



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



Sabrina de Fátima Paula Mendes

**Análise comparativa de misturas com materiais alternativos
para camadas de pavimentos rodoviários**

Ouro Preto

2025

Sabrina de Fátima Paula Mendes

Análise comparativa de misturas com materiais alternativos
para camadas de pavimentos rodoviários

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito parcial
para obtenção do título de Licenciado em
Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Daniela Antunes Lessa

Ouro Preto
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M538a Mendes, Sabrina de Fatima Paula.

Análise comparativa de misturas com materiais alternativos para camadas de pavimentos rodoviários. [manuscrito] / Sabrina de Fatima Paula Mendes. - 2025.

71 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Daniela Antunes Lessa.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Rochas - Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 2. Engenharia rodoviária - Pavimentos. 3. Minérios de ferro - Rejeitos (Metalurgia). 4. Asfalto - Asfalto fresado. I. Lessa, Daniela Antunes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.01

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Sabrina de Fátima Paula Mendes

Análise comparativa de misturas com materiais alternativos para camadas de pavimentos rodoviários

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

Aprovada em 19 de dezembro de 2025

Membros da banca

Prof. ^a Dr.^a - Daniela Antunes Lessa - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. ^a M.^a - Marcela Paula Grobério (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. - Geraldo Donizetti de Paula (Universidade Federal de Ouro Preto)

Daniela Antunes Lessa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/01/2026



Documento assinado eletronicamente por **Daniela Antunes Lessa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/01/2026, às 18:57, 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, informando o código verificador **1040887** e o código CRC **C1454AC1**.

Dedico todo e qualquer sucesso meu aos meus pais,
que, sob muito sol, me fizeram chegar aqui,
pela sombra e com água fresca.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que providenciou para que tudo ocorresse da melhor maneira possível, permitindo o desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, D.Sc. Daniela Antunes Lessa, pelo conhecimento compartilhado, pela orientação e pelo apoio essencial para a realização desta pesquisa.

À minha família, especialmente aos meus pais e irmãos, pelo suporte incansável, pela atenção, carinho e confiança, que me motivaram a seguir firme até o fim desta jornada acadêmica.

A Gustavo, pelo apoio constante, pelas palavras de incentivo nos dias difíceis e por tornar esta caminhada mais leve.

Aos amigos, tanto os que me acompanharam ao longo da vida quanto aqueles que conheci na Universidade Federal de Ouro Preto, pela amizade, pela parceria nos estudos e pelo apoio nos momentos felizes e desafiadores.

Ao Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP, pelo conhecimento transmitido e por todo o suporte para a execução desta pesquisa.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da UFOP, pelos ensinamentos, dedicação e disponibilidade em ajudar.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

RESUMO

A crescente geração de resíduos provenientes das atividades mineradoras e da construção civil tem impulsionado pesquisas voltadas ao aproveitamento desses materiais como alternativas sustentáveis para a infraestrutura rodoviária. Além de contribuir para a mitigação de impactos ambientais, essa abordagem busca atender à demanda por materiais economicamente viáveis e tecnicamente eficientes para compor as camadas de pavimentos. Nesse contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo avaliar o potencial de aplicação do rejeito de minério de ferro (RMF), do asfalto fresado, do resíduo de quartzito foliado (RQF) e do esteatito (pedra-sabão) como agregados alternativos em misturas destinadas às camadas de base e sub-base de pavimentos. O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Ferrovias e Asfaltos (LABFER) da Universidade Federal de Ouro Preto, onde foram realizadas a caracterização física e mecânica dos materiais, bem como os ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR) das diferentes composições analisadas. As misturas com maior teor de asfalto fresado apresentaram desempenho superior, com valores de CBR compatíveis com o uso em camadas de base, resultado associado à presença de ligante residual e à maior coesão entre as partículas. Por sua vez, as misturas contendo rejeito de minério de ferro e resíduo de quartzito foliado apresentaram comportamento satisfatório para sub-bases e reforço de subleito. Dessa forma, os resultados demonstram a viabilidade técnica e ambiental do uso combinado desses materiais como alternativa para a pavimentação, promovendo economia de recursos e contribuindo para práticas mais sustentáveis nas obras rodoviárias.

Palavras-chave: resíduos de rochas; pavimentação rodoviária; rejeito de minério de ferro; asfalto fresado; materiais alternativos.

ABSTRACT

The increasing generation of waste from mining and civil construction activities has stimulated research focused on the reuse of these materials as sustainable alternatives for road infrastructure. In addition to contributing to the mitigation of environmental impacts, this approach seeks to meet the demand for economically viable and technically efficient materials for pavement layers. In this context, this undergraduate thesis aimed to evaluate the potential application of iron ore tailings (IOT), reclaimed asphalt pavement (RAP), foliated quartzite waste (FQW), and soapstone waste (SSW) as alternative aggregates in mixtures intended for pavement base and subbase layers. The study was conducted at the Railway and Asphalt Laboratory (LABFER) of the Federal University of Ouro Preto, where the physical and mechanical characterization of the materials was performed, as well as compaction and California Bearing Ratio (CBR) tests of the different analyzed mixtures. Mixtures with a higher content of reclaimed asphalt pavement showed superior performance, with CBR values suitable for use in base layers, a result associated with the presence of residual binder and increased particle cohesion. In turn, mixtures containing iron ore tailings and foliated quartzite waste exhibited satisfactory performance for subbase layers and subgrade reinforcement. Thus, the results demonstrate the technical and environmental feasibility of the combined use of these materials as an alternative for pavement construction, promoting resource savings and contributing to more sustainable practices in road works.

Keywords: stone waste; road paving; iron ore tailings; reclaimed asphalt pavement; alternative materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da extensão das rodovias federais pavimentadas – Brasil – 2013 a 2023 (valores em mil km).....	23
Figura 2 – Classificação do Estado Geral.....	23
Figura 3 - (a) Pavimento Flexível; (b) Pavimento Rígido	25
Figura 4 - Representação da estrutura de pavimentos..	26
Figura 5 - Fluxograma da metodologia.	37
Figura 6 - Amostra do RQF e do RMF.....	38
Figura 7 - Ensaio de densidade real do RMF.	39
Figura 8 - Ensaio de limite de liquidez e plasticidade.	39
Figura 9 - Ensaio de granulometria completa: peneiramento e sedimentação	40
Figura 10 - Compactação do RMF - Proctor normal.....	40
Figura 11 - Índice de Suporte Califórnia (Imersão).	41
Figura 12 - Mini-MCV RMF.....	41
Figura 13 - Equivalente de areia do RMF.	42
Figura 14 - Análise granulométrica do RQF.	42
Figura 15 - Índice de forma do RQF.	43
Figura 16 - Amostra do RQF depois do ensaio de abrasão.	43
Figura 17 - Cápsulas para determinação de Umidade Ótima.	44
Figura 18 - Frações de granulometria de asfalto fresado e esteatito.	44

Figura 19 - Curva granulométrica do RMF.....	47
Figura 20 - Curva granulométrica do RQF.....	48
Figura 21 - Curva granulométrica do quartzito.	48
Figura 22 - Curva granulométrica do asfalto fresado.....	49
Figura 23 - Curva granulométrica do esteatito.	49
Figura 24 - Curva de compactação do RMF.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporções das misturas dos ensaios realizados por Viana (2021).....	45
Tabela 2 - Proporções das misturas dos ensaios realizados por Oliveira (2022).	45
Tabela 3 - Limites de Atterberg do RMF.	49
Tabela 4 - Enquadramento granulométrico das misturas segundo o DNIT (2006a).....	50
Tabela 5 - Resultado do ensaio de teor de betume.	52
Tabela 6 - Massa específica, equivalente de areia e absorção das amostras.	52
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de compactação e CBR das misturas.....	54
Tabela 8 - Classificação MCT do RMF.	55
Tabela 9 - Índice suporte Califórnia (CBR) do RMF e RQF.	55
Tabela 10 - Índice de Suporte Califórnia (CBR) das misturas de RMF e RQF.	55
Tabela 11 - Índice de forma das partículas do RQF.	57
Tabela 12 - Abrasão Los Angeles do RQF.....	57
Tabela 13 - Resultados dos ensaios com quartzito e esteatito.....	58
Tabela 14 - Comparação dos parâmetros físicos e mecânico das misturas analisadas nos estudos de Viana (2021) e Oliveira (2022).....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre os materiais estudados.....	34
Quadro 2 - Peculiaridades e referências da literatura de cada material.....	36
Quadro 3 - Análise comparativa dos materiais alternativos.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Asfalto Fresado
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CaF ₂	Fluorita
CaO	Óxido de cálcio
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
Cc	Coeficiente de Curvatura
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cu	Coeficiente de Uniformidade
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
FA	Fresado de Asfalto
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LABFER	Laboratório de Ferrovias e Asfaltos da Universidade Federal de Ouro Preto
LA	Solo Laterítico Arenoso
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MgO	Óxido de Magnésio

NBR Norma Brasileira
NP Ausência de Plasticidade
ODS Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU Organização das Nações Unidas
RAP *Reclaimed Asphalt Pavement* (Asfalto Fresado)
RCD Resíduos de Construção e Demolição
RE Resíduo de Esteatito
RIMA Relatório de Impacto Ambiental
RMF Rejeito de Minério de Ferro
RPS Resíduo de Pedra Sabão
RQF Resíduo de Quartzito Folhado
SiO₂ Dióxido de Silício
TRB *Transportation Research Board*
UFOP Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1. Introdução	16
1.1. Objetivos.....	20
1.1.1. Objetivos específicos	20
1.2. Justificativa.....	20
2. Revisão da literatura	22
2.1. Infraestrutura Rodoviária no Brasil	22
2.2. Tipos e Estrutura dos Pavimentos	24
2.3. Materiais Convencionais em Obras Viárias	27
2.4. Materiais alternativos em Obras Viárias	28
2.4.1. Resíduos de Rochas Ornamentais (Quartzito e Esteatito).....	29
2.4.2. Asfalto Fresado.....	30
2.4.3. Rejeito de minério de ferro.....	31
2.5. Comparativo entre os materiais estudados	33
3. Metodologia.....	37
3.1. Integração dos estudos anteriores.....	37
3.2. Materiais Utilizados.....	38
3.3. Ensaio de Caracterização	39
3.4. Misturas experimentais.....	45
3.5. Procedimento de Análise Comparativa	46
4. Resultados e Discussões.....	47
4.1. Granulometria e Limites de Atterberg.....	47
4.2. Massa específica, equivalente de areia e absorção	52

4.3.	Ensaaios de compactação (Proctor Normal)	53
4.4.	Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR).....	55
4.5.	Abrasão Los Angeles e forma das partículas	57
4.6.	Síntese comparativa dos materiais.....	59
5.	Conclusão	63
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros	64
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma nação está diretamente ligado ao progresso do setor de transporte. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (2019), em um país de dimensões continentais como o Brasil, os aspectos ligados à logística passam a exercer influência crescente nos planejamentos estratégicos das organizações. Portanto, os diferentes modos de transporte de mercadorias e pessoas, tanto no âmbito nacional quanto internacional, precisam ser avaliados de maneira criteriosa para que as empresas possam tomar decisões mais eficientes relacionadas ao transporte (GÓES, 2020).

De acordo com a síntese do modo rodoviário (CNT, 2024), a malha brasileira totaliza 1.720.909 quilômetros, dos quais 213.500 quilômetros (12,4%) são pavimentados, 1.350.100 quilômetros (78,5%) não possuem pavimentação e 157.309 quilômetros (9,1%) correspondem a rodovias planejadas. Desse total pavimentado, 111.853 quilômetros foram avaliados na edição mais recente da Pesquisa CNT de Rodovias, o que representa 52,4% da extensão pavimentada nacional, reforçando a relevância e a representatividade do levantamento. Esse panorama reforça a necessidade de investigar soluções técnicas que incorporem materiais alternativos nas misturas utilizadas em pavimentação, tema que tem recebido crescente atenção na literatura.

Nesse contexto, os pavimentos rodoviários desempenham papel fundamental como parte da infraestrutura que sustenta o transporte terrestre, sendo estruturas compostas por camadas sobrepostas, apoiadas sobre a terraplenagem, projetadas de forma técnica e economicamente viável para suportar as solicitações oriundas do tráfego e das condições climáticas, assegurando aos usuários conforto, segurança e economia (BERNUCCI *et al.*, 2010). O sistema de pavimentação tem como objetivo suportar e distribuir os esforços gerados pelas cargas de tráfego às camadas inferiores, sem comprometer a funcionalidade do pavimento ao longo de sua vida útil, além de proporcionar maior segurança e conforto durante o rolamento (RUSSO, 2011).

Entre os tipos mais utilizados, destacam-se os pavimentos flexíveis (asfálticos) e os rígidos (concreto-cimento). Os primeiros, predominantes no Brasil, apresentam diversas camadas, sendo a superior denominada revestimento, composta por misturas asfálticas à

base de agregados e ligantes. Já os pavimentos de concreto-cimento, com menor número de camadas, utilizam revestimento de cimento Portland (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Os pavimentos flexíveis, ou asfálticos, são constituídos por camadas que não são dimensionadas para resistir predominantemente à tração, com um revestimento betuminoso apoiado sobre base, sub-base e subleito, podendo algumas camadas serem suprimidas dependendo do volume de tráfego e da capacidade de suporte do subleito, apresentando geralmente execução mais rápida e menor custo inicial. Já os pavimentos rígidos, ou de concreto, apresentam maior rigidez e distribuem tensões de forma mais ampla, com a superfície em concreto de cimento Portland apoiada sobre sub-base e subleito reforçado, sendo indicados para corredores urbanos de tráfego pesado devido à maior durabilidade e resistência, com vida útil cerca de três vezes superior à dos pavimentos flexíveis (SANTOS e LEANDRO, 2017; MARQUES, 2006).

Considerando que o transporte rodoviário é o principal meio utilizado no Brasil, os impactos ambientais decorrentes de sua implantação e operação foram por muito tempo vistos como consequência natural, compensados pelos benefícios do setor. Entretanto, a crescente preocupação com o meio ambiente e os recursos naturais resultou na obrigatoriedade de estudos de impacto ambiental (EIA) e relatórios de impacto ambiental (RIMA) para obras desse porte, conforme estabelecido pela resolução CONAMA nº 001/1986.

Os convencionais pavimentos mencionados apresentam desgaste contínuo em função da ação do tráfego e das condições climáticas. Entre as patologias mais frequentes estão fissuras e trincas, que, se não corrigidas, podem evoluir para buracos. Ondulações e afundamentos também são comuns, ocasionando desconforto e instabilidade na circulação de veículos (SILVA, 2022a). Para preservar as condições adequadas, é necessária a execução regular de serviços de manutenção cujo custo, somente entre 2006 e 2018, ultrapassou 68 bilhões de reais, considerando apenas rodovias federais e resultando em uma média anual de 5,27 bilhões (CNT, 2019). Esse conjunto de patologias e custos crescentes evidencia a importância de buscar materiais com maior durabilidade e melhor desempenho nas camadas do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2010; CNT, 2019).

A infraestrutura de transporte está diretamente associada ao desenvolvimento econômico e social, devendo integrar os planos estratégicos nacionais. O transporte rodoviário é o principal meio de transporte no Brasil, responsável por cerca de 65% do escoamento de cargas e quase 95% do transporte de passageiros (CNT, 2024). A eficiência das atividades econômicas e sociais depende diretamente da qualidade das rodovias, tornando essencial que a infraestrutura esteja adequada ao tráfego de pessoas e mercadorias. Ainda segundo a mesma fonte, o país conta com mais de 213 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, que futuramente deverão receber veículos elétricos e autônomos (CNT, 2024).

A Pesquisa CNT de Rodovias 2024 revelou que 68,8% do pavimento avaliado no país apresenta algum tipo de defeito e não é classificado como Ótimo. Considerando as extensões classificadas como Bom, Regular, Ruim ou Péssimo, estima-se que haja um aumento médio de 32,5% nos custos operacionais do transporte rodoviário no Brasil em função da qualidade do pavimento. Ainda segundo a mesma pesquisa, problemas estruturais no pavimento e fatores externos que afetam seu desempenho são as principais causas das condições precárias observadas.

A construção de pavimentos asfálticos demanda grande quantidade de materiais não renováveis. Diante do rápido esgotamento dessas fontes de agregados, a indústria tem buscado identificar materiais alternativos, visando à construção de rodovias mais sustentáveis e com menor custo (SANTOS e LEANDRO, 2017). Entre esses materiais, ganha relevância o uso do resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais, gerado em grande volume. Em 2015, segundo a ABIROCHAS (2015), o Brasil exportou 1,17 milhão de toneladas de rochas processadas, especialmente rochas silicáticas (granito) e similares, como quartzito e esteatito (pedra-sabão). Embora esse dado se refira ao período de 2015, a produção mineral recente indica que a geração de resíduos permanece elevada, reforçando a relevância de soluções para seu reaproveitamento. Entre os resíduos estudados destacam-se aqueles provenientes do beneficiamento de rochas silicáticas, como granito, quartzito e esteatito (pedra-sabão), amplamente discutidos na literatura para uso em misturas asfálticas (RIBEIRO *et al.*, 2009; GOTTARDI, 2015; SANTOS e LEANDRO, 2017).

Além desses, outras alternativas estudadas para a pavimentação incluem a incorporação de borracha proveniente de pneus inservíveis em ligantes asfálticos (ODRA, 2000), resíduos sólidos de construção e demolição (BEJA, 2014), rejeitos de barragens de minério de ferro (BASTOS, 2013) e resíduos de mineração de quartzito (SILVA 2022a; ALECRIM, 2009). Segundo este último autor, cerca de 90% dos quartzitos extraídos em Minas Gerais se transformam em resíduos, e parte dessas sobras pode ser utilizada em diferentes segmentos da engenharia civil, inclusive na pavimentação. Entretanto, apesar da existência de estudos individuais envolvendo cada um desses materiais alternativos, ainda é limitada a comparação integrada entre seu desempenho técnico e seu potencial de reaproveitamento nas camadas de base e sub-base. Essa ausência de sistematização dificulta a identificação de quais materiais apresentam maior viabilidade de uso em pavimentação rodoviária.

Considerando a necessidade de reduzir impactos ambientais e explorar alternativas técnicas viáveis, este trabalho propõe investigar a aplicação de rejeitos de minério de ferro, asfalto fresado e resíduos de rochas ornamentais regionais, como quartzito e pedrasabão, como agregados nas camadas de base e sub-base de pavimentos, buscando comparar o desempenho apresentado nos estudos anteriores conduzidos com esses materiais, sendo esperado que a utilização dos mesmos possa proporcionar benefícios técnicos, econômicos e ambientais, ao reduzir impactos e promover o aproveitamento de recursos locais. Diante desse cenário, o uso de materiais alternativos nas camadas do pavimento não apenas reduz a pressão sobre recursos naturais como também gera benefícios ambientais diretos, aproximando a pavimentação das agendas de sustentabilidade.

A implementação de soluções sustentáveis na infraestrutura rodoviária, como o uso de materiais alternativos na pavimentação, contribui diretamente para diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. A melhoria da eficiência e durabilidade dos pavimentos corrobora a ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, ao promover infraestrutura resiliente e sustentável. A redução dos impactos ambientais e a otimização do uso de recursos naturais, está alinhada a ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, enquanto a promoção de vias seguras e eficientes favorece cidades mais inclusivas e sustentáveis, em conformidade com a ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis.

Dessa forma, o presente estudo demonstra que práticas de pavimentação inovadoras podem integrar o desenvolvimento econômico à preservação ambiental e à qualidade de vida da sociedade.

1.1. OBJETIVOS

Comparar, com base em dados existentes, o desempenho técnico e o potencial ambiental de misturas produzidas com rejeito de minério de ferro, asfalto fresado e resíduos de quartzito e pedra-sabão, aplicadas às camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

1.1.1. Objetivos específicos

- Identificar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais alternativos selecionados, com base em dados existentes.
- Compilar e organizar as composições de misturas estudadas em pesquisas anteriores, considerando diferentes proporções entre os resíduos.
- Avaliar comparativamente o desempenho das misturas quanto à resistência, durabilidade e absorção de água, utilizando resultados disponíveis na literatura e em estudos prévios.
- Analisar o potencial de reaproveitamento dos materiais alternativos nas camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.
- Avaliar os benefícios ambientais e econômicos associados à substituição parcial de agregados naturais por resíduos industriais e de mineração.
- Contribuir para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis aplicáveis à infraestrutura rodoviária

1.2. JUSTIFICATIVA

O estudo da aplicação de materiais alternativos na infraestrutura rodoviária torna-se relevante diante da elevada dependência do transporte rodoviário no Brasil e das condições insatisfatórias observadas em grande parte da malha pavimentada. A predominância desse modo, responsável por 65% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros (CNT, 2024), aliada à necessidade constante de manutenção e

aos elevados custos envolvidos, reforça a importância de investigar soluções técnicas que aumentem a durabilidade e reduzam gastos operacionais.

A utilização de coprodutos industriais como os resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais representa uma oportunidade para conciliar ganhos técnicos e benefícios ambientais. Esses materiais, gerados em grande escala no país (ABM, 2008; ABIROCHAS, 2015; IPEA, 2010), ainda apresentam aproveitamento limitado, o que acarreta problemas de disposição e impactos ambientais significativos. Assim, a possibilidade de incorporá-los em camadas de base e sub-base de pavimentos contribui para a redução do consumo de agregados naturais, mitigação de impactos ambientais e diminuição de resíduos descartados inadequadamente, alinhando-se ao ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis e podendo contribuir indiretamente para metas de ação climática (ODS 13).

Apesar dos avanços individuais, ainda há pouca sistematização comparativa entre esses materiais quanto ao desempenho técnico e ao potencial de reaproveitamento, o que reforça a necessidade deste estudo.

Além disso, o desenvolvimento e a avaliação comparativa de estudos envolvendo misturas contendo esses materiais favorecem a inovação tecnológica no setor de infraestrutura rodoviária e promovem cidades e comunidades mais sustentáveis (ODS 9 e ODS 11). Dessa forma, a presente pesquisa se justifica pela potencial contribuição ao avanço do conhecimento técnico e pela oferta de alternativas viáveis para construção de pavimentos mais duráveis, econômicos e ambientalmente responsáveis.

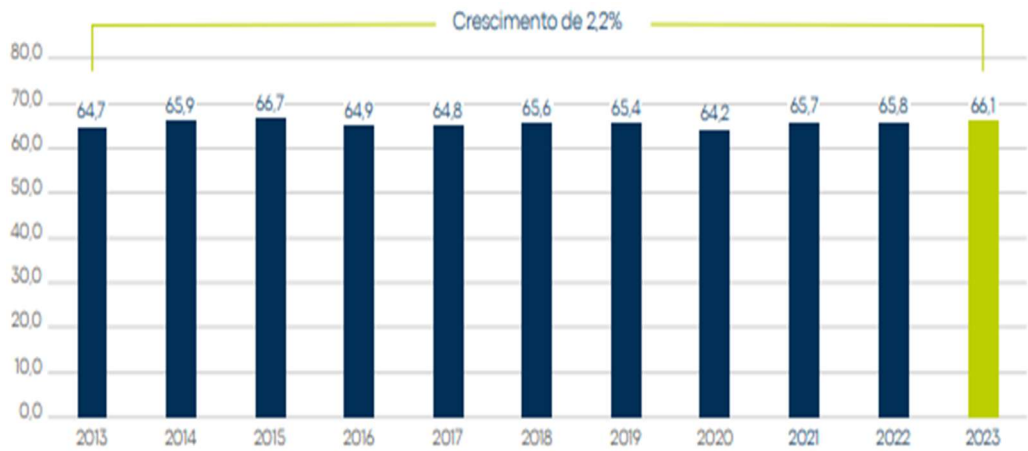
2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo reúne os principais conceitos técnicos e os estudos mais relevantes relacionados à estrutura dos pavimentos, aos materiais tradicionalmente empregados em obras viárias e às possibilidades de substituição parcial por resíduos reaproveitáveis. Também são apresentados estudos de caso que embasam a proposta deste trabalho. A revisão estabelece os fundamentos teóricos necessários para a análise comparativa das misturas investigadas, contribuindo para a construção de alternativas viáveis e ambientalmente responsáveis na engenharia civil. A ênfase da revisão recai sobre materiais aplicáveis às camadas de base e sub-base, foco das misturas comparadas neste trabalho.

2.1. INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA NO BRASIL

O desenvolvimento industrial de um país gera a necessidade de deslocamento de matéria-prima e bens manufaturados entre diferentes regiões, o que impulsiona a infraestrutura dos meios de transporte e, conseqüentemente, sua expansão (PEREIRA e SILVEIRA, 2010). No Brasil, a ênfase no transporte rodoviário consolidou-se a partir da década de 1950, impulsionada pela implantação da indústria automobilística e pela necessidade de interiorização e integração do território nacional (GOMES, 2006). A evolução da malha rodoviária federal pavimentada entre 2013 e 2023 evidencia esse crescimento, como pode ser observado na Figura 1, e, além de sua relevância econômica, o transporte rodoviário desempenha papel essencial na inclusão social e no desenvolvimento regional, ao viabilizar o acesso de comunidades isoladas a serviços básicos como saúde, educação e emprego (BNDES, 2010).

Figura 1 - Evolução da extensão das rodovias federais pavimentadas – Brasil – 2013 a 2023 (valores em mil km).



Fonte: CNT (2024).

Apesar dessa importância, a malha viária brasileira apresenta graves deficiências estruturais e operacionais. De acordo com a 28ª edição da Pesquisa CNT de Rodovias, realizada em 2024, 67,0% dos 111.853 quilômetros avaliados foram classificados como regulares, ruins ou péssimos, enquanto 33,0% receberam classificação ótimo ou bom. Dentro desse grupo intermediário, 40,4% encontram-se na condição regular e estão sujeitos a uma deterioração mais severa, exigindo manutenção imediata para evitar que migrem para as categorias ruim ou péssimo, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Classificação do Estado Geral.

Estado Geral	Extensão total	
	km	%
Ótimo	8.338	7,5
Bom	28.476	25,5
Regular	45.263	40,4
Ruim	23.239	20,8
Péssimo	6.537	5,8
Total	111.853	100,0

Fonte: CNT (2024).

Além do pavimento comprometido, a sinalização deficiente e os traçados geométricos inadequados contribuem para a insegurança e a ineficiência no deslocamento de cargas e pessoas. Estima-se, por exemplo, que 44,6% das rodovias não possuem acostamento e que cerca de 30% das curvas perigosas estejam sem sinalização adequada (AGÊNCIA BRASIL, 2022).

Essas deficiências impactam diretamente a economia e a qualidade de vida da população. Entre os principais efeitos estão o aumento dos custos logísticos, o maior consumo de combustível, o desgaste acelerado dos veículos e a elevação nos índices de acidentes. Entre 2016 e julho de 2024, o custo total acumulado dos acidentes em rodovias federais somou R\$125,56 bilhões. A média anual dos custos para os anos de 2016 a 2023 foi de R\$14,58 bilhões e, em 2024 (até 31 de julho), o custo estimado dos acidentes foi de R\$8,91 bilhões (CNT, 2024). Em 2021, os sinistros ocorridos nas rodovias federais representaram um prejuízo estimado em R\$12,75 bilhões, além de provocarem mais de 5.300 mortes e aproximadamente 48 mil feridos (CNT, 2022).

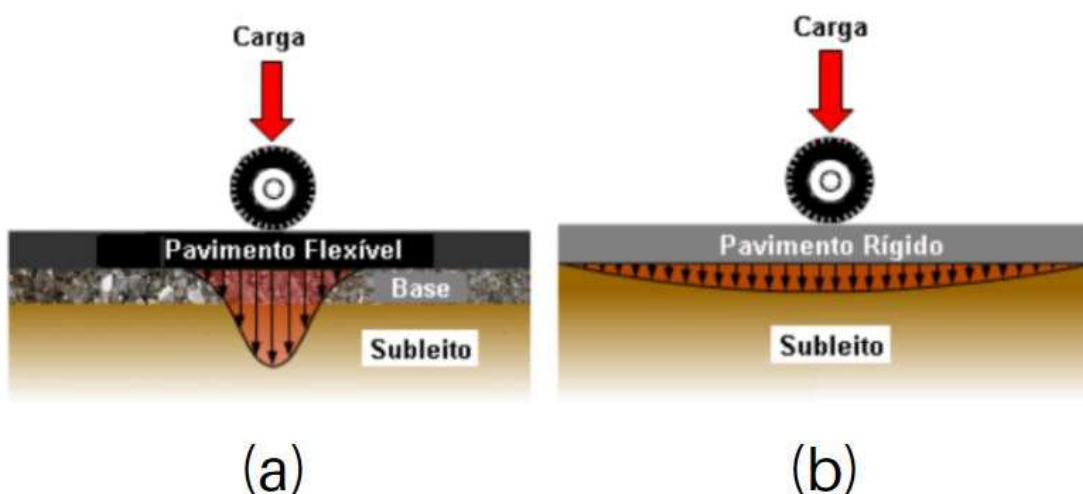
Diante desse cenário de conservação inadequada e deficiências estruturais da malha viária, estudos têm apontado a viabilidade do uso de materiais alternativos, como resíduos industriais e minerais, visando aumentar a durabilidade e reduzir os custos de manutenção dos pavimentos (SILVA, 2022a). Essas deficiências estruturais reforçam a necessidade de investigar materiais mais duráveis e economicamente viáveis para camadas de base e sub-base, como os avaliados neste estudo.

2.2. TIPOS E ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS

Tecnicamente, “pavimento é uma estrutura composta por camadas construída sobre uma fundação (terreno natural) denominada de subleito”, destinado a resistir aos esforços do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários boas condições de rolamento, com conforto, segurança e economia (ODA *et al.*, 2024). Com o objetivo de assegurar a segurança do tráfego nas rodovias, o pavimento deve suportar os efeitos das variações climáticas, proporcionar deslocamento suave, não gerar desgaste excessivo dos pneus nem altos níveis de ruído, possuir estrutura resistente ao fluxo de veículos, permitir o escoamento eficiente da água em sua superfície, contar com sistemas de drenagem adequados para a chuva e oferecer boa resistência à derrapagem (CNT, 2019).

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Mas recentemente há uma tendência de usar-se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento, como ilustrado na Figura 3. A quantidade e a espessura de cada camada variam de acordo com a qualidade do subleito, com o tráfego que irá solicitar o pavimento e com as características dos materiais que compõem a sua estrutura (ODA *et al.*, 2024).

Figura 3 - (a) Pavimento Flexível; (b) Pavimento Rígido



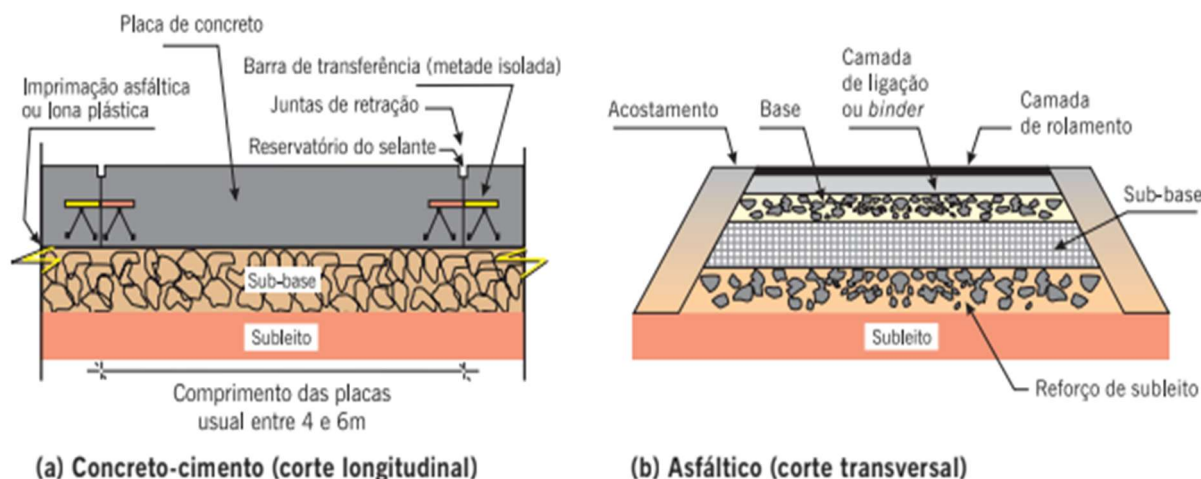
Fonte: Cava (2021).

Os pavimentos de concreto de cimento Portland são compostos por placas rígidas assentadas sobre camadas inferiores, como base, sub-base e subleito, que podem ser reforçadas conforme as condições do solo natural. Esse tipo de estrutura é mais comumente aplicado em áreas urbanas com tráfego intenso, em razão de sua alta durabilidade e resistência mecânica, o que resulta em uma vida útil significativamente superior quando comparada à dos pavimentos flexíveis, como representado na Figura 4 (SANTOS e LEANDRO, 2017).

Segundo Santos e Leandro (2017), os pavimentos asfálticos, classificados como flexíveis, são constituídos por uma camada de revestimento betuminoso apoiada sobre camadas estruturais de base, sub-base e subleito, podendo estas ser ajustadas ou até mesmo omitidas conforme a resistência do solo e as exigências de carga da via. Em

comparação com os pavimentos rígidos, os pavimentos flexíveis apresentam vantagens como menor custo inicial de implantação e maior agilidade na execução.

Figura 4 - Representação da estrutura de pavimentos.



Fonte: Bernucci *et al.*, (2010).

Os pavimentos do tipo semirrígido representam uma solução intermediária entre os pavimentos flexíveis e os rígidos. Este tipo de estrutura caracteriza-se pela utilização de uma base cimentada com algum aglutinante de propriedades cimentícias, como o solo-cimento, combinada com uma camada de revestimento asfáltico. Tal configuração permite a obtenção de maior rigidez e resistência à deformação, sendo recomendada especialmente em rodovias com tráfego intenso ou condições geotécnicas desfavoráveis (DNIT, 2010c).

O revestimento superficial utiliza agregados e um ligante asfáltico, com a função de suportar diretamente os esforços do tráfego e transferi-los às camadas inferiores da estrutura. Já a base e a sub-base, compostas por materiais granulares, têm como papel atenuar as tensões geradas pelas cargas repetidas e distribuí-las ao subleito (GONÇALVES, 1999; SILVA, 2022a). Para garantir a durabilidade e funcionalidade da estrutura, cada tipo de pavimento deve atender a requisitos técnicos como resistência à fadiga, capacidade de suporte de carga, resistência às intempéries e facilidade de manutenção. Pavimentos rígidos exigem maior controle na execução, especialmente no que se refere ao controle de fissuras, enquanto pavimentos flexíveis demandam atenção constante à manutenção superficial e recapeamentos periódicos (GUEL *et al.*, 2024). A

compreensão das funções estruturais dessas camadas é essencial para avaliar a adequação de materiais alternativos empregados nas misturas estudadas neste TCC.

2.3. MATERIAIS CONVENCIONAIS EM OBRAS VIÁRIAS

Os agregados naturais como areia, brita e pedregulhos são tradicionalmente empregados na estrutura de pavimentos rodoviários e exercem função crítica ao conferir resistência, estabilidade volumétrica e distribuição adequada das cargas ao longo das camadas (BERNUCCI *et al.*, 2010). Esses materiais são comumente utilizados em sub-base, base e, por vezes, em revestimentos primários. Os ligantes, como o cimento Portland ou os ligantes asfálticos, têm importância fundamental na coesão entre partículas e na durabilidade do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), as camadas estruturais do pavimento devem satisfazer critérios técnicos rigorosos, envolvendo características físicas e mecânicas, como distribuição granulométrica adequada, resistência à compressão e controle da deformabilidade, conforme estabelecido nas normas DNIT 139/2010-ES (DNIT, 2010b) e DNIT 141/2022-ES (DNIT, 2022). Tais características estão diretamente relacionadas à qualidade dos materiais utilizados em sua execução. Conforme Santos e Leandro (2022), os materiais empregados em base e sub-base podem ser classificados, com base no comportamento frente aos esforços solicitantes, nos seguintes grupos:

- i) materiais granulares e solos, como brita graduada simples, macadame e misturas do tipo solo-agregado;
- ii) materiais cimentados, a exemplo de solo-cimento e solo-cal, que apresentam maior rigidez e capacidade de suporte devido à estabilização com ligantes hidráulicos; e
- iii) materiais asfálticos, sendo os mais comuns o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e o Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), empregados principalmente nas camadas de revestimento, por proporcionarem impermeabilidade e conforto ao rolamento. Essas classificações servem de referência para comparar o desempenho das misturas com materiais alternativos analisadas neste trabalho.

Apesar das vantagens técnicas, o uso extensivo de agregados naturais apresenta sérias limitações. A extração de jazidas e areias à margem dos rios pode provocar degradação de ecossistemas, impactos ao solo, alteração de cursos d'água e desmatamento (BARROS *et al.*, 2013). Além disso, o transporte desses insumos, muitas vezes provenientes de regiões distantes, eleva os custos logísticos e compromete o cronograma das obras em regiões com infraestrutura limitada. Esses fatores reduziram a disponibilidade legalmente viável de jazidas, gerando restrições ao fornecimento contínuo (BARROS *et al.*, 2013).

Diante desse contexto, o cenário está propício à introdução de materiais alternativos, especialmente aqueles gerados a partir de resíduos. Estudos recentes demonstram que agregados reciclados de Resíduos da Construção Civil (RCD) ou concretos pulverizados apresentam desempenho satisfatório para aplicação em camadas não estruturais. (BISMAK *et al.*, 2011). Em particular, os resíduos de concreto triturado têm sido estudados como substitutos dos agregados naturais, com ganhos ambientais e redução nos custos de transporte decorrentes da menor extração de matéria prima virgem. (TSENG, 2010).

Essas evidências reforçam a importância de explorar soluções sustentáveis na pavimentação viária, minimizando os impactos dos métodos convencionais e preparando o terreno para a análise aprofundada de materiais alternativos nas seções seguintes.

2.4. MATERIAIS ALTERNATIVOS EM OBRAS VIÁRIAS

A existência de infraestrutura laboratorial adequada, aliada à formação de recursos humanos qualificados na área, possibilita a investigação de materiais alternativos e o desenvolvimento de novas tecnologias para as camadas do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2010). Nesse contexto, visando substituir os agregados naturais empregados na superestrutura rodoviária, diversos resíduos vêm sendo estudados para avaliar seu desempenho e validar sua aplicabilidade na pavimentação. Essas pesquisas buscam identificar materiais capazes de atender aos requisitos técnicos normatizados, especialmente no que tange à resistência e durabilidade do pavimento (SILVA, 2022a).

2.4.1. RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS (QUARTZITO E ESTEATITO)

Em 2018, o Brasil posicionou-se como o 4º maior produtor e o 6º exportador mundial de rochas ornamentais, em termos de volume físico, destacando-se na produção de blocos de granito, chapas de travertino e quartzito foliado (ABIROCHAS, 2018). A extração e o beneficiamento dessas rochas geram grandes volumes de resíduos sólidos, especialmente na forma de serragem, pó de corte e fragmentos irregulares, que muitas vezes são descartados sem tratamento adequado, contribuindo para impactos ambientais significativos (GONÇALVES *et al.*, 2017). No caso do quartzito e do esteatito (pedra-sabão), esses resíduos apresentam composição mineralógica e características físicas que despertam interesse para aplicação como material alternativo em obras viárias.

As etapas iniciais do aproveitamento das rochas ornamentais envolvem a lavra, onde ocorre a extração dos blocos, caracterizada pela remoção de material útil ou economicamente viável a partir de maciços rochosos e matacões. Posteriormente, esses blocos são encaminhados para o processo de beneficiamento, geralmente realizado em serrarias especializadas (GOTTARDI, 2015). Segundo Frascá (2007), nessa fase da lavra são empregados fios diamantados, martelos, explosivos e massas expansivas para a retirada dos blocos. A extração deve assegurar blocos com dimensões adequadas, de modo a otimizar o aproveitamento do material e atender às exigências operacionais dos equipamentos utilizados nas etapas subsequentes do beneficiamento. Ressalta-se que, em todas as fases do processo, há geração de resíduos.

O quartzo é um dos minerais mais abundantes da crosta terrestre, composto essencialmente por dióxido de silício (SiO_2). Em algumas classificações geológicas, ele também pode ser considerado uma rocha quando ocorre em massas compactas e homogêneas, como no caso do quartzito, que resulta da recristalização de arenitos ricos em quartzo submetidos ao metamorfismo (KLEIN e HURLBUT, 1999). Os quartzitos são formados por grãos finos de quartzo, fortemente unidos e compactados, apresentando fraturas e brilho característicos do mineral. Dentre suas principais qualidades destacam-se a alta resistência mecânica, propriedades antiderrapantes, boa resistência ao aquecimento solar e elevada resistência à ação de agentes químicos (PIRES, 2007).

Estudos indicam que o uso de rejeitos de quartzito em camadas de sub-base pode melhorar a plasticidade e a resistência do material, apresentando-se como uma alternativa viável aos agregados pétreos convencionais (FERNANDES, 2019). No entanto, por ser uma rocha silicosa e eletronegativa, o quartzito apresenta baixa adesividade ao ligante asfáltico, o que limita sua aplicação em misturas asfálticas sem tratamento. Para contornar essa limitação, é comum a adição de fíleres ativos, como pó de calcário, cimento Portland, cal ou aditivos específicos, que promovem melhor adesão entre agregado e ligante (BERNUCCI *et al.*, 2008; GENARO e NASCIMENTO, 2017).

Apesar de ser menos estudada do que o quartzito no contexto rodoviário, o esteatito (pedra-sabão) também desperta interesse como material alternativo, especialmente em camadas de menor solicitação mecânica. A pedra-sabão é uma rocha composta predominantemente por talco, com presença de clorita e serpentina, o que lhe confere textura macia e capacidade de ser facilmente trabalhada. Ela é valorizada por sua resistência térmica, mas possui baixa dureza e resistência mecânica, com limitações evidentes em relação à abrasão e compressão quando comparada a outras rochas mais resistentes. Ainda assim, resíduos de pedra-sabão provenientes da indústria de rochas ornamentais apresentam granulometria favorável e têm sido estudados para aplicação em misturas asfálticas usinadas a quente. Sá (2018) avaliou a viabilidade do uso de resíduos de serpentinito e rejeitos de minério em substituição parcial aos agregados naturais, demonstrando desempenho satisfatório das misturas quanto à estabilidade e fluência, o que reforça o potencial da pedra-sabão como material complementar na pavimentação viária. Assim, esses resíduos apresentam potencial de uso nas misturas granulares comparadas neste TCC.

2.4.2. ASFALTO FRESADO

Atualmente, a fresagem de pavimentos asfálticos é uma técnica amplamente utilizada no processo de restauração de pavimentos deteriorados. Essa prática é especialmente empregada para solucionar problemas urbanos comuns, como evitar o desnível entre calçadas e vias, melhorar a drenagem pluvial e reduzir a propagação de trincas no pavimento (BONFIM, 2010).

O *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), conhecido no Brasil como asfalto fresado, é o material gerado pela fresagem de pavimentos asfálticos. Esse processo mecânico consiste na remoção ou desbaste da camada superficial do pavimento a uma profundidade determinada, com o objetivo de viabilizar intervenções de manutenção (SANTOS e LEANDRO, 2017). A fresagem do pavimento pode ser feita a frio, sem pré-aquecimento, causando ruptura dos agregados e alteração da granulometria, ou a quente, com pré-aquecimento que facilita o corte e mantém a granulometria praticamente intacta, permitindo a mistura com material novo para reciclagem (BONFIM, 2010).

O RAP é composto pelos mesmos materiais que formam o revestimento asfáltico original, incluindo areia, brita e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Dessa forma, as propriedades do material fresado são influenciadas pelo tipo de asfalto e seus componentes iniciais. Além disso, as características físicas do RAP também variam conforme o método de fresagem utilizado no processo (SANTOS e LEANDRO, 2017).

De acordo com estudos mencionados por Taha *et al.*, (2002), a estabilização química do RAP com cimento Portland é tecnicamente viável para aplicação em bases e sub-bases, promovendo aumento significativo da resistência do material e possibilitando a redução da espessura das camadas estruturais. Além disso, Maia *et al.*, (2014) realizaram um estudo de caso que confirmou a eficiência da reciclagem do RAP com adição de cimento, resultando em material com resistência satisfatória e propriedades físicas adequadas conforme as normas vigentes. Embora o uso do RAP em camadas superiores, como revestimento asfáltico, represente uma aplicação mais nobre, sua adoção ainda é limitada no Brasil devido aos elevados custos associados às tecnologias e equipamentos necessários (SANTOS e LEANDRO, 2017). Neste estudo, o RAP é considerado como componente granular em misturas para base e sub-base.

Silveira *et al.*, (2016) apresentam uma discussão sobre diversos materiais alternativos, como resíduos de construção e demolição, resíduos de pedra e fosfogesso. Silva (2022a) conclui que o aproveitamento desses materiais apresenta viabilidade técnica positiva, tanto na aplicação quanto na execução, proporcionando pavimentos com desempenho satisfatório.

2.4.3. REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

A mineração corresponde ao processo de extração de recursos minerais de valor econômico presentes na crosta terrestre, visando ao atendimento das demandas da

sociedade. Esse processo envolve desafios em todas as suas etapas, sejam eles de natureza técnica, ambiental ou social, o que impulsiona a necessidade de desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias voltadas às práticas minerárias (BASTOS, 2013). Entre os principais resíduos sólidos gerados pelas atividades minerárias destacam-se o estéril, proveniente da etapa de extração, e os rejeitos, resultantes do tratamento ou beneficiamento. Os estéreis, em sua maioria, são destinados a depósitos ou pilhas, podendo também ser empregados na recuperação de voçorocas ou no preenchimento de cavas. Já os rejeitos são predominantemente dispostos em barragens, que podem ser construídas com solo natural ou com os próprios resíduos (IBRAM, 2016).

Em Minas Gerais, existem atualmente 249 barragens cadastradas, utilizadas pela indústria e pela mineração para o armazenamento de água vinculada ao processo produtivo, bem como de rejeitos ou outros resíduos (FEAM, 2024). Devido ao aumento contínuo da atividade minerária, a capacidade das barragens tem se expandido, o que intensifica a preocupação e o receio da população diante dos riscos associados. Esse cenário se deve às graves consequências humanas e ambientais provocadas por rompimentos de barragens (SANTOS, 2020).

Em Minas Gerais, vastas reservas de minério de ferro estão concentradas na região denominada Quadrilátero Ferrífero, que abrange aproximadamente 7.000 km². Nessa área, diversas empresas mineradoras exploram intensamente o recurso, resultando na geração de grandes volumes de resíduos, incluindo estéreis e rejeitos (PEREIRA, 2005). As etapas relacionadas aos processos de lavra e beneficiamento do minério de ferro produzem quantidades expressivas desses materiais, com uma razão média de 2/1 entre o volume de rejeito gerado e o produto final obtido (ABRÃO, 1987).

Os rejeitos de minério de ferro são materiais heterogêneos, com propriedades que variam conforme o tipo de minério, processo de beneficiamento e local de deposição, apresentando desde granulometrias finas e plásticas até granulometrias arenosas e pouco plásticas. Esses rejeitos possuem densidade elevada devido ao alto teor de ferro, além de alta permeabilidade e baixa compressibilidade nos casos granulados. Essas características distintas dos solos convencionais exigem estudos específicos para sua aplicação em infraestrutura rodoviária (BASTOS, 2013).

Conforme Silva (2022b), o rejeito de minério de ferro apresenta-se como um material granular, constituído principalmente por partículas arenosas de baixa plasticidade, baixa compressibilidade e alta permeabilidade. A autora destaca que, embora sua aplicação na construção civil seja restrita, sua utilização proporciona redução dos danos ambientais, diminuição da extração e do consumo de agregados convencionais, bem como da quantidade de rejeitos gerados. Além disso, Silva (2022b) ressalta que a utilização desse resíduo em rodovias pode contribuir para a redução do número de barragens necessárias.

Fernandes (2005) demonstrou a viabilidade técnica do uso de rejeitos de minério de ferro em misturas para pavimentos ferroviários, destacando sua boa capacidade de suporte, alta densidade e baixo índice de expansão, especialmente quando combinados com geossintéticos. Campanha (2011) analisou as características químicas e geotécnicas dos rejeitos, ressaltando seu potencial para aplicação em sub-base ou base de pavimentos, principalmente quando melhorados com cimento Portland, atendendo aos parâmetros normativos para pavimentos flexíveis. Diante dessas características, o rejeito de minério de ferro é incluído na análise comparativa das misturas avaliadas neste trabalho.

2.5. COMPARATIVO ENTRE OS MATERIAIS ESTUDADOS

A caracterização dos materiais empregados em pavimentação é fundamental para compreender seu comportamento físico-mecânico, sua durabilidade e sua compatibilidade com as diferentes camadas estruturais do pavimento. No caso de resíduos e materiais alternativos, essa análise assume papel ainda mais relevante, pois suas propriedades dependem fortemente da origem, do processo de beneficiamento e do histórico de uso. Estudos como os de Bernucci *et al.*, (2010), Santos e Leandro (2017), Russo (2011), Bonfim (2010) e Santos *et al.*, (2020) destacam que a correta compreensão dessas propriedades é essencial para garantir desempenho estrutural adequado e durabilidade ao pavimento.

O Quadro 1 sintetiza os principais parâmetros de granulometria, plasticidade, densidade e resistência, formando a base comparativa empregada na metodologia. Com isso, torna-se possível compreender como cada material responde às variáveis analisadas

nos ensaios subsequentes e de que forma essas características se alinham aos requisitos normativos e às interpretações presentes na literatura especializada.

Quadro 1 - Comparativo entre os materiais estudados.

Material	Granulometria	Plasticidade	Densidade	Abrasão/Resistência
RMF	Bem graduado; comportamento de areia siltosa	LL = NP; LP = NP; IP = NP	2,99 g/cm ³ (massa específica); γ_d = 21,10 kN/m ³	CBR = 15,9%
RQF	Granulometria irregular; presença de finos	LL = NP; LP = NP; IP = NP	2,75 g/cm ³ (massa específica); γ_d = 18,96 kN/m ³	Abrasão Los Angeles = 96% (muito alta) CBR = 42,8%
ESTEATITO	Má distribuição; alto teor de finos	Não plástico (rocha)	Densidade real = 2,716 g/cm ³	Não informado (resistência baixa na literatura)
RAP	Boa distribuição; atende faixas DNIT	Não plástico	Densidade seca das misturas: 2,03–2,17 g/cm ³	ISC = 32% a 97% Expansão 0,00% a 0,46%

Fonte: Elaborado pela autora.

O rejeito de minério de ferro (RMF) é descrito na literatura como um material de comportamento típico de solos arenoso-siltosos, com baixa plasticidade, elevada permeabilidade e boa capacidade de compactação. Bastos (2013) demonstrou que rejeitos lateríticos apresentam estrutura favorável à drenagem e ao ganho de resistência quando compactados adequadamente. Santos e Leandro (2017) reforçam que materiais com esse perfil granulométrico são tecnicamente indicados para reforço de subleito e, em condições específicas, para sub-bases. Pires (2007) e Bonfim (2010) também apontam que solos arenosos compactados apresentam bom desempenho em camadas inferiores de pavimentos, desde que respeitados os critérios normativos. Do ponto de vista ambiental, a Feam (2025) destaca que o reaproveitamento de rejeitos minerais reduz significativamente os impactos associados à disposição em barragens e pilhas, ampliando o interesse técnico pelo RMF.

O resíduo de quartzito foliado (RQF) apresenta elevada rigidez inicial e alta resistência ao suporte, características comuns a rochas metamórficas, conforme descrito

por Russo (2011) e ABIROCHAS (2018). Entretanto, Silva (2022a), com base em Bernucci *et al.*, (2010), alerta que partículas lamelares e alongadas tendem a apresentar baixo intertravamento, reduzindo a estabilidade mecânica das camadas granulares. Além disso, Bismak Queiroz e Melo (2011) demonstram que rochas com elevado índice de abrasão apresentam perda acelerada de resistência sob solicitações repetitivas. Santos *et al.*, (2020) também destacam que agregados com morfologia desfavorável e alto desgaste superficial possuem restrições de uso em bases. Assim, a literatura converge no sentido de que, apesar da boa capacidade de suporte inicial, o RQF apresenta limitações importantes quanto à durabilidade.

O resíduo de esteatito (pedra-sabão) possui natureza litológica macia, com composição predominantemente talcosa, o que lhe confere baixa dureza e reduzida resistência ao desgaste. Sá (2018) descreve que materiais derivados de rochas talcosas apresentam elevada geração de finos e menor estabilidade volumétrica. Silva (2022a) reforça que materiais com excesso de finos tendem a apresentar maior suscetibilidade à deformação e menor resistência a esforços repetitivos. Russo (2011) também aponta que rochas ornamentais de baixa dureza apresentam limitações estruturais quando aplicadas em camadas diretamente solicitadas pelo tráfego. Dessa forma, a literatura indica que o esteatito deve ser restrito a camadas de baixa solicitação estrutural ou utilizado como fração complementar em misturas.

O asfalto fresado (RAP), por sua vez, é amplamente estudado como material reciclado para pavimentação. Bernucci *et al.*, (2010), explicam que o RAP é composto por agregados revestidos por ligante asfáltico envelhecido, o que proporciona maior coesão interna às misturas. Santos e Leandro (2017) destacam que o reaproveitamento de materiais asfálticos reduz custos, diminui o consumo de agregados naturais e contribui para a sustentabilidade da infraestrutura viária. Tseng (2010) e Vaz (2023) demonstram que misturas com RAP apresentam bom desempenho mecânico quando corretamente dosadas. Silva (2022a) reforça que a presença de CAP residual favorece o ganho de resistência e a redução da umidade ótima de compactação, potencializando o desempenho em camadas granulares, conforme sintetizado no Quadro 2.

Quadro 2 - Peculiaridades e referências da literatura de cada material.

Material	Peculiaridades	Aplicações indicadas segundo normas e estudos	Referências
RMF	Solo arenoso-siltoso; baixa plasticidade; boa compactação.	Reforço de subleito; sub-base quando $\text{CBR} \geq 20\%$ (DNIT 139/2010) (DNIT, 2010a)	Viana (2021); Bastos (2013); Santos e Leandro (2017).
RQF	Partículas lamelares ($\text{IF} = 0,21$); abrasão elevada (96%).	Sub-base ou camadas inferiores; não recomendado para base (DNIT 031/2006), (DNIT,2006b)	Viana (2021); Silva (2022a).
ESTEATITO	Rocha macia; elevada presença de finos; menor resistência mecânica.	Camadas de baixa solicitação ou uso em pequenas proporções.	Oliveira (2022); Silva (2022a).
RAP	Presença de CAP residual ($\sim 4,17\%$); boa coesão; estabilidade granulométrica.	Sub-base; base apenas para RAP + quartzito (70/30) conforme DNIT 141/2010, (DNIT, 2010b).	Oliveira (2022); Silva (2022a); Santos e Leandro (2017).

Fonte: Elaborado pela autora.

De forma integrada, a literatura indica que os materiais alternativos apresentam aplicações diferenciadas dentro da estrutura do pavimento. O RMF possui vocação predominante para reforço de subleito e sub-bases; o RQF apresenta bom suporte inicial, porém limitações significativas de durabilidade; o esteatito possui uso restrito a camadas de baixa solicitação ou como material complementar; e o RAP destaca-se como o material de maior potencial técnico, podendo ser empregado tanto em sub-bases quanto em bases, desde que atendidos os critérios normativos. Esse embasamento teórico, sustentado por estudos nacionais e internacionais, fornece suporte para a comparação experimental desenvolvida nas etapas seguintes deste trabalho.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho, ilustrada na Figura 5, foi construída a partir da integração das abordagens adotadas nas pesquisas de Viana (2021), “Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro e de resíduo de quartzito foliado como matérias-primas para construção de infraestrutura rodoviária”, e de Oliveira (2022), “Aplicação de resíduos de asfalto fresado e de rochas ornamentais regionais para construção de infraestrutura rodoviária”, ambas desenvolvidas no Laboratório de Ferrovias e Asfaltos (LABFER) da Universidade Federal de Ouro Preto. Esses estudos investigaram diferentes resíduos aplicáveis às camadas de pavimentação, seguindo procedimentos laboratoriais compatíveis entre si e fundamentados nas mesmas normas do DNIT. Essa equivalência metodológica possibilita a comparação direta dos resultados apresentados.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1. INTEGRAÇÃO DOS ESTUDOS ANTERIORES

A partir da integração das abordagens adotadas por Viana (2021) e Oliveira (2022), os estudos analisaram de forma independente diferentes resíduos aplicáveis às camadas de pavimentação, porém com procedimentos de coleta, caracterização e ensaios compatíveis entre si. Essa compatibilidade metodológica permite que os dados obtidos sejam comparados neste trabalho, uma vez que seguem as mesmas normas técnicas,

utilizam equipamentos idênticos e adotam critérios semelhantes para interpretação de desempenho mecânico.

Assim, este TCC não reproduz os estudos anteriores, mas reorganiza seus resultados sob um mesmo padrão, permitindo avaliar o potencial técnico e a viabilidade de aplicação dos resíduos considerados: rejeito de minério de ferro, resíduo de quartzito foliado, resíduo de esteatito (pedra-sabão) e fresado de asfalto.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais empregados neste estudo, parcialmente demonstrados na Figura 6, foram coletados nas regiões de Ouro Preto e Mariana (MG). O rejeito de minério de ferro (RMF) foi obtido por Viana (2021) em uma barragem de rejeitos, a cerca de 5 m de profundidade, garantindo amostras representativas. O resíduo de quartzito foliado (RQF), também analisado por Viana (2021), foi coletado em pedreiras da região, onde ocorre a geração contínua de resíduos do beneficiamento da rocha.

Figura 6 - Amostra do RQF e do RMF.



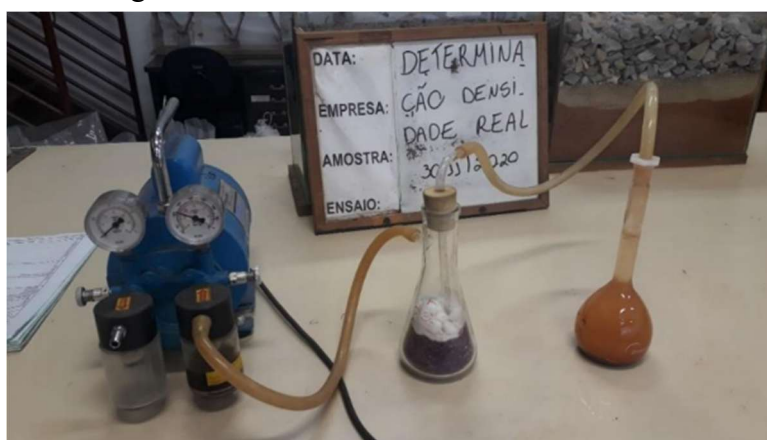
Fonte: Viana (2021).

No estudo de Oliveira (2022), três materiais adicionais foram caracterizados: o fresado de asfalto (FA), obtido durante serviços de fresagem na rodovia BR-356; o resíduo de quartzito gerado por beneficiamento; e o resíduo de esteatito proveniente de serrarias de rochas ornamentais. Todos os materiais foram identificados, secados quando necessário, armazenados e transportados de forma a preservar suas propriedades físicas para posterior caracterização.

3.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A caracterização dos materiais seguiu as normas brasileiras aplicáveis aos ensaios de solos e agregados utilizados em pavimentação. Para o RMF, Viana (2021) executou os ensaios de densidade real dos sólidos (DNER, 1994), análise granulométrica por peneiramento e sedimentação (DNER, 1994), limites de liquidez e plasticidade (DNER, 1994), compactação Proctor normal (DNIT, 2013), índice de suporte Califórnia (CBR) (DNIT, 2016), Mini-MCV e perda de massa por imersão (DNER, 1994), além do equivalente de areia (DNER, 1997), como ilustrado nas Figuras 7 a 13.

Figura 7 - Ensaio de densidade real do RMF.



Fonte: Viana (2021).

Figura 8 - Ensaio de limite de liquidez e plasticidade.



Fonte: Viana (2021)

Figura 9 - Ensaio de granulometria completa: peneiramento e sedimentação



Fonte: Viana (2021)

Figura 10 - Compactação do RMF - Proctor normal.



Fonte: Viana (2021).

Figura 11 - Índice de Suporte Califórnia (Imersão).



Fonte: Viana (2021).

Figura 12 - Mini-MCV RMF.



Fonte: Viana (2021)

Figura 13 - Equivalente de areia do RMF.



Fonte: Viana (2021)

O RQF caracterizado por Viana (2021) foi submetido aos ensaios de granulometria (DNER, 1994), densidade aparente e absorção (DNER, 1998), abrasão Los Angeles (DNER, 1998), índice de forma (DNIT, 2020) e CBR (DNIT, 2016), sendo parte desses procedimentos ilustrados nas Figuras 14 a 16.

Figura 14 - Análise granulométrica do RQF.



Fonte: Viana (2021)

Figura 15 - Índice de forma do RQF.



Fonte: Viana (2021).

Figura 16 - Amostra do RQF depois do ensaio de abrasão.



Fonte: Viana (2021).

Já os materiais estudados por Oliveira (2022) foram avaliados quanto à granulometria (DNIT ME 083/98), massa específica (NBR NM 52/2002), teor de ligante residual do fresado (DNIT ME 053/94), abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98) e forma de partícula (DNIT 424/2020). As misturas produzidas foram submetidas aos

ensaios de compactação (DNIT ME 164/2013), CBR (ABNT NBR 9895/2016) e nova verificação granulométrica, sendo parte desses procedimentos ilustrados nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Cápsulas para determinação de Umidade Ótima.



Fonte: Oliveira (2022).

Figura 18 - Frações de granulometria de asfalto fresado e esteatito.



Fonte: Oliveira (2022).

Essa etapa permitiu estabelecer os parâmetros fundamentais de granulometria, densidade, plasticidade, teor de finos, durabilidade e resistência mecânica necessários para a comparação entre os resíduos e suas combinações.

3.4. MISTURAS EXPERIMENTAIS

As misturas analisadas neste trabalho correspondem diretamente às composições definidas por Viana (2021) e Oliveira (2022). No estudo de Viana, foram elaboradas cinco misturas entre RMF e RQF, variando as proporções para avaliar o efeito da granulometria e da composição mineralógica, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Proporções das misturas dos ensaios realizados por Viana (2021)

RMF	RQF
50%	50%
40%	60%
30%	70%
20%	80%
70%	30%

Fonte: Viana (2021).

As misturas foram produzidas em betoneira, conforme descrito por Viana (2021), assegurando homogeneidade. Já no estudo de Oliveira (202), foram preparadas seis composições envolvendo fresado de asfalto, resíduo de quartzito e resíduo de esteatito, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Proporções das misturas dos ensaios realizados por Oliveira (2022).

Mistura	Percentual de Fresado	Percentual de Rocha
Fresado de asfalto com quartzito	50%	50%
	70%	30%
	90%	10%
Fresado de asfalto com esteatito	70%	30%
	80%	20%
	90%	10%

Fonte: Oliveira (2022).

A justificativa dessas misturas reside na avaliação do comportamento granular, da influência do teor de CAP residual presente no fresado e do impacto da variabilidade mineralógica nas propriedades mecânicas. Dessa forma, foi possível observar padrões de comportamento entre misturas predominantemente granulares, misturas com resíduo de rocha macia (esteatito) e misturas com presença de aglomerante asfáltico.

3.5. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE COMPARATIVA

A análise dos resultados obtidos nos estudos anteriores foi conduzida mediante um processo comparativo estruturado em três etapas principais. Primeiro, cada material e suas misturas foram avaliados quanto ao atendimento aos limites normativos estabelecidos pelas normas DNIT 139/2010 (DNIT, 2010b), DNIT 141/2010 (DNIT, 2010c) e DNIT 031/2006 (DNIT, 2006a), considerando parâmetros como granulometria, CBR, expansão, abrasão, teor de finos e forma das partículas.

Em seguida, os materiais foram comparados entre si, observando o comportamento individual e em mistura. Essa comparação levou em conta a capacidade de suporte, a influência do CAP residual nas misturas com fresado, a susceptibilidade à umidade, a durabilidade e o efeito das características mineralógicas (como lamelaridade do quartzito e baixa dureza do esteatito).

Por fim, os resultados foram integrados em uma síntese comparativa, permitindo estabelecer relações entre o desempenho observado e as propriedades físicas de cada resíduo, além de auxiliar na definição de suas aplicações mais adequadas em pavimentação. Essa etapa fornece o suporte metodológico necessário para a interpretação dos resultados posteriores deste TCC.

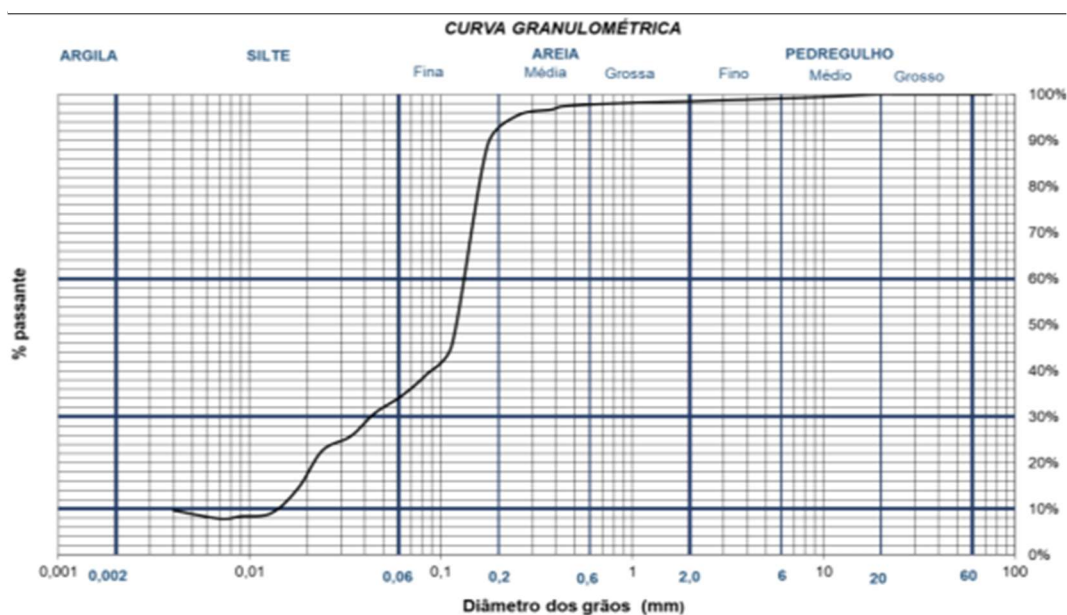
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir de ensaios laboratoriais realizados nas pesquisas de Iniciação Científica de Viana (2021) e Oliveira (2022). As análises englobam a caracterização física e mecânica dos materiais estudados, com o objetivo de comparar o desempenho quanto à resistência, compactação e adequação para utilização em camadas de pavimentos rodoviários

4.1. GRANULOMETRIA E LIMITES DE ATTERBERG

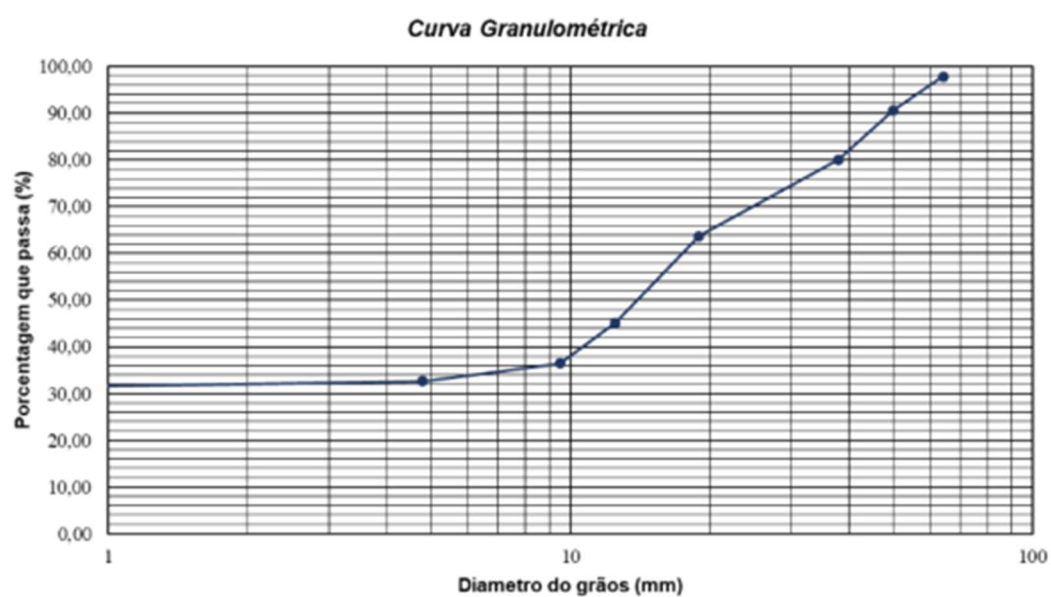
As curvas granulométricas obtidas para o RMF e o RQF são apresentadas nas Figuras 19 e 20 enquanto as curvas dos materiais estudados por Oliveira (2022) aparecem nas Figuras 21, 22 e 23.

Figura 19 - Curva granulométrica do RMF.



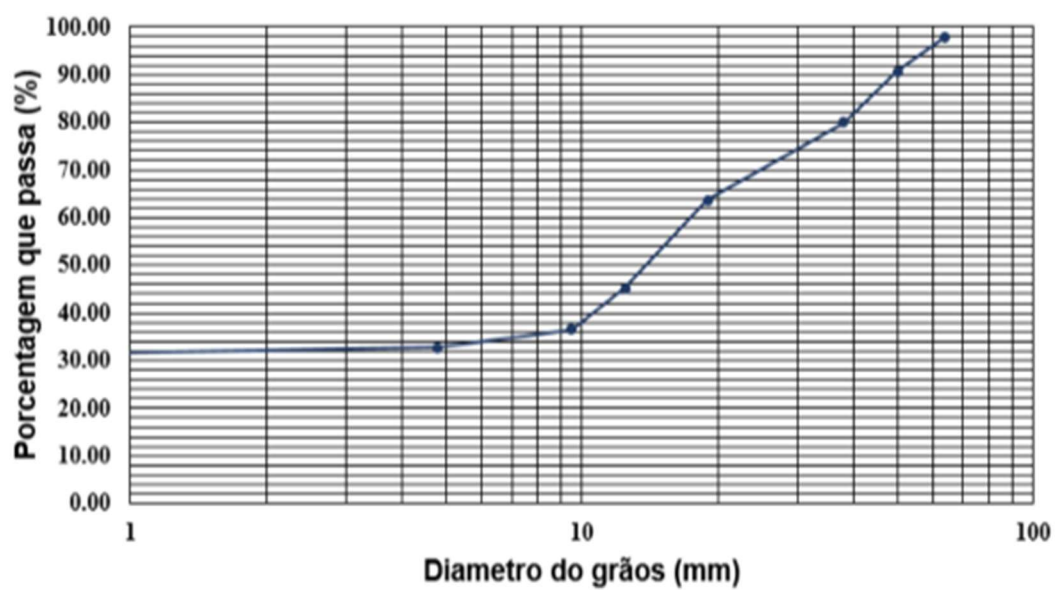
Fonte: Viana (2021).

Figura 20 - Curva granulométrica do RQF.



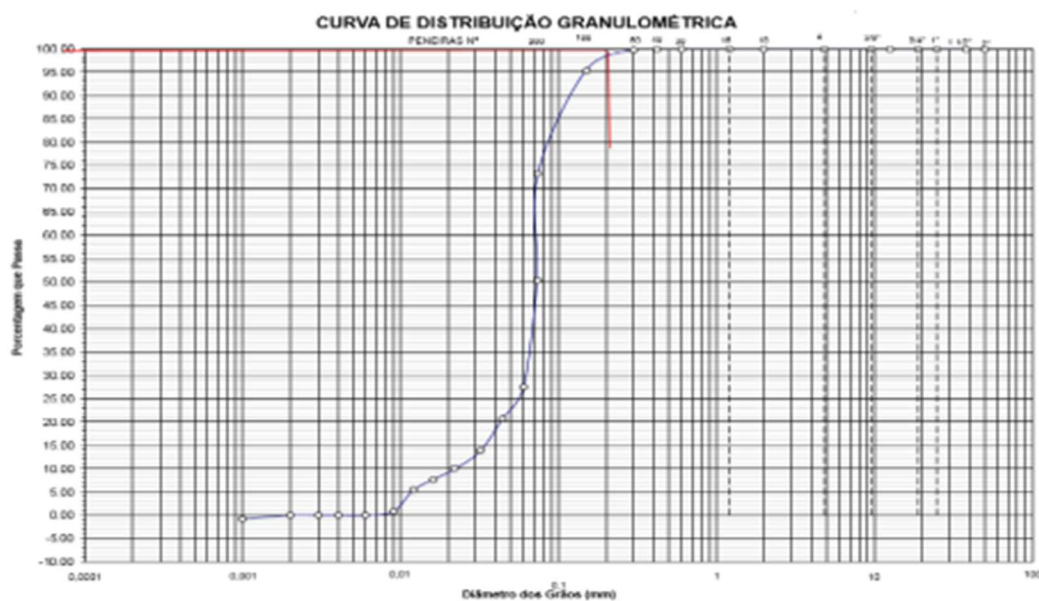
Fonte: Viana (2021)

Figura 21 - Curva granulométrica do esteatito.



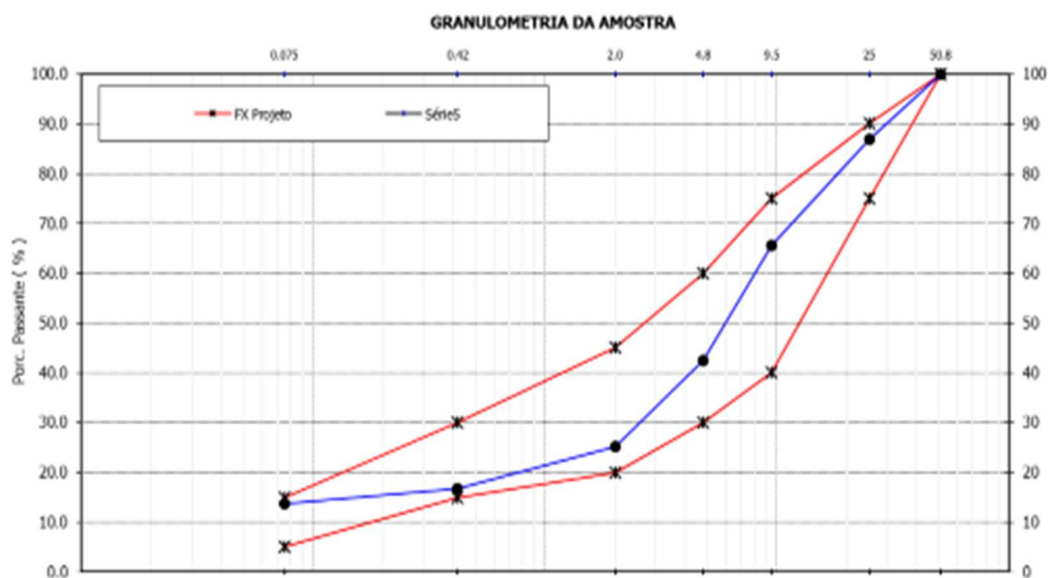
Fonte: Oliveira (2022).

Figura 22 - Curva granulométrica do esteatito.



Fonte: Oliveira (2022).

Figura 23 - Curva granulométrica do asfalto fresado.



Fonte: Oliveira (2022).

O rejeito de minério de ferro (RMF) apresentou distribuição de partículas com transição contínua entre as frações granulométricas, característica típica de um material bem graduado. Esse comportamento reforça a classificação siltosa observada nos Limites

de Atterberg, conforme apresentado na Tabela 3, indicando a presença de fração fina em proporção suficiente para conferir alguma coesão ao material, sem acarretar elevação expressiva da plasticidade. Tal resposta é compatível com o comportamento descrito por Santos e Leandro (2017) para solos arenoso-siltosos empregados em reforço de subleito, nos quais a fração fina contribui para a estabilidade da matriz granular sem comprometer o desempenho mecânico.

Tabela 3 - Limites de Atterberg do RMF.

Limites de Atterberg	Resultado
Limite de Liquidez (LL)	NP
Limite de Plasticidade (LP)	NP
Índice de Plasticidade (LP)	NP
Classificação TRB	A-4
Limite de Liquidez (LL)	NP

Fonte: Viana (2021).

No caso do resíduo de quartzito foliado (RQF), a impossibilidade de determinação dos diâmetros característicos D10, D30 e D60 resultou na ausência dos coeficientes de uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc), evidenciando uma distribuição granulométrica irregular. Esse comportamento está diretamente associado à predominância de partículas lamelares, típica de resíduos provenientes do beneficiamento do quartzito foliado, o que tende a prejudicar o empacotamento dos grãos e a eficiência da transmissão de esforços entre as partículas. Essa característica reflete-se nos resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles, nos quais o RQF apresentou elevado desgaste, indicando limitações quanto à durabilidade do material quando submetido a solicitações mecânicas mais intensas. Resultados semelhantes são relatados por Silva (2022a), que aponta a forma lamelar como um fator determinante para o desempenho mecânico inferior e para a maior susceptibilidade à degradação desse tipo de resíduo.

Para as misturas avaliadas por Oliveira (2022), observou-se que aquelas constituídas por fresado de asfalto (RAP) e quartzito apresentaram faixas granulométricas compatíveis com as especificações estabelecidas pelo DNIT (2006b), evidenciando melhor distribuição das frações e maior proximidade das curvas granulométricas às faixas recomendadas para tráfego mais elevado. Em contrapartida, as misturas contendo esteatito apresentaram maior concentração de material fino, o que influenciou diretamente o enquadramento granulométrico. Conforme apresentado na Tabela 4, a variação das proporções dos materiais resultou em diferentes classificações quanto ao tráfego de projeto, sendo observada predominância de faixas indicadas para alto tráfego nas misturas com maior teor de RAP.

Tabela 4 - Enquadramento granulométrico das misturas segundo o DNIT (2006a).

Mistura	Faixa	Referência
Fresado e Quartzito		
50% - 50%	Tipo D	Baixo tráfego
70% - 30%	Tipo C	Alto tráfego
90% - 10%	Tipo A	Alto tráfego
Fresado e Esteatito		
70% - 30%	Tipo A	Alto tráfego
80% - 20%	Tipo A	Alto tráfego
90% - 10%	Tipo A	Alto tráfego

Fonte: Oliveira (2022).

A Tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de teor de betume, com valores médios próximos a 4%, característicos de misturas contendo RAP e indicativos da presença de ligante asfáltico remanescente. Esse fator contribui para o aumento da coesão interna das misturas, influenciando positivamente o desempenho mecânico. Entretanto, a associação entre ligante residual e excesso de finos demanda atenção, uma vez que, conforme discutido por Silva (2022a) e Santos e Leandro (2017), teores elevados de material fino podem aumentar a suscetibilidade à deformação permanente, especialmente

quando essas misturas são empregadas em camadas estruturais superiores, reforçando a importância do controle granulométrico e da dosagem adequada dos materiais.

Tabela 5 - Resultado do ensaio de teor de betume.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa da amostra (g)	1482,89	1449,77	1492,32
Massa do betume extraído (g)	64	58,29	63,88
Betume (%)	4,31	3,91	4,28

Fonte: Oliveira (2022).

4.2. MASSA ESPECÍFICA, EQUIVALENTE DE AREIA E ABSORÇÃO

A Tabela 6 apresenta os resultados de massa específica, equivalente de areia e absorção das amostras de rejeito de minério de ferro (RMF) e resíduo de quartzito foliado (RQF), permitindo uma avaliação comparativa do comportamento físico desses materiais.

Tabela 6 - Massa específica, equivalente de areia e absorção das amostras.

Amostra	Massa Específica (g/cm³)		Equivalente de areia (%)		Absorção (%)
	Resultado	Pesquisas Anteriores	Resultado	Mínimo Normativo	Resultado
RMF	2,99	3,55 (Bastos, 2013)	36,07	30	-
RQF	2,75	2,62 (Melo, 2016)	52,00	30	0,75

Fonte: Viana (2021).

O RMF apresentou massa específica de 2,99 g/cm³, valor inferior ao reportado por Bastos (2013), diferença que pode ser associada à variabilidade mineralógica característica de rejeitos de minério de ferro, bem como às condições de formação e beneficiamento do material. Ainda assim, o valor obtido permanece compatível com materiais empregados em camadas inferiores de pavimentos rodoviários, conforme discutido por Viana (2021).

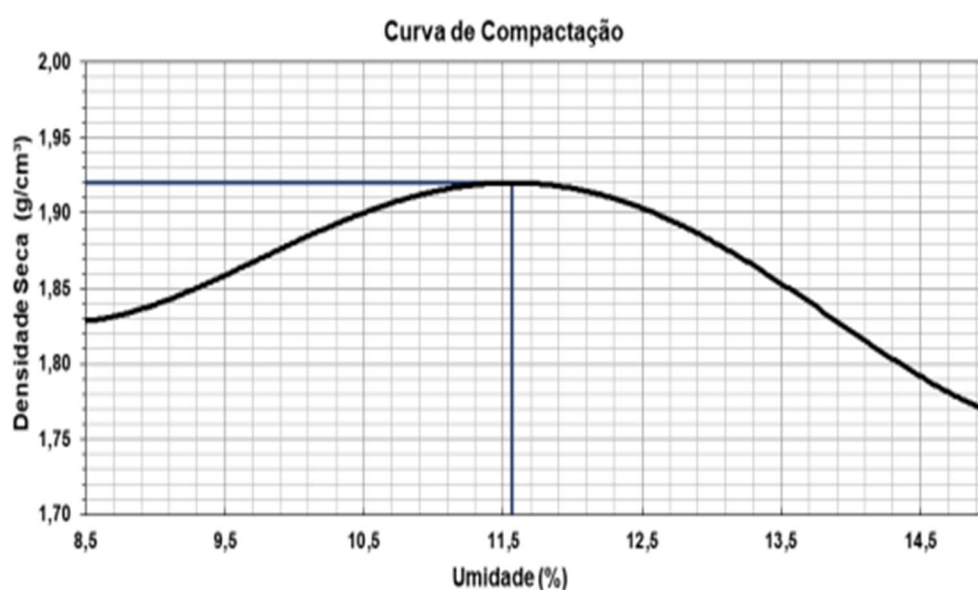
O equivalente de areia do RMF foi de 36,07%, superando o valor mínimo normativo de 30%, o que indica presença controlada de finos predominantemente não plásticos. Esse resultado é coerente com a classificação siltosa previamente identificada e sugere comportamento adequado quanto à sensibilidade à umidade, aspecto relevante para aplicações em reforço de subleito e sub-base, conforme observado por Santos e Leandro (2017) em materiais com características semelhantes.

Para o RQF, a massa específica obtida foi de 2,75 g/cm³, valor próximo ao relatado por Melo (2016), refletindo a composição mineralógica típica de rochas quartzíticas. O equivalente de areia apresentou valor elevado (52,0%), indicando reduzida presença de finos argilosos. Entretanto, a absorção medida, de 0,75%, revela maior porosidade do material, característica associada à estrutura foliada do quartzito. Essa condição influencia diretamente o comportamento mecânico do RQF, contribuindo para maior susceptibilidade ao desgaste e à degradação, conforme evidenciado nos ensaios de Abrasão Los Angeles e discutido por Silva (2022a).

4.3. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR NORMAL)

A curva de compactação do RMF está representada na Figura 24, indicando densidade máxima seca de 1,92 kg/dm³ e umidade ótima de 11,56%.

Figura 24 - Curva de compactação do RMF.



Fonte: Viana (2021).

Esses valores evidenciam um comportamento compatível com materiais arenoso-siltosos, caracterizados por umidade ótima moderada e densidade adequada após compactação. Tal resposta é semelhante àquela descrita por Pinto (2006) para areias siltosas, reforçando a aptidão do RMF para aplicação em camadas de reforço de subleito e sub-base compactada.

No caso das misturas avaliadas por Oliveira (2022), observou-se uma tendência consistente nos parâmetros de compactação: o aumento do teor de fresado de asfalto (RAP) resultou em redução da umidade ótima e aumento da densidade aparente seca. Esse comportamento está associado à presença de ligante asfáltico residual no RAP, que contribui para o aumento da coesão entre as partículas e reduz a necessidade de água para atingir a densidade máxima, conforme discutido por Silva (2022a). Os valores obtidos para cada mistura encontram-se apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de compactação e CBR das misturas.

Mistura	Densidade Aparente Seca (g/cm³)	ISC (%)	Umidade Ótima (%)	Expansão (%)
Fresado e Quartzito				
50% - 50%	2,072	61,0	9,4	0,09
70% - 30%	2,169	97,0	6,6	0,46
90% - 10%	2,081	33,2	7,8	0,01
Fresado e Esteatito				
70% - 30%	2,038	65,0	13,1	0,00
80% - 20%	2,035	32,2	7,5	0,00
90% - 10%	2,007	44,0	4,5	0,00

Fonte: Oliveira (2022).

A classificação MCT do rejeito de minério de ferro (RMF), apresentada na Tabela 8, reforça o comportamento típico de solos arenosos com fração fina siltosa. Essa classificação é coerente com os resultados de compactação obtidos, que indicaram umidade ótima moderada e densidade seca compatível com materiais granulares pouco

plásticos. A associação entre a classificação MCT e os parâmetros de compactação sugere um comportamento estável sob condições de compactação controlada, o que favorece a aplicação do RMF em camadas de reforço de subleito e sub-base, conforme observado em materiais com características semelhantes discutidos por Santos e Leandro (2017) e Viana (2021).

Tabela 8 - Classificação MCT do RMF.

Material	c'	d'	Pi	e'	Classe (MCT)
RMF	0,39	80,77	233,00	1,37	LA

Fonte: Viana (2021).

4.4. ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC/CBR)

Os valores de CBR das amostras de RMF e RQF estão compilados na Tabela 9, enquanto os valores das misturas RMF + RQF encontram-se na Tabela 10.

Tabela 9 - Índice suporte Califórnia (CBR) do RMF e RQF.

Amostra	CBR (%)	γ_d (kN/m ³)	H.ot (%)
RMF	15,90	21,10	11,40
RQF	42,8	18,96	10,60

Fonte: Viana (2021).

Tabela 10 - Índice de Suporte Califórnia (CBR) das misturas de RMF e RQF.

Amostra	RMF (%)	RQF (%)	CBR (%)	γ_d (kN/m ³)	H.ot (%)
1	50	50	23,40	21,50	13,60
2	40	60	12,50	18,88	12,30
3	30	70	22,00	21,10	10,80
4	20	80	8,30	19,26	17,20
5	70	30	37,10	20,28	9,70

Fonte: Viana (2021).

Os valores de Índice de Suporte Califórnia (CBR) das amostras de rejeito de minério de ferro (RMF) e resíduo de quartzito foliado (RQF), apresentados na Tabela 9, evidenciam comportamentos distintos entre os materiais. O RMF apresentou CBR de 15,9%, valor compatível com aplicações em reforço de subleito, enquanto o RQF atingiu 42,8%, atendendo ao requisito mínimo de 20% estabelecido pela norma DNIT 139/2010 (DNIT, 2010b) para utilização em sub-base. Essa diferença está associada às características granulométricas e ao maior teor de fração arenosa do RQF, que favorece a mobilização de resistência sob carregamento.

A análise das misturas RMF + RQF, apresentada na Tabela 10, evidencia que a proporção entre os materiais exerce influência direta sobre o desempenho mecânico. As misturas com maior teor de RMF, em especial a composição 70% RMF + 30% RQF, apresentaram os maiores valores de CBR (37,1%), indicando melhora significativa da capacidade de suporte em relação aos materiais isolados. Esse comportamento sugere que a fração arenosa do RMF, quando adequadamente compactada, contribui para a formação de uma estrutura granular mais estável, enquanto o aumento excessivo da fração lamelar do RQF tende a reduzir o desempenho mecânico, como observado nas misturas com maiores teores desse material.

Para as misturas analisadas por Oliveira (2022), os resultados indicaram desempenho superior àquele observado nas composições RMF + RQF, especialmente nas misturas com predominância de fresado de asfalto (RAP). A mistura composta por 70% RAP e 30% quartzito atingiu Índice de Suporte Califórnia (ISC) de 97%, enquadrando-se nos requisitos da norma DNIT 141/2010 (DNIT, 2010c) para aplicação em base de pavimentos submetidos a tráfego elevado. As demais misturas avaliadas atenderam aos critérios estabelecidos para sub-base, apresentando valores intermediários de capacidade de suporte.

O melhor desempenho das misturas com maior teor de RAP está associado à presença de ligante asfáltico residual, que favorece a interligação entre as partículas e melhora a distribuição de tensões no interior da matriz granular. Esse efeito é discutido por Silva (2022a), que destaca a contribuição do ligante remanescente para o aumento da resistência e da coesão das misturas recicladas. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam o

potencial técnico do uso do RAP em combinação com agregados naturais ou resíduos minerais, desde que atendidos os critérios normativos e de dosagem adequados.

4.5. ABRASÃO LOS ANGELES E FORMA DAS PARTÍCULAS

Os resultados do índice de forma das partículas do resíduo de quartzito foliado (RQF), apresentados na Tabela 11, indicaram valor de 0,21, característico de partículas alongadas e lamelares. Essa morfologia interfere diretamente no empacotamento e no intertravamento entre os grãos, reduzindo a eficiência da transferência de esforços e comprometendo a estabilidade da estrutura granular. Como consequência, materiais com esse tipo de conformação tendem a apresentar desempenho mecânico inferior quando submetidos a solicitações repetidas.

Tabela 11 - Índice de forma das partículas do RQF.

Amostra	Tamanho diretriz da fração (mm)	Amostra retida no crivo 1 (%)	Amostra retida no crivo 2 (%)	Índice de forma
RQF	<div style="text-align: center;"> <div>12,7</div> <hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/> <div>9,5</div> </div>	35,59	93,74	0,21

Fonte: Viana (2021).

Tabela 12 - Abrasão Los Angeles do RQF.

Amostra	% de perda
RQF	96

Fonte: Viana (2021).

O ensaio de Abrasão Los Angeles, apresentado na Tabela 12, corroborou esse comportamento, uma vez que o RQF apresentou perda de massa de 96%, valor significativamente superior ao limite máximo de 55% estabelecido pela norma DNIT 031/2010 para utilização em camadas de base. Esse resultado evidencia a elevada susceptibilidade do material ao desgaste e à degradação, confirmando as limitações do RQF para aplicações em camadas estruturais superiores de pavimentos. Esse desempenho

é coerente com as observações de Santos e Leandro (2017), que destacam que partículas de forma lamelar estão associadas à menor estabilidade estrutural e à maior propensão à fragmentação, reforçando a necessidade de restrição de seu uso a camadas de menor solicitação ou em misturas devidamente controladas.

Para os materiais de Oliveira (2022), os ensaios de abrasão e massa específica das rochas ornamentais estão sumarizados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios com quartzito e esteatito

Material	Abrasão Los Angeles	Densidade Aparente (g/cm³)	Densidade Real (g/cm³)	Absorção (%)	Índice de Forma (f)
Quartzito	Desgaste de 96%	2.692	2.747	74,5	0,21
Esteatito	-	-	2.716	-	-

Fonte: Oliveira (2022).

O quartzito apresentou elevado desgaste no ensaio de Abrasão Los Angeles (96%), associado ao índice de forma reduzido (0,21), indicando predominância de partículas alongadas e lamelares. Essa combinação compromete o intertravamento entre os grãos e explica a baixa resistência ao desgaste observada, resultado coerente com o comportamento já discutido para resíduos de quartzitos por Santos e Leandro (2017) e Silva (2022a).

Além disso, o quartzito apresentou absorção elevada (74,5%), o que indica maior porosidade e maior tendência à absorção de água, característica que pode influenciar negativamente sua durabilidade e estabilidade volumétrica quando empregado isoladamente em camadas estruturais superiores. Esses aspectos reforçam a necessidade de controle rigoroso de sua aplicação, seja por meio de restrição a camadas de menor solicitação, seja pela utilização em misturas que possibilitem melhor empacotamento e distribuição de tensões, conforme observado também por Oliveira (2022).

O esteatito, por sua vez, apresentou densidade real semelhante à do quartzito, porém não foi submetido ao ensaio de Abrasão Los Angeles nem ao ensaio de índice de

forma. Ainda assim, conforme discutido por Oliveira (2022), esse material apresenta limitações associadas ao elevado teor de finos e à menor resistência mecânica, o que restringe sua aplicação em camadas estruturais superiores. Esse comportamento é compatível com observações relatadas por Silva (2022a), que destaca que materiais com fração fina excessiva tendem a apresentar desempenho inferior sob carregamentos mais elevados, sendo mais indicados para aplicações em sub-base ou camadas de menor exigência estrutural.

4.6. SÍNTESE COMPARATIVA DOS MATERIAIS

Ao integrar os resultados obtidos com os critérios estabelecidos pelo DNIT, torna-se possível definir de forma objetiva a aplicabilidade técnica de cada material e mistura analisados, conforme sistematizado no Quadro 3. As misturas com maior proporção de asfalto fresado (RAP) apresentaram os desempenhos mecânicos mais elevados, especialmente no que se refere aos valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC), atendendo aos limites estabelecidos pela DNIT 141/2010 (DNIT, 2010c) para utilização em camadas de base de pavimentos submetidos a tráfego elevado, que exigem ISC mínimo de 80% e expansão inferior ou igual a 0,5%. Nesse contexto, a mistura composta por 70% de RAP e 30% de quartzito destacou-se em relação às demais, resultado coerente com a presença de ligante asfáltico residual, evidenciada também pelos resultados do ensaio de teor de betume apresentados. As vantagens e limitações associadas a cada material e mistura encontram-se sintetizadas no Quadro 3, que consolida a análise comparativa dos materiais alternativos avaliados.

As misturas constituídas por rejeito de minério de ferro (RMF) e resíduo de quartzito foliado (RQF) apresentaram valores de ISC superiores a 20%, enquadrando-se nos requisitos definidos pela DNIT 139/2010 (DNIT, 2010b) para aplicação em camadas de sub-base. Essa indicação é reforçada pelo comportamento observado nos ensaios de compactação, os quais se mostraram compatíveis com a classificação MCT do RMF apresentada na Tabela 6, que caracteriza o material como solo arenoso-siltoso com desempenho satisfatório sob compactação controlada. O RMF utilizado de forma isolada, por sua vez, apresentou capacidade de suporte inferior ao limite exigido para sub-base,

permanecendo mais adequado para funções de reforço de subleito, conforme previsto na DNIT 138/2010 (DNIT, 2010a).

Quadro 3 - Análise comparativa dos materiais alternativos.

Material/Mistura	Aplicação Indicada	Vantagens Principais	Limitações Observadas
Fresado + Quartzito (Oliveira, 2022)	Base de pavimento de alto tráfego	Alta resistência e estabilidade; boa compactação; aproveitamento de ligante residual	Necessidade de controle granulométrico do quartzito devido à abrasão elevada
Fresado + Esteatito (Oliveira, 2022)	Sub-base e vias de tráfego moderado	Boa trabalhabilidade e densidade; material reciclado	Desempenho mecânico variável; requer caracterização completa
RMF + RQF (Viana, 2021)	Sub-base e reforço de subleito	Melhora o CBR em relação ao RMF isolado; boa compactação	Menor durabilidade; dependência da proporção ideal
RQF isolado (Viana, 2021)	Uso limitado (camadas inferiores)	Alta resistência inicial	Alta abrasão e baixa durabilidade
RMF isolado (Viana, 2021)	Reforço de subleito	Fácil compactação e disponibilidade	Baixa resistência mecânica

Fonte: Elaborado pela autora.

O resíduo de quartzito foliado (RQF), quando analisado de forma isolada, apresentou capacidade de suporte inicial satisfatória; entretanto, o elevado desgaste observado no ensaio de Abrasão Los Angeles, com valor de 96%, ultrapassa de forma significativa o limite máximo de 55% estabelecido pela DNIT 031/2010, comprometendo sua durabilidade. Associado a esse resultado, o índice de forma reduzido evidencia a presença predominante de partículas alongadas e lamelares, condição que prejudica o intertravamento entre os grãos e limita a estabilidade da estrutura granular. Dessa forma, o uso do RQF isolado mostra-se inadequado para camadas estruturais superiores, sendo mais indicado para camadas inferiores ou para emprego em proporções controladas no contexto de misturas.

O esteatito apresentou comportamento semelhante no que se refere às limitações estruturais, com restrições associadas ao elevado teor de finos e à menor resistência

mecânica. Essas características reduzem sua capacidade de suporte sob solicitações mais intensas, tornando seu uso mais adequado a funções de menor exigência estrutural. Ainda assim, conforme observado nas formulações analisadas por Oliveira (2022), o esteatito pode ser incorporado a misturas desde que haja adequado controle granulométrico e associação com materiais de maior resistência, de modo a minimizar seus efeitos negativos no desempenho mecânico.

A partir da análise integrada dos resultados obtidos e do enquadramento normativo correspondente à Tabela 14, é possível estabelecer recomendações consistentes de aplicação técnica. As misturas com maior proporção de asfalto fresado (RAP) são indicadas para camadas de base, desde que atendidos os critérios de ISC e expansão exigidos pela DNIT 141/2010. As misturas constituídas por RMF e RQF apresentam desempenho compatível com aplicações em sub-bases. O RMF utilizado de forma isolada ajusta-se ao reforço de subleito. Já o RQF isolado e o esteatito devem ser destinados a camadas inferiores ou empregados em quantidades reduzidas em misturas, respeitando suas limitações de durabilidade e resistência mecânica.

Tabela 14 - Comparação dos parâmetros físicos e mecânico das misturas analisadas nos estudos de Viana (2021) e Oliveira (2022).

Estudo/Mistura	Densidade (g/cm³)	ISC (%)	Umidade Ótima (%)	Expansão (%)	Aplicação indicada
Viana (2021) – RMF + RQF (50/50)	21,5	23,4	13,6	-	Sub-base
Oliveira (2022) – Fresado + Quartzito (70/30)	2,17	97,0	6,6	0,46	Base
Oliveira (2022) – Fresado + Esteatito (80/20)	2,03	32,2	7,5	0,00	Sub-base
Viana (2021) – RMF + RQF (70/30)	20,3	37,1	9,7	-	Sub-base

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados apresentados mostram coerência com a literatura técnica considerada neste estudo. O comportamento do rejeito de minério de ferro (RMF), caracterizado por baixa plasticidade, adequada resposta à compactação e aplicação compatível com camadas inferiores, está em consonância com as observações de Santos e Leandro (2017) para materiais granulares arenoso-siltosos empregados em reforço de subleito e sub-base. O resíduo de quartzito foliado (RQF), embora apresente capacidade de suporte inicial satisfatória, teve sua durabilidade limitada pela forma lamelar das partículas e pelo elevado desgaste, comportamento que também é discutido por Santos e Leandro (2017). O esteatito evidenciou restrições associadas ao teor elevado de finos e à menor resistência mecânica, o que compromete seu desempenho em camadas estruturais superiores. Por sua vez, o fresado de asfalto (RAP) destacou-se nas diferentes combinações analisadas, especialmente quando associado ao quartzito, apresentando elevados valores de capacidade de suporte e enquadramento normativo compatível com aplicações em base e sub-base, conforme os critérios estabelecidos pelo DNIT e os resultados reportados por Silva (2022a) e Santos e Leandro (2017).

5. CONCLUSÃO

A comparação entre os estudos de Viana (2021) e Oliveira (2022) permitiu compreender de forma mais ampla o comportamento técnico e o potencial de aplicação dos materiais alternativos analisados nas camadas de pavimentos rodoviários. As misturas que incorporam asfalto fresado apresentaram desempenho destacado, sobretudo pela elevada resistência, estabilidade e densidade seca aparente, enquadrando-se nos critérios do DNIT para uso em bases de pavimentos de alto tráfego. Esse comportamento está diretamente associado à presença de ligante residual no fresado, que contribui para maior coesão entre as partículas e para uma compactação mais eficiente, favorecendo a durabilidade estrutural.

As combinações formadas por rejeito de minério de ferro (RMF) e resíduo de quartzito foliado (RQF) demonstraram potencial para aplicação em sub-bases e reforço de subleito, sobretudo em vias de menor solicitação estrutural. Os resultados confirmam que o RMF apresenta propriedades típicas de solos arenosos não plásticos, enquanto o RQF, apesar da boa capacidade inicial de suporte, apresenta limitações de durabilidade associadas ao desgaste elevado e ao índice de forma reduzido, o que restringe sua aplicação isolada em camadas superiores. Ainda assim, a utilização conjunta desses materiais amplia sua viabilidade, contribuindo para o aproveitamento de resíduos minerais que, de outra forma, poderiam ser descartados inadequadamente.

O esteatito, conforme observado por Oliveira (2022), possui características que limitam seu uso em camadas estruturalmente exigidas, mas pode desempenhar papel complementar em misturas, especialmente em ajustes granulométricos. Já o asfalto fresado destacou-se como o material mais vantajoso sob os pontos de vista técnico e ambiental, uma vez que possibilita o reaproveitamento de pavimentos existentes e reduz a demanda por agregados naturais e por ligantes novos, além de apresentar desempenho superior nas misturas avaliadas.

De modo geral, a análise integrada dos materiais demonstrou um panorama consistente entre os dados experimentais, os critérios normativos do DNIT e o que é indicado pela literatura especializada. As diferenças de comportamento observadas entre os resíduos permitiram compreender suas potencialidades e limitações para aplicação em

sub-bases, bases ou reforço de subleito, contribuindo para identificar alternativas capazes de favorecer soluções mais sustentáveis para infraestrutura rodoviária. Nesse sentido, os resultados reunidos oferecem subsídios relevantes para a adoção de materiais alternativos em pavimentação, especialmente quando combinados de forma complementar e avaliados sob uma perspectiva ambiental e econômica mais ampla.

Por fim, destaca-se a importância de investigações futuras que incluam ensaios de módulo de resiliência, deformação permanente e análises mecanístico-empíricas, como o método MeDiNa, a fim de aprofundar o conhecimento sobre o desempenho desses materiais e ampliar seu potencial de aplicação em larga escala.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os avanços obtidos no uso de materiais alternativos para pavimentação rodoviária, existem diversas oportunidades de pesquisa que podem ampliar a compreensão e aplicação dessas soluções no setor de transportes. Algumas sugestões para trabalhos futuros incluem:

- Investigar o comportamento mecânico das misturas contendo escória de aciaria e asfalto fresado com adição de ligantes estabilizantes, visando o aprimoramento da coesão e da durabilidade em camadas de base.
- Avaliar o desempenho de misturas com rejeito de minério de ferro e resíduos de rochas ornamentais submetidas a ensaios complementares, como módulo de resiliência e deformação permanente, para melhor classificação quanto ao tráfego de projeto.
- Estudar a aplicabilidade das misturas desenvolvidas em pavimentos de baixo e médio volume de tráfego, considerando aspectos econômicos, ambientais e de manutenção ao longo do ciclo de vida da estrutura rodoviária.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Panorama mundial do setor de rochas ornamentais e de revestimento em 2013. Informe 13/2014. São Paulo: Abirochas, 2014.

ABRÃO, P. C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO – REGEO’87, 1987, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro, 1987.

AGÊNCIA BRASIL. Pesquisa da CNT aponta contínua deterioração das rodovias brasileiras. Agência Brasil, 08 nov. 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-11/pesquisa-da-cnt-aponta-continua-deterioracao-das-rodovias-brasileiras>. Acesso em: 24 jul. 2025.

ALECRIM, A. V. Estudo do resíduo de quartzito foliado para o emprego em estruturas de pavimentos. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS – ABM. Estudo prospectivo do setor siderúrgico. Brasília: ABM, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5019: Materiais betuminosos – Determinação da penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

BARROS, D. K.; SILVA, M. V. F.; NAPOLEÃO, R.; VIANA, R. A. L.; ALMEIDA, J. R.; LINS, G. A.; RODRIGUES, M. G. *Considerations about the environmental impact caused by extracting sand*. Revista Internacional de Ciências, 2013.

BASTOS, L. A. C. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria-prima para infraestrutura rodoviária. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

BEJA, I. A. Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

BERNUCCI, L. B.; CERATTI, J. A. P.; DA MOTA, L.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2022.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras/Abeda, 2010.

BONFIM, V. Fresagem de pavimentos asfálticos. 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Exceção Editorial, 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n.º 1, de 23 de janeiro de 1986. Licenciamento ambiental – normas e procedimentos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 17 fev. 1986.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de implantação básica de rodovia. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2010.

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

CAVA, F. Estas são as funções dos pavimentos! Além da Inércia, 19 abr. 2021. Disponível em: <https://alemdainercia.com/2021/04/19/estas-sao-as-funcoes-dos-pavimentos/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

CNN BRASIL. Vale reduz produção de minério no 4º tri para priorizar maior margem. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/negocios/vale-reduz-producao-de-minerio-no-4o-tri-para-priorizar-maior-margem/>. Acesso em: 14 ago. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2019. Brasília: CNT, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2024. Brasília: CNT, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-035/98: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-051/94: Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-053/94: Misturas betuminosas – Teor de betume. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-054/97: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-082/94: Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-084/95: Determinação da densidade real do agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-093/94: Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-122/94: Solos – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-195/97: Agregado graúdo – Massa específica e absorção. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-256/94: Solos compactados com equipamento miniatura – perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME-258/94: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 031/2006: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de Pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 138/2010: Pavimentação – Reforço do subleito – Especificação de serviço. Distrito Federal, 2010a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 139/2010: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Distrito Federal, 2010b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 141/2010: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Distrito Federal, 2010c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT-ME 134/2010: Pavimentação – Solo – Determinação do módulo de resiliência. Brasília, 2010d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT-ME 164/2013: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas. Brasília, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT-ME 172/2016: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR). Brasília, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT-ME 424/2020: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos. Brasília, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 141/2022-ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Brasília, 2022.

FERNANDES, G. Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados a geossintéticos. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

FERNANDES, H. C. L. Utilização de resíduos de quartzito na construção rodoviária. Belo Horizonte: Poisson, v. 7, 2019.

FHWA – Federal Highway Administration. Pavement recycling guidelines for state and local governments. Publication FHWA-SA-98-042. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2011.

FRASCÁ, M. H. B. O. Rocha como material de construção. In: ISAIA, G. C. (org.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 437–480, 2007.

GENARO, C. F.; NASCIMENTO, M. S. Análise e melhoramento da adesividade do agregado granítico ao ligante betuminoso em misturas asfálticas. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

GOL, K. C.; LOCASTRO, J. K.; JORGE, G. X. Análise técnica comparativa entre pavimento rígido e flexível. Journal of Exact Sciences – JES, v. 42, n. 2, p. 5–10, jul./set. 2024.

GOTTARDI, E. V. Aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e escória moída de aciaria como filer. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

GOVERNO FEDERAL. Detalhamento dos investimentos em infraestrutura de transportes. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2024/07/governo-federal-vai-investir-r-24-bilhoes-na-infraestrutura-de-transportes>. Acesso em: 12 ago. 2025.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Sistemas de informações e análises da economia mineral brasileira. 6. ed. Brasília: IBRAM, 2011. Disponível em: <https://ibram.org.br>. Acesso em: 13 nov. 2025.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Gestão e manejo de rejeitos de mineração. Brasília: IBRAM, 2016.

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia. Composição da escória produzida pelo processo LD no Brasil. Rio de Janeiro: IBS, 2018.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Infraestrutura de transportes no Brasil: diagnóstico e perspectivas. Brasília: IPEA, 2015.

KLEIN, C.; HURLBUT, C. S. Manual de mineralogia. 21. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

MAIA, A. T.; STELLA, J. C.; PAN, R. C. Y.; SOUZA, W. B.; MATOSKI, A. Caracterização do material obtido pela reciclagem de pavimentos – Estudo de caso. Revista Engenharia e Construção Civil, Paraná, 2014. 12 p.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M. Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, 11., 2000, Gramado. Anais [...]. Gramado, 1998. p. 1007–1017.

ODA, S. Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha. 2000. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ODA, S.; ABREU, V. H. S.; FERNANDEZ, S. D. S.; SÁ, T. S. W. Utilização de rejeitos de mineração na construção de pavimentos rodoviários. Matéria (Rio J.), v. 29, n. 2, 2024. OURO PRETO (MG). Universidade Federal de Ouro Preto. Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil. Ouro Preto: UFOP, 2002.

OLIVEIRA, Jaine Nayara de Araújo de. Aplicação de resíduos de asfalto fresado e de rochas ornamentais regionais para construção de infraestrutura rodoviária. 2022. Relatório Final de Iniciação Científica (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

PEIXOTO, L. A. S. et al. Estudo laboratorial da estabilização química de rejeitos de minério de ferro com cal hidratada. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 29., 2015, Recife. Anais [...]. Recife: ANPET, 2015.

PEREIRA, E. L. Estudo potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PIRES, P. R. Caracterização socioeconômica e ambiental da atividade do tratamento de quartzito na região de Ouro Preto. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.

QUEIROZ, B. O.; MELO, R. A. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: uma alternativa de materiais para pavimentação. In: VIII Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. João Pessoa: UFPB, 2011.

RIBEIRO, R. C.; CORREIA, J. C.; CONCEIÇÃO, M. Aplicação de resíduos do corte de rochas ornamentais na produção de pavimentos. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 23., 2009, Gramado. Anais [...]. Gramado: ABM, 2009.

RUSSO, L. C. Reciclagem de resíduo gerado na extração. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SÁ, E. A. Mistura asfáltica com utilização de agregados alternativos. 2018. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SANTOS, A. S.; LEANDRO, E. A. Estudo da aplicação de asfalto fresado e resíduo de rocha ornamental como base e sub-base. 2017. Monografia – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

SANTOS, L. F. D. Avaliação da viabilidade técnica do reaproveitamento de rejeitos da mineração de alumina para a construção civil. 2020. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

SILVA, G. M. S. da. Avaliação do desempenho de misturas asfálticas constituídas de rejeito de quartzito foliado e asfalto borracha. 2022a. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SILVA, M. G. B. da. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro e de resíduo de quartzito foliado como matérias-primas para construção de superestrutura rodoviária. 2022b. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

TAHA, R.; AL-HARTHY, A.; AL-SHAMSI, K.; AL-ZUBEIDI, M. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002. 7 p.

VIANA, Ingrid Nunes. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro e de resíduo de quartzito foliado como matérias-primas para construção de infraestrutura rodoviária. 2021. Relatório Final de Iniciação Científica (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.