intrinsecamente ligada à atividade de mineração, não apenas no Brasil, mas em todo o mundo (GOMES, 2017).

Conforme Ibram (2016), o termo "rejeito" foi estabelecido para representar este conjunto de resíduos sólidos, líquidos e gasosos que resultam das operações de beneficiamento de minério, as quais envolvem uma série de processos físicos e químicos. Dentre esses processos, pode-se citar a britagem, a moagem, a flotação e a lixiviação, todos responsáveis por separar o material economicamente viável do restante que compõe o minério bruto. É importante notar que a geração de rejeitos é uma constante em cada uma dessas etapas de beneficiamento, e a quantidade produzida dependerá da qualidade do minério e da eficiência do processo de separação (IBRAM, 2016).

Na perspectiva de Vieira, Alves e Curaçá (2018), o manuseio e a destinação dos rejeitos de minério representam um dos maiores desafios da indústria de mineração, dada a sua abundância e os possíveis impactos ambientais que podem resultar do seu descarte inadequado. O descarte desses materiais geralmente ocorre em reservatórios designados, conhecidos como barragens de rejeitos. Estas estruturas, por sua vez, exigem um planejamento e uma gestão adequados para evitar desastres ambientais, como os ocorridos em Mariana e Brumadinho, no Brasil (VIEIRA; ALVES; CURAÇÁ, 2018).

Avançando para uma discussão mais específica, no que tange à aplicação na pavimentação asfáltica, Sá et al. (2021) afirma que é essencial observar que não são todos os rejeitos de minério que podem ser utilizados. A sua aplicação vai depender de fatores como a composição química, a granulometria, a disponibilidade e os requisitos técnicos do projeto de pavimentação.

Alguns dos rejeitos de minério que têm despertado interesse para uso nesta área incluem os de ferro, cobre e bauxita (SÁ et al., 2021).

O rejeito de ferro, para Pedroso (2020), é um subproduto da indústria de mineração de ferro, composto principalmente por óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Este material tem mostrado um desempenho satisfatório quando utilizado em pavimentos asfálticos, sendo comparável ao dos agregados convencionais. Além disso, a substituição de uma parte dos agregados naturais pelo rejeito de ferro pode resultar em uma melhoria da resistência ao desgaste e à compressão do pavimento asfáltico (PEDROSO, 2020).

De maneira similar, Sousa (2019) atesta que o rejeito de cobre, resultante da extração e beneficiamento do minério de cobre, tem demonstrado potencial para melhorar a resistência à tração e à compressão do pavimento asfáltico. O mesmo ocorre com o rejeito de bauxita, também conhecido como lama vermelha, um subproduto do processamento da bauxita para a produção de alumínio. Embora este rejeito apresente desafios em razão de seu alto teor de alcalinidade, pesquisas indicam que ele pode ser eficazmente utilizado na pavimentação asfáltica, sob condições específicas (SOUSA, 2019).

Desta forma, a partir de Sousa (2019), Pedroso (2020) e Sá et al. (2021), a adoção de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica requer um entendimento abrangente da composição do material e dos requisitos técnicos da pavimentação. A seleção adequada do tipo de rejeito e a definição das condições de uso podem levar à obtenção de um material de qualidade para a pavimentação, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade através da reutilização de resíduos.

## **2.2 Pavimentação asfáltica: Conceitos e tipos**

Segundo Guimarães et al. (2021), a pavimentação asfáltica é um componente essencial da infraestrutura urbana, responsável por garantir uma superfície de tráfego adequada, confortável e segura para a circulação de veículos e pessoas. Composta basicamente por uma mistura de agregados minerais e ligante asfáltico, a pavimentação asfáltica é empregada em vias urbanas, rodovias, aeroportos, pátios de manobra, estacionamentos, entre outras aplicações. Para Bernutti et al. (2008), o papel da pavimentação asfáltica na infraestrutura urbana é inegável, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico, a mobilidade urbana e a qualidade de vida

das populações.

Em linhas gerais, o processo de PA envolve uma série de etapas, que incluem a preparação do terreno, a aplicação de camadas de base e sub-base, a aplicação da mistura asfáltica e, por fim, a compactação do pavimento. Este processo é complexo e requer profissionais qualificados e equipamentos adequados para garantir a qualidade e a durabilidade do pavimento (BERNUCCI et al., 2008).

Existem diferentes tipos de pavimentação asfáltica, cada um com características e aplicações específicas. O pavimento asfáltico flexível é o tipo mais comum, amplamente utilizado em estradas e rodovias devido à sua capacidade de se adaptar às deformações do terreno e às cargas do tráfego. Este tipo de pavimento é composto por uma ou mais camadas de mistura asfáltica aplicadas sobre uma base de material granular (BERNUCCI et al., 2008).

Na ótica de Abreu, Santos e Pires (2023), o pavimento asfáltico rígido, por outro lado, é composto por uma placa de concreto asfáltico que distribui as cargas do tráfego por uma área maior, reduzindo a pressão sobre a sub-base e o subleito. Este tipo de pavimento é mais resistente e durável, sendo comumente utilizado em aeroportos, terminais de carga e rodovias de alto tráfego (ABREU; SANTOS; PIRES, 2023).

Outro tipo de pavimentação asfáltica é o pavimento intertravado, que, para Rossi (2017), consiste na aplicação de blocos de concreto asfáltico sobre uma camada de areia. Este tipo de pavimento é caracterizado pela sua alta resistência e durabilidade, sendo indicado para áreas de alto tráfego e cargas pesadas (ROSSI, 2017).

Além disso, a pavimentação asfáltica permeável vem ganhando destaque nos últimos anos devido à sua capacidade de permitir a infiltração da água da chuva, contribuindo para o manejo sustentável das águas pluviais e a prevenção de inundações urbanas. Abreu e Miranda (2020) indicam que este tipo de pavimento é composto por uma mistura asfáltica especial, que deixa espaços vazios para a passagem da água (ABREU; MIRANDA, 2020).

No entanto, vale ressaltar que a seleção do tipo de pavimentação asfáltica a ser empregado depende de uma série de fatores, que incluem as condições do terreno, o tipo e a intensidade do tráfego, as condições climáticas, os aspectos econômicos, entre outros. Portanto, a pavimentação asfáltica representa um campo de estudo e prática complexo, que requer conhecimento técnico e experiência para garantir a

implementação de soluções eficientes, duráveis e sustentáveis.

### **2.3 Utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica**

A busca por novas tecnologias e materiais que sejam economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis tem sido uma tendência em diversas áreas da engenharia. Na engenharia rodoviária, em particular, a utilização de resíduos e subprodutos industriais na pavimentação asfáltica tem ganhado atenção crescente. Neste contexto, a aplicação de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica surge como uma alternativa promissora, que alia o aproveitamento de um resíduo abundante à melhoria da qualidade e do desempenho dos pavimentos (SANTOS; MENEGUELLI; SARTÓRIO, 2021).

Conforme Silva et al. (2023), os rejeitos de minério apresentam propriedades físicas e químicas que os tornam potencialmente aplicáveis na pavimentação asfáltica. Dependendo do tipo de rejeito, é possível obter benefícios como a melhoria da resistência à deformação, à fadiga e ao desgaste, além da possibilidade de modulação da rigidez e da durabilidade do pavimento. Além disso, a utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica pode contribuir para a sustentabilidade do setor, através da redução da exploração de recursos naturais e da mitigação dos impactos associados à disposição desses resíduos no ambiente (SILVA et al., 2023).

A integração de rejeitos de minério na composição dos pavimentos asfálticos pode ocorrer de diferentes formas. Campanha (2011) aponta que, em geral, o rejeito pode substituir parcial ou totalmente os agregados minerais utilizados na mistura asfáltica, ou ser incorporado como um aditivo para aprimorar determinadas propriedades do pavimento. A definição do método de incorporação e do percentual de substituição depende da avaliação das propriedades do rejeito e das exigências técnicas e ambientais do projeto de pavimentação (CAMPANHA, 2011).

A substituição de agregados minerais por rejeitos de minério na mistura asfáltica requer um cuidadoso controle da granulometria do material. Os rejeitos de minério devem ser classificados e processados de maneira a atender às especificações técnicas do projeto, garantindo a obtenção de uma mistura asfáltica homogênea e de qualidade. O controle da granulometria é fundamental para assegurar a adequada compactação da mistura asfáltica e o desempenho do

pavimento em serviço (CAMPANHA, 2011).

O mesmo autor adiciona que quando utilizado como aditivo, o rejeito de minério pode contribuir para a melhoria de propriedades como a resistência à tração e à compressão, a resistência à deformação permanente, a aderência entre os agregados e o ligante asfáltico, entre outras. Neste caso, o rejeito é adicionado à mistura asfáltica em uma proporção definida, de modo a otimizar o seu desempenho. A avaliação das propriedades do pavimento com a adição do rejeito requer ensaios laboratoriais e em campo, que permitam verificar o atendimento às especificações técnicas e o comportamento do pavimento sob as condições reais de serviço (CAMPANHA, 2011).

Nesta altura, vale destacar o ponto de vista de Miyazaki (2019), ou seja, a incorporação de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica deve ser acompanhada por uma avaliação dos potenciais impactos ambientais associados. Embora o aproveitamento de rejeitos de minério possa mitigar os impactos de sua disposição no ambiente, é necessário avaliar possíveis efeitos adversos, como a lixiviação de substâncias nocivas ao ambiente e à saúde humana. Portanto, a viabilidade da aplicação de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica deve ser avaliada com base em uma abordagem integrada, que considere tanto os aspectos técnicos como os ambientais (MIYAZAKI, 2019).

Em suma, a partir dos autores supracitados, a utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica representa uma alternativa promissora para a engenharia rodoviária, com potencial para melhorar a qualidade e o desempenho dos pavimentos, reduzir a exploração de recursos naturais e mitigar os impactos ambientais associados à geração e disposição desses resíduos. No entanto, a implementação desta alternativa requer uma cuidadosa avaliação das propriedades dos rejeitos, das exigências técnicas do projeto de pavimentação e dos possíveis impactos ambientais associados, de modo a garantir a segurança, a eficiência e a sustentabilidade da solução proposta.

## **2.4 Benefícios econômicos do uso de rejeito de minério na pavimentação asfáltica**

A exploração econômica adequada de resíduos industriais, como os rejeitos de minério, representa uma vertente relevante no desenvolvimento sustentável e na

economia circular. No âmbito da pavimentação asfáltica, a utilização de rejeitos de minério pode trazer significativos benefícios econômicos, principalmente na redução dos custos de construção de estradas e outras infraestruturas de transporte (VIEIRA; ALVES; CURAÇA, 2018).

A redução de custos é viabilizada principalmente pela substituição de materiais tradicionais, como os agregados minerais, por rejeitos de minério na composição da mistura asfáltica. Considerando que a aquisição de agregados minerais representa uma parcela significativa dos custos de construção de um pavimento, a utilização de rejeitos de minério pode representar uma economia considerável. Além disso, a exploração dos rejeitos de minério pode reduzir os custos associados à sua disposição e gestão, uma vez que o material deixa de ser um resíduo a ser tratado e passa a ser um recurso a ser explorado (SÁ et al., 2021).

Existem exemplos concretos que ilustram o potencial econômico da utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica. Na Austrália, por exemplo, o Departamento de Transporte e Infraestrutura do Sul da Austrália (DPTI) desenvolveu um projeto de pesquisa e desenvolvimento para a utilização de rejeitos de minério de cobre na construção de estradas. O projeto demonstrou que a incorporação de até 30% de rejeito de minério de cobre na mistura asfáltica pode resultar em uma redução de custos de até 15% em comparação com uma mistura asfáltica tradicional, sem comprometer a qualidade e o desempenho do pavimento (PEDROSO, 2020).

Outro exemplo é o projeto de construção da rodovia BR-381 em Minas Gerais, Brasil, que utilizou rejeitos de minério de ferro na pavimentação asfáltica. Este projeto, realizado em parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a empresa Vale, demonstrou que a utilização de rejeitos de minério de ferro pode resultar em uma economia de até 10% nos custos de construção do pavimento, além de proporcionar uma melhor resistência ao desgaste e à fadiga em relação a uma mistura asfáltica convencional (PEDROSO, 2020).

Esses poucos exemplos já demonstram que a utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica pode trazer benefícios econômicos significativos, sem comprometer a qualidade e o desempenho do pavimento. No entanto, é importante destacar que a viabilidade econômica da utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica depende de uma série de fatores, como as propriedades do rejeito, as condições do projeto de pavimentação, a legislação e as políticas públicas

em vigor, entre outros (VIEIRA; ALVES; CURAÇA, 2018).

Portanto, a análise econômica da utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica deve ser realizada considerando-se uma abordagem integrada, que leve em conta tanto os benefícios econômicos diretos, como a redução dos custos de construção, quanto os benefícios indiretos, como a contribuição para a economia circular e a sustentabilidade do setor. Além disso, é necessário considerar os potenciais riscos e desafios associados, como a variabilidade das propriedades do rejeito e a necessidade de controle e monitoramento rigoroso para garantir a qualidade e a segurança do pavimento.

## **2.5 Benefícios ambientais do uso de rejeito de minério na pavimentação asfáltica**

De acordo com Ferreira (2020), o uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica não só apresenta benefícios econômicos, mas também contribui significativamente para a sustentabilidade ambiental. A introdução de práticas sustentáveis na indústria da construção é uma necessidade premente, dada a escala global e o impacto ambiental associado a essa indústria. Nesse contexto, o reaproveitamento dos rejeitos de minério representa uma alternativa eficaz para mitigar o impacto ambiental da construção de pavimentos (FERREIRA, 2020).

Um dos principais benefícios ambientais do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica é a redução da exploração de agregados naturais. A mineração de agregados para a construção civil é uma atividade que envolve significativos impactos ambientais, incluindo a degradação de paisagens, a destruição de habitats, a contaminação da água e a emissão de gases de efeito estufa. Ao substituir os agregados naturais por rejeitos de minério, é possível reduzir esses impactos e contribuir para a conservação dos recursos naturais (FERREIRA, 2020).

Além disso, Medeiros, Soares e Silva (2020) afirmam que o aproveitamento dos rejeitos de minério na pavimentação asfáltica contribui para a redução do volume de resíduos gerados pela indústria de mineração. A disposição adequada dos rejeitos de minério é um desafio para a indústria de mineração, dada a sua grande quantidade e os riscos associados à sua gestão. De qualquer modo, a utilização desses rejeitos na construção de pavimentos permite a sua valorização, reduzindo a necessidade de espaços para a sua disposição e minimizando os riscos de contaminação do solo e da água

(MEDEIROS; SOARES; SILVA, 2020).

A contribuição para a sustentabilidade na construção civil, para Ferreira (2020), é outro benefício ambiental importante. A indústria da construção é responsável por uma parcela significativa do consumo global de recursos e da geração de resíduos. Portanto, a incorporação de práticas sustentáveis nesta indústria é essencial para o alcance dos objetivos de desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, a utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica é um exemplo de como é possível promover a sustentabilidade na construção civil, através da valorização de resíduos e da redução do impacto ambiental (FERREIRA, 2020).

No entanto, é importante ressaltar que a implementação dessa prática requer cuidadosa consideração das potenciais implicações ambientais. Por exemplo, é necessário garantir que os rejeitos de minério não contenham substâncias que possam causar impactos adversos ao ambiente ou à saúde humana. Além disso, é necessário implementar medidas de controle para minimizar a emissão de poeira e ruído durante o processo de produção e aplicação da mistura asfáltica. (MEDEIROS; SOARES; SILVA, 2020).

Sendo assim, a utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica pode trazer benefícios ambientais significativos, contribuindo para a redução do impacto ambiental e a promoção da sustentabilidade na indústria da construção. No entanto, a viabilidade dessa prática deve ser avaliada considerando uma abordagem integrada, que leve em conta os benefícios ambientais, bem como os potenciais riscos e desafios associados.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização deste estudo é a revisão integrativa, de caráter descritivo e exploratório, buscando garantir a abrangência e a profundidade necessárias ao estudo das implicações econômicas, ambientais e técnicas decorrentes do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica. A escolha desta metodologia justifica-se pela sua capacidade de sintetizar e avaliar criticamente uma vasta gama de literaturas, permitindo a análise de diferentes perspectivas e contextos em que os rejeitos de minério são aplicados na pavimentação asfáltica. Assim, este método possibilita uma compreensão holística e detalhada das variáveis envolvidas, contribuindo significativamente para o corpo de conhecimento existente e fornecendo insights valiosos para futuras pesquisas e práticas na área.

Neste sentido, a pergunta norteadora desta revisão integrativa é: quais são as implicações econômicas e ambientais decorrentes do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica? Esta questão é pertinente e relevante, considerando a crescente busca por soluções sustentáveis na engenharia civil e a necessidade de compreender os impactos econômicos e ambientais das práticas adotadas.

Para a coleta de dados, foram utilizadas bases científicas renomadas como Google Acadêmico, Scielo e Web of Science. A escolha dessas bases justifica-se pela ampla cobertura de literatura científica que oferecem, abrangendo uma variedade de estudos que se enquadram no escopo desta pesquisa. As palavras-chave utilizadas foram "rejeitos de minério", "pavimentação asfáltica", "impactos econômicos" e "impactos ambientais". O operador booleano AND foi empregado para refinar a busca, assegurando que apenas os estudos que abordassem simultaneamente esses aspectos fossem incluídos.

Quanto aos critérios de inclusão, optou-se por estudos publicados nos últimos dez anos (2013-2023), em português ou inglês, que possuíssem relação direta com o tema proposto. Este recorte temporal permite uma análise atualizada e relevante das práticas e pesquisas mais recentes no campo. Além disso, a inclusão de estudos em português e inglês visa garantir uma compreensão abrangente do tema, incluindo perspectivas tanto de países lusófonos quanto de nações anglófonas.

Os critérios de exclusão aplicados foram a duplicidade de estudos e a fragilidade metodológica. Estudos duplicados poderiam causar redundância e comprometer a integridade dos resultados. Da mesma forma, estudos com metodologias frágeis foram excluídos para assegurar a qualidade e a confiabilidade das informações analisadas. A

avaliação da robustez metodológica foi realizada por meio de uma leitura crítica, considerando aspectos como o desenho do estudo, a clareza dos objetivos, a adequação da metodologia empregada e a consistência dos resultados apresentados.

Através desta abordagem metodológica, esta revisão integrativa busca fornecer um panorama detalhado e crítico sobre as implicações econômicas e ambientais do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica, contribuindo para o avanço do conhecimento na área e auxiliando na formulação de práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis no campo da engenharia civil.

#### 4 REVISÃO INTEGRATIVA

A partir dos critérios mencionados anteriormente na Metodologia, foi possível encontrar um número de estudos associado ao tema acima de 16 mil, como se pode observar na Tabela 1. A base científica que concentrou mais pesquisas foi o Google Acadêmico, haja vista o seu potencial de alcance, se comparado com as outras bases.

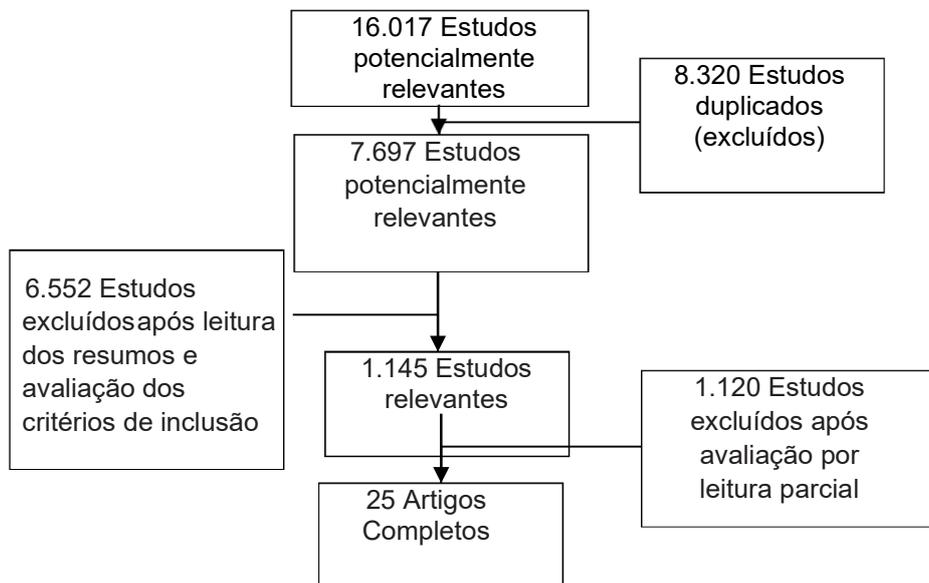
Tabela 1 - Número de estudos relacionados ao assunto

Nome da base	Número de estudos
Google Acadêmico	16.000
Scielo	17
Web of Science	-
Total	16.017

Fonte: conforme as bases em dez./2023.

Considerando os números compartilhados, passou-se por um processo de seleção criterioso, de forma a se compor o arcabouço teórico central e atualizado sobre o uso de rejeito de minério na pavimentação asfáltica. O processo de seleção pode ser conferido no fluxograma presente na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo de seleção dos artigos para revisão integrativa



Fonte: Aatoria propria, 2023.

Como percebido, selecionou-se 25 artigos completos que demonstraram significativo potencial em responder à pergunta-problema proposta, além de adicionar novas informações relevantes para a compreensão da totalidade do assunto. Com o intuito de ter metodologias diversificadas, optou-se por estudos práticos, como estudos experimentais e estudos de caracterização, além de pesquisas mais teóricas como revisões e estado da arte. Estes e outros dados podem ser verificados no Quadro 1.

Quadro 1 - Estudos selecionados para a revisão integrativa

	<b>Título do estudo</b>	<b>Pesquisadores</b>	<b>Tipo de método / abordagem</b>	<b>Idioma</b>
1	Estudo da viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério de Ferro na camada de sub-base de pavimentação rodoviária	(SANTOS; MENEGUELLI; SARTÓRIO, 2021)	Estudo de caracterização física, geotécnica e mecânica do solo, rejeito, e das misturas.	Português
2	Estudo do comportamento de um solo com adição de rejeito de Flotação de minério de ferro para utilização em camadas de Pavimentos	(LARA et al., 2018)	Estudo experimental	Português
3	Estudo sobre a utilização de Resíduo de Minério de Ferro em microrrevestimento asfáltico	(APAZA et al., 2018)	Ensaio de caracterização Física e mecânica	Português
4	Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados	(SANT'ANA FILHO, 2013)	Estudo experimental	Português
5	Estado da arte do uso de rejeitos de Mineração em pavimentos	(SÁ et al., 2019)	Estado da arte	Português
6	Execução de trecho experimental com o uso de rejeitos e resíduos de mineração	(ANNT; RDT, 2020)	Estudo experimental	Português
7	Avaliação do desempenho de misturas asfálticas com rejeitos de ardósia	(BISPO et al., 2021)	Ensaio / Estudo experimental	Português
8	Utilização de rejeitos de mineração na construção civil com ênfase na infraestrutura rodoviária	(BATISTA, 2022)	Revisão de literatura	Português

9	Comportamento mecânico de concretos asfálticos dosados com rejeitos finos de minério de ferro	(SOUZA, 2019)	Estudo experimental	Português
10	<i>Iron ore tailings as fine mineral aggregate in asphalt mixtures</i>	(OLIVEIRA; FAXINA, 2021)	Estudo experimental	Inglês
11	<i>Recycling of Waste Materials for Asphalt Concrete and Bitumen: A Review</i>	(RAHMAN; MOHAJERANI; GIUSTOZZI, 2020)	Revisão	Inglês
12	<i>A Comprehensive Overview of the Utilization of Recycled Waste Materials and Technologies in Asphalt Pavements: Towards Environmental and Sustainable Low-Carbon Roads</i>	(YARO et al., 2023)	Revisão sistemática	Inglês
13	<i>Utilization of iron tailings as aggregates in paving asphalt mixture: A sustainable and eco-friendly solution for mining waste</i>	(CAO et al., 2022)	Revisão sistemática	Inglês
14	<i>Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure</i>	(SÁ et al., 2022)	Revisão	Inglês
15	<i>Effects of Iron Ore Tailing on Performance of Hot-Mix Asphalt</i>	(BASTIDAS-MARTÍNEZ et al., 2022)	Estudo experimental	Inglês
16	<i>Pavement Stabilization Using Iron Ore Waste</i>	(BHAT; KUMAR, 2023)	Estudo experimental	Inglês
17	<i>Research on Road Performance of Asphalt Mixture With Iron Waste Ore</i>	(FEI; ZHANG; RUAN, 2021)	Estudo experimental	Inglês
18	<i>Mining Wastes as Road Construction Material: A Review</i>	(SEGUI et al., 2023)	Revisão	Inglês
19	<i>Reusing Jet Grouting Waste as Filler for Road Asphalt Mixtures of Base Layers</i>	(RUSSO et al., 2021)	Estudo experimental	Inglês
20	<i>Sustainable use of mine waste and tailings with suitable admixture as aggregates in concrete pavements-A review</i>	(GAYANA; CHANDAR, 2018)	Revisão	Inglês
21	<i>Use of Recycled Materials in Road Construction</i>	(ABUKHETTALA, 2016)	Revisão	Inglês
22	<i>The Performance of Stone Mastic Asphalt Incorporating Iron Ore</i>	(ALJARIRI et al., 2023)	Estudo Experimental	Inglês
23	<i>Effect of Iron Ore Tailing on the Properties of Concrete</i>	(UGAMA; EJEH; AMARTEY, 2014)	Estudo Experimental	Inglês

24	<i>Investigation of the Effects of Urban Iron Ore Tailing in Bituminous Mix Thanusha</i>	(THANUSHA, 2021)	Estudo de caso	Inglês
25	<i>The Composition and Performance of Iron Ore Tailings in Steel Slag-Based Autoclaved Aerated Concrete</i>	(ZHOU et al., 2023)	Estudo experimental	Inglês

Fonte: conforme os estudos listados.

Quanto aos principais achados de cada pesquisador, o Quadro 2 relaciona as informações centrais de cada material publicado.

Quadro 2 - Considerações e resultados dos estudos selecionados

<b>Pesquisadores</b>	<b>Considerações / Resultados</b>
(SANTOS; MENEGUELLI; SARTÓRIO, 2021)	Os resultados encontrados demonstraram que o rejeito e as misturas são viáveis de serem aplicados em camadas de sub-base em substituição do agregado natural.
(LARA et al., 2018)	Resultados de ensaios triaxiais cíclicos confirmaram a adequabilidade do modelo composto resiliente aplicado às misturas, que as habilitam ao uso como camadas de pavimentos, especialmente como material de reforço de subleito e sub-base.
(APAZA et al., 2018)	Comportamento mecânico dos corpos de prova de Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) contendo agregado do resíduo de ferro mostrou que os resultados obtidos são compatíveis com a literatura, bem como mostrou ter desempenho semelhante aos agregados usuais, indicando tratar-se de um material com uso promissor nesse tipo de técnica de pavimentação.
(SANT'ANA FILHO, 2013)	Os ensaios físicos e químicos demonstram a competência dos blocos intertravados para suportar grandes tensões. A imagem microestrutural, obtida por tomografia, comprova que houve redução da porosidade e aumento da densidade, com a adição do resíduo.
(SÁ et al., 2019)	A utilização de rejeitos de mineração em pavimentos possui uma vasta aplicabilidade e, portanto, um amplo campo de estudo, englobando misturas asfálticas, misturas cimentícias, pavimentos intertravados e misturas granulares para compor camadas de base sub-base e reforço de subleito
(ANTT; RDT, 2020)	Concluiu-se que sobre condições de campo, as misturas, por não estarem confinadas como ocorre no caso de material compactado em cilindro no laboratório, e em função das características geotécnicas, variáveis, dos resíduos, estes apresentam um comportamento com estabilidade bem inferior àquelas propostas em projeto, com base nos resultados de laboratório.
(BISPO et al., 2021)	As misturas asfálticas com rejeito de ardósia apresentaram uma resistência à tração superior em relação à MCG. Quanto ao resultado do módulo de resiliência, pode-se afirmar que o seu valor bastante elevado comprova a elevada rigidez dos agregados de ardósia.
(BATISTA, 2022)	Nesse sentido, dadas as questões ambientais que também englobam todo esse processo mediante ao que se tem ciência dos danos que determinadas ações podem causar de maneira mais impactante ao meio ambiente contaminando não apenas o ar, mas também o solo, as águas, chegando aos seres vivos que habitam o planeta. Portanto, buscar

	medidas de reaproveitamento de resíduos que possam contaminar e poluir ainda mais a atmosfera ambiental, torna-se cada vez mais necessário.
(SOUZA, 2019)	Portanto, do ponto de vista técnico as propriedades mecânicas são compatíveis com a literatura e pode-se afirmar que a aplicação dos rejeitos de minério de ferro do presente estudo em concretos asfálticos é viável
(OLIVEIRA; FAXINA, 2021)	A melhor adesividade do ligante asfáltico ao rejeito proporcionou maior resistência a tração na MAC e maior vida de fadiga a MAF condicionada, além de reduzir a suscetibilidade e a umidade nas duas escalas.
(RAHMAN; MOHAJERANI; GIUSTOZZI, 2020)	Materiais como polímero e plástico têm apresentado um aumento na estabilidade Marshall e na fluidez, com estudos anteriores mostrando que a incorporação de plástico na ligante melhora o desempenho contra deformações permanentes e fadiga. A utilização de resíduos de pedreiras surge como alternativa para substituir agregados convencionais em vias de tráfego médio, enquanto que o emprego de resíduos de demolição de edifícios nas camadas de base e sub-base do concreto asfáltico contribui para a redução da poluição e reciclagem dos materiais. O pó de borracha de pneu tem sido explorado em diversas pesquisas, aprimorando as propriedades do asfalto em altas temperaturas. A combinação de óleo de cozinha reciclado e cinza de combustível de palma tem permitido a substituição de até 5% do ligante betuminoso convencional em concreto asfáltico. Fibras derivadas de resíduos como coco, sisal e celulose têm sido eficazes na prevenção do escorrimento do betume e na melhoria do módulo de resiliência. Verificou-se que ligantes asfálticos modificados com amido superam os modificados com SBS. Além disso, vidro, tijolos e cerâmicas reciclados como agregados alternativos têm exibido propriedades mecânicas superiores. A cinza volante, utilizada como enchimento no concreto asfáltico, demonstrou potencial para uso em misturas asfálticas a frio, e a incorporação de bitucas de cigarro encapsuladas no betume representa um novo avanço na gestão de resíduos, promovendo uma gestão sustentável com melhorias no concreto asfáltico.
(YARO et al., 2023)	O estudo auxiliou na identificação de diversos materiais de resíduos reciclados que podem ser empregados no pavimento asfáltico para reduzir as emissões de carbono. Entre os materiais identificados estão o RAP (Pavimento Asfáltico Recuperado), borracha moída, agregado reciclado, biocarvão, cinza de combustível de óleo de palma e ligantes biobaseados. Esses materiais podem ajudar a diminuir as consequências ambientais da produção e manutenção do pavimento asfáltico.
(CAO et al., 2022)	as performances do pavimento de misturas asfálticas contendo rejeitos de ferro podem ser ainda mais aprimoradas através da adição de cal hidratada ou de agente de acooplamento silano, e o nível abrangente superou a mistura asfáltica modificada convencional que tem sido aplicada de forma madura em projetos de pavimentação atuais. Adicionalmente, é notável que a reciclagem de rejeitos de ferro em pavimentos asfálticos também criará enormes benefícios nos aspectos econômico, ambiental e social.
(SÁ et al., 2022)	As estruturas com a adição de 10% e 20% de rejeitos de minério de ferro tiveram resultados aproximadamente iguais às estruturas de solo-cimento sem adição de rejeitos de minério de ferro. Além disso, o uso de rejeitos de minério de ferro em camadas de pavimento também contribui criando um novo método de descarte para os rejeitos, reduzindo o

	impacto ambiental relacionado à atividade de mineração e possivelmente pode reduzir os custos relacionados à construção do pavimento.
(BASTIDAS-MARTÍNEZ et al., 2022)	Foi demonstrado que o uso de rejeitos de minério de ferro em misturas asfálticas quentes melhora sua resposta mecânica sem aumentar as temperaturas de mistura e compactação e utilizando uma quantidade menor de ligante asfáltico eficaz. Isso poderia proporcionar uma nova forma de descarte ambientalmente seguro dos IOTs.
(BHAT; KUMAR, 2023)	No geral, a estabilização de pavimentos utilizando resíduos de minério de ferro é uma solução eficaz e sustentável para a construção de estradas, oferecendo uma série de benefícios tanto para o meio ambiente quanto para os usuários das vias.
(FEI; ZHANG; RUAN, 2021)	Utilizar resíduos de rocha de mineração e descapecamento em vez de extrair cascalho apresenta uma boa eficiência econômica, mas também resolve o problema do acúmulo de resíduos de rocha de mineração e descapecamento.
(SEGUI et al., 2023)	O uso de resíduos de mineração para construção de estradas terá um impacto ambiental considerável, reduzindo o volume de resíduos e oferecendo matérias-primas sustentáveis.
(RUSSO et al., 2021)	Os resultados deste estudo mostraram que a mistura alternativa a frio, CRAJ, promove a reutilização de dois tipos de resíduos, RAP e JGW, pois atende plenamente à Norma Técnica Italiana de referência e garante um bom desempenho da mistura além de conservar recursos naturais.
(GAYANA; CHANDAR, 2018)	Testes de flexão e fadiga. O uso de resíduos e rejeitos de minério de ferro no concreto pode melhorar a resistência, mas a densidade também aumenta. Portanto, para reduzir a densidade, podem ser utilizados alguns aditivos como perlita e borracha.
(ABUKHETTALA, 2016)	Apesar de todas as pesquisas sobre o uso potencial de material reciclado na estrutura de rodovias, ainda há montes de preocupações e lacunas de conhecimento que requerem investigação intensiva e avaliação no interesse de construir estradas melhores e preservar recursos naturais. Deve-se enfatizar que outros materiais reciclados potenciais para construção de estradas, como resíduos de minas, não foram discutidos neste artigo.
(ALJARIRI et al., 2023)	A utilização de minério de ferro para melhorar o desempenho de misturas asfálticas não é uma prática industrial nova. Novos materiais como minério de hematita, minério magnético, minério de limonita, minério de siderita e assim por diante estão sendo constantemente implementados na indústria. O asfalto mástique de pedra foi adicionado para melhorar a eficiência do minério de ferro.
(UGAMA; EJEH; AMARTEY, 2014)	Não conclusivo.
(THANUSHA, 2021)	Uso de rejeito de minério de ferro (IOT) como <i>filler</i> para substituir o uso de areia sílica e restaurar o recurso natural. IOT está disponível no Hospete, em grande quantidade. É necessário utilizar resíduos industriais na construção de estradas para seu melhor desempenho e principalmente para transformar esses resíduos industriais em recursos valiosos o que provoca a redução do uso da areia natural do leito dos rios.
(ZHOU et al., 2023)	A utilização abrangente de subprodutos industriais tem o potencial de contribuir para o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis e reduzir o impacto ambiental da indústria mineira.

Fonte: conforme os estudos

A partir dos textos supracitados, foi possível dividir a análise em três categorias:

implicações ambientais; implicações econômicas; e implicações técnicas do uso de rejeito de minério na pavimentação asfáltica.

a) A pavimentação asfáltica e as implicações ambientais

No âmbito das implicações ambientais, a literatura dos últimos dez anos oferece um panorama robusto das potencialidades e desafios desta abordagem. Santos, Meneguelli e Sartório (2021) ressaltam a viabilidade da aplicação de rejeitos em camadas de sub-base, o que, em si, já constitui um argumento em prol da preservação de recursos naturais ao substituir agregados convencionais.

A adequação técnica dos rejeitos, conforme apontada por Lara et al. (2018) e Apaza et al. (2018), também se alinha às demandas ambientais, na medida em que a reutilização de resíduos na pavimentação implica diretamente na diminuição da exploração de novos recursos e na redução do volume de resíduos sem destino apropriado. Esta sinergia entre as propriedades mecânicas e os benefícios ambientais é reforçada pela observação de Sant’Ana Filho (2013), que indica uma melhoria na densidade e redução da porosidade com a adição de rejeitos, sugerindo um aumento na vida útil das estruturas asfálticas e, conseqüentemente, menos intervenções de manutenção que, por sua natureza, acarretam impactos ambientais.

A extensa aplicabilidade dos rejeitos em diferentes tipos de misturas e pavimentos, conforme delineado por Sá et al. (2019), amplia o espectro de utilização desses materiais e, portanto, o potencial de mitigação do impacto ambiental associado à indústria da construção civil. No entanto, as variáveis geotécnicas e o comportamento dos resíduos em condições de campo, apontados pela ANTT e RDT (2020), indicam que existem desafios significativos que precisam ser superados para que esses benefícios ambientais se concretizem plenamente.

As análises de Batista (2022) sobre as questões ambientais abrangentes e a ênfase na necessidade de medidas de reaproveitamento dos resíduos sinalizam para uma responsabilidade ambiental crescente. Essa perspectiva é compartilhada por Oliveira e Faxina (2021), cujo estudo sobre a adesividade do ligante asfáltico ao rejeito de minério e suas conseqüências para a resistência e durabilidade do pavimento asfáltico destaca a potencial redução na susceptibilidade à umidade e, por extensão, no consumo de recursos.

Rahman, Mohajerani e Giustozzi (2020) complementam essa visão ao relatar o sucesso na incorporação de diversos tipos de resíduos, não apenas na melhoria das propriedades do asfalto, mas também na promoção de uma gestão de resíduos mais sustentável. Esta perspectiva é corroborada por Yaro et al. (2023), que identificam

materiais reciclados capazes de reduzir emissões de carbono durante a produção e manutenção do pavimento asfáltico.

Já Cao et al. (2022) e Sá et al. (2022) apresentam resultados que sugerem melhorias na performance das misturas asfálticas com rejeitos de ferro, além de apontarem para benefícios ambientais derivados da diminuição do impacto relacionado à atividade mineradora. Este ponto de vista é reforçado por Bastidas-Martínez et al. (2022), que veem na utilização de uma quantidade menor de ligante asfáltico eficaz uma estratégia para a redução do impacto ambiental.

Bhat e Kumar (2023), por sua vez, trazem à discussão a eficácia e a sustentabilidade da estabilização de pavimentos com rejeitos de minério, ressaltando os benefícios ambientais e para os usuários das vias, de modo geral. Além dos benefícios aos usuários, Fei, Zhang e Ruan (2021) e Segui et al. (2023) complementam que o impacto ambiental da construção de estradas com resíduos de mineração, são cruciais na redução do volume de resíduos e da promoção de matérias-primas sustentáveis.

Destaca-se, ainda, Russo et al. (2021) que contribuem para essa narrativa ambiental, evidenciando como a reutilização de dois tipos de resíduos pode conservar recursos naturais, enquanto Gayana e Chandar (2018) apontam para soluções que visam a redução da densidade do concreto, através do uso de aditivos como a perlita e a borracha, que podem diminuir a demanda por materiais tradicionais e, portanto, impactar positivamente no meio ambiente.

Finalmente, Abukhattala (2016) nos lembra da necessidade de um olhar crítico e da realização de investigações mais aprofundadas sobre o uso de materiais reciclados na construção rodoviária, evidenciando que, apesar dos avanços, ainda existem lacunas significativas de conhecimento e práticas que precisam ser endereçadas para maximizar os benefícios ambientais dessa abordagem.

Portanto, nesta categoria, a interação entre os diversos estudos revela um consenso sobre as vantagens ambientais do uso de rejeitos de minério em pavimentos asfálticos, mas também aponta para a necessidade de uma compreensão mais profunda das implicações práticas dessa prática.

#### b) A pavimentação asfáltica e as implicações econômicas

A utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica tem despertado interesse crescente na literatura especializada, especialmente sob a ótica das implicações econômicas desta prática. A análise dos trabalhos recentes revela uma discussão rica e

multifacetada sobre os potenciais benefícios e desafios econômicos associados ao uso desses materiais na construção de estradas.

Santos, Meneguelli e Sartório (2021) apresentam um ponto de partida fundamental, ao confirmarem a viabilidade do uso de rejeitos em substituição ao agregado natural em camadas de sub-base. Esta substituição, por si só, sugere uma redução nos custos associados à aquisição de materiais convencionais, ao mesmo tempo em que fomenta a economia circular. De forma semelhante, Lara et al. (2018) e Apaza et al. (2018) evidenciam o desempenho satisfatório dos rejeitos em misturas asfálticas, que além de atenderem às especificações técnicas, indicam uma possibilidade de redução de custos, dada a menor dependência de agregados tradicionais.

Sant’Ana Filho (2013) e Sá et al. (2019) expandem essa visão, ressaltando a aplicabilidade dos rejeitos em uma gama variada de misturas, o que potencialmente traduz-se em economias significativas em diferentes aspectos da construção de estradas. No entanto, a ANTT e RDT (2020) trazem um contraponto importante, ao apontarem que as características variáveis dos resíduos e seu comportamento em condições reais podem não corresponder completamente às expectativas baseadas em testes de laboratório, o que pode afetar a previsibilidade dos custos.

Bispo et al. (2021) destacam a resistência superior das misturas asfálticas com rejeito de ardósia, o que pode implicar em maior durabilidade do pavimento e, conseqüentemente, em economia a longo prazo com manutenção e reparos. Em contrapartida, Batista (2022) enfatiza a necessidade de considerar as implicações ambientais dessas práticas, o que indiretamente se relaciona com a economia, uma vez que medidas sustentáveis tendem a ser mais valorizadas e podem resultar em benefícios econômicos indiretos, como a melhoria da imagem pública e a adesão a políticas de incentivos.

Oliveira e Faxina (2021) e Rahman, Mohajerani e Giustozzi (2020) abordam a questão da eficiência do uso de ligantes e a incorporação de diversos tipos de resíduos, respectivamente. Estes estudos sugerem que a otimização no uso de materiais pode resultar em economias significativas, tanto no que se refere à quantidade de ligante asfáltico necessário quanto ao aproveitamento de resíduos que, de outra forma, seriam descartados.

Yaro et al. (2023) e Cao et al. (2022) apontam para os benefícios econômicos derivados da utilização de rejeitos de ferro em misturas asfálticas, destacando que as melhorias na performance do pavimento podem superar as misturas convencionais e

trazer benefícios econômicos, além dos ambientais. Sá et al. (2022) reiteram essa perspectiva, notando que a utilização desses materiais não apenas contribui para a redução de impactos ambientais, mas também pode ser uma alternativa mais econômica.

Bastidas-Martínez et al. (2022) e Bhat e Kumar (2023) reforçam a ideia de que a utilização de rejeitos de minério em pavimentos asfálticos não apenas melhora a resposta mecânica do material, mas também reduz a necessidade de ligantes asfálticos eficazes, o que pode representar uma economia de custos significativa. Fei, Zhang e Ruan (2021) e Segui et al. (2023) complementam essa discussão ao enfocarem no uso de resíduos de mineração para construção de estradas, ressaltando tanto os benefícios ambientais quanto a eficiência econômica dessa prática.

Russo et al. (2021) e Gayana e Chandar (2018) enfatizam a reutilização de resíduos e a busca por soluções que reduzam a densidade do concreto, respectivamente, ambos destacando potenciais economias na demanda por materiais tradicionais. Finalmente, Abukhattala (2016) chama a atenção para a necessidade de pesquisas adicionais e uma avaliação cuidadosa das práticas, sublinhando que a eficiência econômica deve ser considerada juntamente com as implicações técnicas e ambientais.

Através desta análise, é evidente que a utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica apresenta um potencial econômico significativo, tanto em termos de redução direta de custos quanto pela promoção de práticas sustentáveis. Contudo, permanece claro que uma compreensão holística e aprofundada das variáveis envolvidas é crucial para garantir que esses benefícios econômicos sejam efetivamente realizados. A literatura existente proporciona uma base sólida para futuras investigações, visando a otimização dos aspectos econômicos dessa prática inovadora na construção de estradas.

#### c) A pavimentação asfáltica e as implicações técnicas

A utilização de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica tem sido objeto de intensas discussões no campo da engenharia civil, principalmente no que se refere à sua viabilidade técnica. Esta análise abrangente dos estudos recentes busca traçar um panorama das implicações técnicas e da factibilidade dessa prática inovadora.

Santos, Meneguelli e Sartório (2021) lançam luz sobre a viabilidade técnica do uso de rejeitos de minério, demonstrando que são eficazes quando aplicados em camadas de sub-base, substituindo o agregado natural. Esse achado é fundamental para a validação da técnica, uma vez que indica a possibilidade de substituir materiais convencionais sem comprometer a qualidade ou a funcionalidade da estrutura.

Lara et al. (2018) corroboram essa visão ao confirmarem a adequabilidade do

modelo composto resiliente com rejeitos em misturas asfálticas. Essa constatação reforça a ideia de que os rejeitos de minério não apenas se encaixam tecnicamente nas exigências de pavimentação, mas também podem oferecer propriedades mecânicas superiores, como a resiliência, essencial para a longevidade do pavimento.

Apaza et al. (2018) vão além, evidenciando que o microrrevestimento asfáltico a frio com agregados de rejeitos de ferro possui um desempenho equiparável ao dos agregados tradicionais. Essa descoberta é crucial, pois sugere que a utilização de rejeitos de minério pode ser estendida a uma variedade de técnicas de pavimentação, ampliando significativamente seu escopo de aplicação.

Sant’Ana Filho (2013), por sua vez, realça a competência dos blocos intertravados com rejeitos, enfatizando uma melhoria na densidade e redução da porosidade. Essas características são indicativas de um material de alta qualidade, capaz de suportar tensões significativas e, conseqüentemente, prolongar a vida útil do pavimento.

A pesquisa de Sá et al. (2019) é particularmente relevante por destacar a ampla aplicabilidade dos rejeitos de mineração, abrangendo desde misturas asfálticas até pavimentos intertravados e misturas granulares. Essa diversidade de aplicações reitera a flexibilidade técnica dos rejeitos de minério, abrindo portas para inovações em diversas frentes da construção de estradas.

Contudo, a ANTT e RDT (2020) trazem uma perspectiva cautelosa, apontando que as misturas com rejeitos podem apresentar uma estabilidade inferior em condições de campo em comparação com os resultados obtidos em laboratório. Este é um aspecto crítico que destaca a necessidade de uma avaliação mais aprofundada e de testes extensivos para garantir a confiabilidade desses materiais em cenários reais de aplicação.

Bispo et al. (2021) contribuem para a discussão ao demonstrarem que misturas asfálticas com rejeito de ardósia possuem resistência à tração superior, um indicativo da viabilidade técnica e da possibilidade de melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos pavimentos.

Oliveira e Faxina (2021) e Rahman, Mohajerani e Giustozzi (2020) ampliam a perspectiva técnica ao investigarem a adesividade do ligante asfáltico e a incorporação de diversos tipos de resíduos, respectivamente. Estes estudos evidenciam que o uso de rejeitos não apenas é tecnicamente viável, mas também pode resultar em melhorias no desempenho do pavimento, como maior resistência à tração e à fadiga.

Yaro et al. (2023) e Cao et al. (2022) exploram a potencialidade de melhorar a performance dos pavimentos com rejeitos de ferro, adicionando cal hidratada ou silano.

Isso sugere que a combinação de rejeitos com outros materiais pode otimizar ainda mais as propriedades técnicas das misturas asfálticas.

Sá et al. (2022) e Bastidas-Martínez et al. (2022) reforçam a viabilidade técnica dos rejeitos, destacando que as estruturas com adição de rejeitos de minério de ferro apresentam resultados promissores, sem a necessidade de aumentar as temperaturas de mistura e compactação.

Bhat e Kumar (2023) concluem que a estabilização de pavimentos com resíduos de minério de ferro é tecnicamente eficaz, trazendo benefícios que vão além das implicações ambientais e econômicas. Fei, Zhang e Ruan (2021) e Segui et al. (2023) corroboram essa visão, enfatizando a redução do volume de resíduos e a oferta de matérias-primas sustentáveis como resultados diretos da aplicação técnica dos rejeitos.

Russo et al. (2021) e Gayana e Chandar (2018) exploram o uso de misturas alternativas a frio e o potencial de reduzir a densidade do concreto com aditivos, respectivamente, demonstrando que os rejeitos podem ser adaptados para atender a diversas necessidades técnicas.

Por fim, Abukhattala (2016) ressalta a importância de continuar investigando o uso de materiais reciclados na estrutura de rodovias, destacando que, apesar dos avanços, ainda existem lacunas de conhecimento e preocupações técnicas que requerem atenção.

Em resumo, a análise dos estudos recentes sobre o uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica revela um campo promissor, com várias pesquisas apontando para a eficácia técnica dessa abordagem. Contudo, é essencial considerar as advertências sobre a variabilidade do comportamento desses materiais em condições reais e a necessidade de mais investigações para assegurar a confiabilidade e otimização de seu uso. A junção dessas perspectivas oferece um quadro detalhado e equilibrado das possibilidades técnicas e desafios associados ao uso de rejeitos de minério na pavimentação, um tema de relevância crescente para a engenharia civil moderna.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo se concentrou em realizar uma investigação sobre as implicações econômicas e ambientais decorrentes do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica, fornecendo insights valiosos sobre práticas sustentáveis e inovadoras, um tema cada vez mais premente no contexto atual de preocupações com o desenvolvimento sustentável e a responsabilidade ambiental.

A revisão integrativa realizada nesta monografia revelou uma ampla gama de estudos, evidenciando a viabilidade técnica e os benefícios ambientais e econômicos do uso de rejeitos de minério em pavimentos asfálticos. Os resultados destacam a potencialidade de reutilizar materiais que, de outra forma, seriam descartados, transformando-os em recursos valiosos para a construção civil. Este achado não apenas contribui para o avanço do conhecimento na área, mas também promove uma reflexão crítica sobre as práticas de engenharia, incentivando a adoção de soluções mais sustentáveis e eficientes.

Para a formação do engenheiro, o estudo deste tema é fundamental. Ele oferece uma visão abrangente sobre como a inovação e a sustentabilidade podem ser integradas na prática da engenharia, preparando o profissional para enfrentar os desafios contemporâneos do setor. Além disso, aprofunda o conhecimento técnico sobre materiais e técnicas de construção, ao mesmo tempo em que desenvolve uma consciência sobre o impacto ambiental e a importância da responsabilidade social na engenharia.

As discussões levantadas nesta monografia também sublinham a importância de continuar explorando e desenvolvendo pesquisas na área. Sugere-se, portanto, a realização de estudos adicionais que abordem não apenas os aspectos técnicos, mas também as implicações a longo prazo do uso de rejeitos de minério na pavimentação asfáltica. Seria benéfico investigar mais a fundo as questões relacionadas à durabilidade, ao ciclo de vida dos materiais e aos impactos socioeconômicos dessa prática.

Adicionalmente, propõe-se a elaboração de diretrizes e normativas específicas para a utilização de rejeitos de minério em projetos de pavimentação, garantindo que os padrões de segurança, qualidade e sustentabilidade sejam atendidos. A colaboração entre universidades, centros de pesquisa e o setor de construção civil é crucial para promover a inovação e a aplicação prática desses conhecimentos.

Por fim, ressalta-se a importância da disseminação das informações e das

descobertas realizadas neste campo de estudo. Workshops, seminários e publicações podem desempenhar um papel significativo na educação de profissionais da engenharia e do público em geral sobre os benefícios e as possibilidades oferecidas pelo uso de rejeitos de minério em pavimentações asfálticas.

Em síntese, esta monografia não apenas contribui para o avanço acadêmico e profissional do autor, mas também acrescenta à comunidade de engenharia civil um valioso conjunto de conhecimentos sobre práticas sustentáveis e inovadoras. A pesquisa empreendida aqui é um passo importante para a construção de um futuro mais sustentável e responsável no campo da engenharia civil.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ABUKHETTALA, M. Use of recycled materials in road construction. **International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering**, n. 138, p. 138-1-138-8, 2016.

ALJARIRI, S. M. S. et al. The Performance of Stone Mastic Asphalt Incorporating Iron Ore. **Civil Engineering and Architecture**, v. 11, n. 6, p. 3571-3576, 2023.

ANTT; RDT. **Execução de trecho experimental com o uso de rejeitos e resíduos de mineração**. Via 040: [s.n.].

APAZA, F. R. et al. Estudo sobre a utilização de Resíduo de Minério de Ferro em microrrevestimento asfáltico. **Transportes**, v. 26, n. 2, p. 118-138, 2018.

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G. et al. Effects of Iron Ore Tailing on Performance of Hot-Mix Asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 1, p. 1-11, 2022.

BATISTA, S. V. **Utilização de rejeitos de Mineração na construção civil com ênfase na infraestrutura rodoviária**. [s.l.] Faculdade Vale do Aço, 2022.

BHAT, Z. A.; KUMAR, A. Pavement Stabilization Using Iron Ore Waste. **International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)**, v. 10, n. 2, p. 1-4, 2023.

BISPO, M. E. G. et al. Avaliação Do Desempenho De Misturas Asfálticas Com Rejeitos De Ardósia. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 32918-32934, 2021.

CAO, L. et al. Utilization of iron tailings as aggregates in paving asphalt mixture: A sustainable and eco-friendly solution for mining waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, n. November, p. 1-6, 2022.

FEI, A.; ZHANG, T.; RUAN, Z. Research on Road Performance of Asphalt Mixture With Iron Waste Ore. **Research Square**, p. 1-11, 2021.

GAYANA, B. C.; CHANDAR, K. R. Sustainable use of mine waste and tailings with suitable admixture as aggregates in concrete pavements-A review. **Advances in Concrete Construction**, v. 6, n. 3, p. 221-243, 2018.

GOMES A. C. F. Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração. Dissertação do programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. Gestão e Manejo de Rejeitos da mineração/Instituto Brasileiro de Mineração. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.

LARA, L. L. D. et al. Estudo do comportamento de um solo com adição de rejeito de Flotação de minério de ferro para utilização em camadas de Pavimentos. **32 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, p. 1966–1977, 2018.

OLIVEIRA, I. C. S.; FAXINA, A. L. Iron ore tailings as fine mineral aggregate in asphalt mixtures Rejeito. **Transportes**, v. 29, n. 4, p. 1–17, 2021.

PEDROSO, C. L. Compósitos à base de rejeito do minério de ferro, resíduo de concreto, resíduos da produção de celulose e resíduo da produção da cal. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2020a.

RAHMAN, M. T.; MOHAJERANI, A.; GIUSTOZZI, F. Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. **Materials**, v. 13, n. 7, p. 1–21, 2020.

RUSSO, F. et al. Reusing jet grouting waste as filler for road asphalt mixtures of base layers. **Materials**, v. 14, n. 12, 2021.

SÁ, T. S. W. et al. Estado de arte do uso de rejeitos de mineração em pavimentos. **6 Encontro Nacional sobre aproveitamento de resíduos na construção civil**, n. 1, p. 1–15, 2019.

SÁ, T. S. W. et al. Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure. **Construction and Building Materials**, v. 342, n. August, p. 1–7, 2022.

SANT'ANA FILHO, J. N. DE. **Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados**. [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2013.

SANTOS, J. R. DOS; MENEGUELLI, M. R. S.; SARTÓRIO, E. A. Estudo da

viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério de ferro na camada de sub-base de pavimentação rodoviária. **Engenharia e Infraestrutura Urbana**, p. 1–47, 2021.

SEGUI, P. et al. Mining Wastes as Road Construction Material: A Review. **Minerals**, v. 13, n. 1, p. 1–18, 2023.

SOUZA, T. D. DE. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos dosados com rejeitos finos de minério de ferro**. [s.l.] Ministério da Defesa. Exército Brasileiro., 2019.

THANUSHA, V. Investigation of the Effects of Urban Iron Ore Tailing in Bituminous Mix. v. 10, n. 9, p. 1142–1148, 2021.

UGAMA, T. I.; EJEH, S. P.; AMARTEY, D. Y. Effect of Iron Ore Tailing on the Properties of Concrete. **Civil and Environmental Research**, v. 6, n. 2001, p. 8, 2014.

YARO, N. S. A. et al. A Comprehensive Overview of the Utilization of Recycled Waste Materials and Technologies in Asphalt Pavements: Towards Environmental and Sustainable Low-Carbon Roads. **Processes**, v. 11, n. 7, p. 1–31, 2023.

ZHOU, H. et al. The Composition and Performance of Iron Ore Tailings in Steel Slag-Based Autoclaved Aerated Concrete. **MDPI**, v. 13, p. 1–17, 2023. R