



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Maria Gabriela Batista da Silva

**UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO
DE FERRO E DE RESÍDUO DE QUARTZITO FOLIADO
COMO MATÉRIAS PRIMAS PARA CONSTRUÇÃO DE
SUPERESTRUTURA RODOVIÁRIA**

Ouro Preto

2022

**Utilização de Rejeito de Barragem de Minério de Ferro e de Resíduo de
Quartzito Foliado como Matérias Primas para Construção de Superestrutura
Rodoviária**

Maria Gabriela Batista da Silva

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 02/06/2022

Área de concentração: Transportes e Superestrutura

Orientador: M.Sc. Hebert da Consolação Alves – UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586u Silva, Maria Gabriela Batista Da.

Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro e de resíduo de quartzito foliado como matérias primas para construção de superestrutura rodoviária. [manuscrito] / Maria Gabriela Batista Da Silva. - 2022.

52 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Me. Hebert da Consolação Alves.

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

1. Rejeitos (Metalurgia) - Minério de ferro. 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) - Quartzito. 3. Rodovias - Pavimentos. I. Alves, Hebert da Consolação. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Maria Gabriela Batista da Silva

UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO E DE RESÍDUO DE QUARTZITO FOLIADO COMO MATÉRIAS PRIMAS PARA CONSTRUÇÃO DE SUPERESTRUTURA RODOVIÁRIA

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

Aprovada em 02 de junho) de 2022

Membros da banca

Eng^o MSc. - Hebert da Consolação Alves - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof^a DSc. - Daniela Antunes Lessa - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof^o DSc. - Ronderson Queiroz Hilário - Universidade Federal de Minas Gerais

Hebert da Consolação Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Hebert da Consolacao Alves, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 26/07/2022, às 15:53, 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 **0368077** e o código CRC **FC176DAB**.

*Dedico este trabalho a todos os integrantes
do Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Escola de Minas
da Universidade Federal de Ouro Preto.*

*Dedico também à minha família
e a Deus por terem me acompanhado.*

AGRADECIMENTOS

À Deus que providenciou para que tudo ocorresse da melhor maneira para o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu orientador, Eng^o MSc. Hebert da Consolação Alves e à minha Professora D.Sc. Daniela Antunes Lessa pelo conhecimento compartilhado e apoio para a realização deste trabalho.

Aos meus pais pelo suporte, atenção, carinho e confiança em cada instante desta caminhada para minha formação.

Aos meus irmãos pela união, compreensão e amor em todos estes anos.

Aos amigos que conheci na Universidade Federal de Ouro Preto, pela parceria nos estudo e pelo companheirismo nos momentos felizes e tristes.

Ao Laboratório de Ferrovias e Asfalto pelo conhecimento compartilhado e todo apoio para desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil pelos ensinamentos e pela ajuda.

Ao CNPq pelo suporte financeiro e oportunidade de desenvolver a pesquisa.

RESUMO

A crescente geração de resíduos sólidos das atividades de mineração tem fomentado o desenvolvimento de pesquisas para a utilização desses como materiais alternativos na construção civil e, de forma mais específica, para a construção de infraestruturas rodoviárias mais resilientes, menos onerosas e mais harmônicas com o meio ambiente. Paralelamente à questão ambiental, insere-se à discussão a importância do sistema de transporte para o desenvolvimento da sociedade, que se afigura como um dos meios de consumo coletivo que apresenta os problemas mais visíveis e sentidos pela população. O Brasil, é um exemplo esclarecedor desse cenário: com uma matriz modal desequilibrada, tem a maioria dos deslocamentos de pessoas e mercadorias realizados pelo modo rodoviário, sendo este representado por uma malha nacional majoritariamente em estado de conservação que não atende as exigências atuais do tráfego e com traçados, em sua maioria, projetados a mais de 50 anos. Diante desse contexto, o presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo verificar a aplicabilidade do rejeito de mineiro de ferro (RMF) estabilizado granulometricamente, a partir dos resíduos de minerações de quartzito foliado (RQF), de forma a contribuir para a construção de obras de infraestrutura de pavimentação e, também, para a redução dos impactos ambientais causados pelas atividades mineradoras. No desenvolvimento do estudo foram realizados procedimentos laboratoriais no Laboratório de Ferrovias e Asfaltos (LABFER) alocado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto (DECIV). Como materiais de estudo, foram utilizados o rejeito de barragem de minério de ferro (RMF) e o resíduo de quartzito foliado (RQF) provenientes da atividade mineradora e de pedreiras, respectivamente, dos entornos próximos ao município de Ouro Preto. Foram realizados com o rejeito de minério de ferro e com o quartzito foliado a caracterização física e mecânica de ambos os materiais isoladamente. Para a avaliação da mistura dos dois resíduos foram feitas cinco proporções e analisadas mecanicamente através do ensaio de Índice Suporte Califórnia (ISC). As misturas apresentaram resultados satisfatórios de acordo com a normatização técnica para serem aplicadas como reforço de subleito e/ou sub-base nas camadas de infraestrutura rodoviária.

Palavras-chaves: Rejeito de minério de ferro, resíduos de minerações de quartzito, estabilização granulométrica, pavimentação rodoviária.

ABSTRACT

The growing generation of solid waste from mining activities has fostered the development of research for the use of these as alternative materials in civil construction and, more specifically, for the construction of more resilient, less costly and more harmonious road infrastructures with the environment. In parallel with the environmental issue, the importance of the transport system for the development of society is included in the discussion, which appears as one of the means of collective consumption that presents the most visible and felt problems by the population. Brazil is an enlightening example of this scenario: with an unbalanced modal matrix, most of the displacements of people and goods are carried out by road, which is represented by a national network mostly in a state of conservation that does not meet the current requirements of traffic. and with traces, for the most part, designed more than 50 years ago. In view of this context, the present Course Completion Work aims to verify the applicability of granulometrically stabilized iron mine tailings (RMF), from foliated quartzite (RQF) mining residues, in order to contribute to the construction of paving infrastructure works and also to reduce the environmental impacts caused by mining activities. In the development of the study, laboratory procedures were performed at the Laboratory of Railways and Asphalts (LABFER) allocated to the Civil Engineering Department of the Federal University of Ouro Preto (DECIV). As study materials, iron ore dam tailings (RMF) and foliated quartzite residue (RQF) from mining and quarrying activities, respectively, from the surroundings close to the municipality of Ouro Preto were used. The physical and mechanical characterization of both materials were carried out with the iron ore tailings and with the foliated quartzite. To evaluate the mixture of the two residues, five proportions were made and mechanically analyzed using the California Support Index (ISC) test. The mixtures showed satisfactory results according to the technical standards to be applied as reinforcement of subgrade and/or sub-base in the layers of road infrastructure.

Keywords: Iron ore tailings, quartzite mining residues, granulometric stabilization, road paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Investimento do governo federal em rodovias.	14
Figura 2.1 - Estrutura típica de pavimentos flexíveis.	18
Figura 2.2 - Distribuição de carga através das camadas de suporte de pavimento.	18
Figura 2.3 – Evolução dos investimentos do Governo Federal e do Ministério da Infraestrutura. 2001 – 2021. Em R\$ milhões.....	20
Figura 2.4 – Levantamento de Acidentes e Incidentes.	22
Figura 2.5 – Fluxograma de tratamento de minério	23
Figura 2.6 – Exploração do quartzito na região de Ouro Preto, por bancos e blocos irregulares.	28
Figura 3.2 – Amostra de RQF e de RMF.	31
Figura 3.8 – Índice de Suporte Califórnia – Rompimento na prensa hidráulica. .	34
Figura 3.10 – Equivalente de areia do RMF.	35
Figura 3.11 – Análise granulométrica do RQF.....	36
Figura 3.12 – Índice de forma do RQF.....	36
Figura 3.15 – Equivalente de areia do RQF.....	38
Figura 4.1 – Curva granulométrica do RMF.....	39
Figura 4.2 – Curva granulométrica do RQF.....	39
Figura 4.3 – Curva de compactação do RMF.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.2 – Composição das misturas de RMF e RQF.....	38
Tabela 4.1 – Índices de Consistência do RMF.....	40
Tabela 4.2 – Massa específica das amostras.....	40
Tabela 4.3 - Índice Suporte Califórnia (ISC) do RMF e RQF.....	41
Tabela 4.4 – Classificação MCT.	41
Tabela 4.5 – Índice de forma das partículas de RQF.....	42
Tabela 4.6 – Abrasão Los Angeles do RQF.	43
Tabela 4.7- Índice Suporte Califórnia (ISC) das misturas de RMF e RQF.....	43

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CC – Coeficiente de curvatura
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
cm – Centímetro
cm³ – Centímetro cúbico
CNT – Confederação Nacional do Transporte
CU – Coeficiente de uniformidade
DECIV – Departamento de Engenharia Civil Universidade Federal de Ouro Preto
dm³ – Decímetro cúbico
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
G – Grama
H.ot – Umidade ótima
IP – Índice de Plasticidade
ISC – Índice Suporte Califórnia
Kg – Quilograma
km² – Quilometro ao quadrado
LABFER – Laboratório de Ferrovias e Asfaltos
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
m³ – Metro quadrado
MCT – Miniatura, Compactado, Tropical
MeDina – Método de Dimensionamento Nacional
mm – Milímetro
MR – Módulo de Resiliência
RMF – Rejeito de Minério de Ferro
RQF – Rejeito de Quartzito Foliado
SIGBM – Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração
TRB – *Transportation Research Board*
UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto
USP – Universidade de São Paulo
 γ_d – Densidade seca

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivos Específicos.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Infraestrutura Rodoviária: conceitos e definições	17
2.2	Materiais alternativos para infraestrutura rodoviária.....	19
2.3	Rejeito de mineração de ferro e suas características.....	21
2.4	As barragens de mineração no Brasil.....	24
2.5	Rejeito de mineração aplicado na pavimentação	25
2.6	Quartzito: características e utilização na superestrutura rodoviária.....	27
3	METODOLOGIA	30
3.1	Coleta das amostras.....	30
3.2	Caracterização do Rejeito de Minério de Ferro (RMF)	32
3.2.1	Densidade real - agregado miúdo	32
3.2.2	Análise granulométrica conjunta	32
3.2.3	Índices de consistência	33
3.2.4	Ensaio de Compactação	33
3.2.5	Índice Suporte Califórnia - ISC.....	34
3.2.6	Mini - MCV e perda de massa por imersão para a classificação MCT 34	
3.2.7	Equivalente de areia	35
3.3	Caracterização do Resíduo de Quartzito Folia (RQF)	35
3.3.1	Análise granulométrica.....	35
3.3.2	Índice Suporte Califórnia - ISC.....	36
3.3.3	Forma das Partículas	36
3.3.4	Densidade e Absorção – Agregado Graúdo.....	37
3.3.5	Abrasão Los Angeles	37
3.3.6	Equivalente de Areia	37
3.4	Caracterização mecânica das misturas	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39

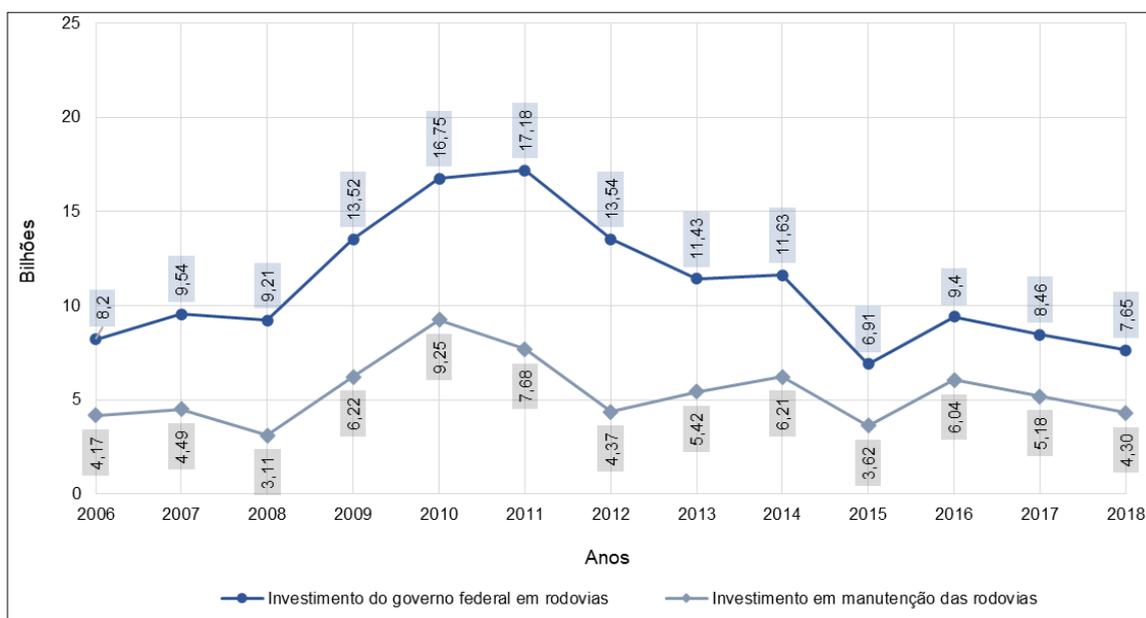
4.1	Granulometria Conjunta e Índices de Consistência	39
4.2	Massa específica e equivalente de areia das amostras e absorção do quartzito foliado	40
4.3	Índice Suporte Califórnia do RQF e do RMF (ISC)	41
4.4	Classificação MCT	41
4.5	Ensaio de compactação	42
4.6	Forma das partículas	42
4.7	Abrasão Los Angeles.....	43
4.8	Índice Suporte Califórnia das misturas (ISC)	43
5	CONCLUSÃO	45
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos são estruturas compostas por camadas sobrepostas, construídas sobre a terraplenagem, destinada técnica e economicamente, de forma a resistir às solicitações do tráfego e do clima, proporcionando aos usuários segurança, economia e conforto (BERNUCCI *et al.*, 2010). Existem dois tipos de pavimentos mais comumente utilizados: os flexíveis (asfálticos) e os rígidos (concreto-cimento). Os primeiros, mais comuns no país, são constituídos por várias camadas, sendo a mais superficial chamada de revestimento que é composta por uma mistura asfáltica (agregados e ligantes asfálticos). Os pavimentos de concreto-cimento são constituídos por uma menor quantidade de camadas e possuem como revestimento uma placa de cimento Portland que podem ser armadas ou não com barras de aço (BERNUCCI *et al.*, 2010; CNT, 2019).

Esses pavimentos tradicionais citados acima sofrem desgastes constantes decorrentes da ação do tráfego e de intempéries. As fissuras e as trincas são alguns dos defeitos recorrentes, podendo se transformar com o tempo em buracos se não tratadas. As ondulações e os afundamentos são outros defeitos que geram desconforto e instabilidade na circulação de veículos. Para que os pavimentos se mantenham em condições adequadas no longo prazo, é necessária a realização periódica de serviços de manutenção (CNT, 2019) que, entre os anos de 2006 e 2018, custou para a União em torno de 70 bilhões de reais de um total de 143 bilhões que foram investidos pelo governo federal em rodovias. Esse montante também foi aplicado na adequação e na construção de rodovias (CNT, 2019). O gráfico da Figura 1.1 apresenta esse investimento ao longo dos anos.

Figura 1.1 - Investimento do governo federal em rodovias.



Fonte: Adaptado de CNT, 2022.

A oferta de infraestrutura de transporte está interligada ao processo de desenvolvimento social e econômico e deve ser parte dos planos de desenvolvimento de cada nação. No Brasil, o transporte rodoviário concentra aproximadamente 61% da matriz modal brasileira de cargas e 95% da de pessoas, evidenciando o desequilíbrio da matriz e a importância do modo para o desenvolvimento econômico do país (CNT, 2019). Segundo relatório da Confederação Nacional do Transporte, são mais de 200 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, por onde, “nas próximas décadas, circularão veículos elétricos, autônomos e, eventualmente, outros tipos de veículos que ainda sequer foram inventados” (CNT, 2019, p. 1).

A Pesquisa CNT de Rodovias constatou que 213.453 quilômetros da malha rodoviária nacional são pavimentados, o que corresponde apenas 12,4% da extensão total (1.720.700 quilômetros). Ademais, 59% da malha pesquisada (108.863 quilômetros) encontra-se em estado geral de conservação inadequado (classificado como regular, ruim e péssimo), o que acarreta um ciclo vicioso de números crescentes de acidentes, desperdícios de cargas e gastos elevados com manutenção e combustíveis (CNT, 2019). Por fim, de acordo com CNT (2019), os estudos realizados apontam que as principais causas das más condições das rodovias nacionais são a estrutura do pavimento e os fatores que interferem em seu desempenho.

Esse contexto de oferta e demanda de transportes e de sua importância econômica, juntamente com a tendência pela busca de soluções mais sustentáveis e

harmônicas com o meio ambiente, tem fomentado o desenvolvimento de pesquisas e novas técnicas para a utilização de materiais alternativos e para a construção de infraestruturas rodoviárias mais resilientes, menos onerosas e preparadas para o cenário de mudanças climáticas (KLAMT *et al.*, 2017). Sendo este, portanto, um caminho de constante atualização no que tange às investigações e à normalização.

Considerando o crescimento contínuo de resíduos descartados em todo mundo, a utilização desses materiais tem se mostrado como uma boa opção aumento da vida útil das jazidas de materiais naturais utilizados na construção e manutenção de pavimentos rodoviários, e na redução das áreas de disposição final desses resíduos.

Alguns exemplos de pesquisas podem ser citados, como o estudo de Bastos (2013) que propôs a utilização do rejeito de barragens de minério de ferro, estabilizado granulométrica e quimicamente, como matéria prima para infraestrutura rodoviária e vias urbanas, resultando, posteriormente em uma patente (PEIXOTO *et al.*, 2015) publicada Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI). Outros trabalhos aplicaram o fresado de asfalto em misturas asfálticas (BATISTA, 2016) e na estabilização de solo (KLAMT *et al.*, 2017). Ainda, é encontrado na literatura diversos estudos de processos reutilizando materiais como a borracha de pneus inservíveis em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação (ODRA, 2000), resíduos sólidos de construção e demolição em camadas de base e sub-base na pavimentação (BEJA, 2014) e resíduos de mineração de quartzito em estruturas de pavimento (ALECRIM, 2009).

Segundo Alecrim (2009), cerca de 90% dos quartzitos desmontados em Minas Gerais são transformados em resíduos, cujo aproveitamento tem sido pouco explorado. Ainda, segundo o autor, algumas pesquisas indicam que os resíduos das minerações de quartzito do Estado podem ser aplicados em vários segmentos da engenharia civil, inclusive na pavimentação.

Paralelamente, em virtude da grande concentração de atividades econômicas relacionadas à extração de minério de ferro e às indústrias siderúrgicas e metalúrgicas em Minas Gerais, há uma geração de grandes volumes de resíduos anualmente, notadamente com um grande impacto ambiental (SANT'ANA FILHO, 2013). Nesse sentido, como forma de possibilitar a redução de impactos ambientais ocasionados pelos rejeitos de minério de ferro e de quartzito, bem como a investigação de materiais alternativos para a construção de superestruturas mais resilientes e menos onerosas,

propõe-se o uso do rejeito de minério de ferro estabilizado granulométrica e quimicamente, a partir dos resíduos de minerações de quartzito foliado, localizadas na região Central do Estado de Minas Gerais, compreendendo os municípios de Ouro Preto e Mariana, como matéria prima para construção de superestrutura para obras de pavimentação rodoviária regionais, sendo uma alternativa de material para as prefeituras.

1.1 Objetivos

O projeto terá por objetivo geral a verificação da aplicabilidade do rejeito de mineiro de ferro, estabilizado granulometricamente a partir dos resíduos de minerações de quartzito foliado, localizados na região Central do Estado de Minas Gerais, compreendendo os municípios de Ouro Preto e Mariana, com base na metodologia de Peixoto *et al.* (2015), de forma a contribuir de forma efetiva para a construção de obras de superestrutura de pavimentação e, também, para a redução dos impactos ambientais causados pelas atividades mineradoras.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos pontuados visam estruturar e embasar o desenvolvimento do estudo para que o propósito principal seja alcançado:

- identificar e escolher o local de coleta dos rejeitos de barragem de minério de ferro e dos resíduos de mineração de quartzito;
- caracterizar física e mecanicamente os rejeitos de barragem de minério de ferro e os resíduos de quartzito foliado;
- caracterizar mecanicamente as misturas estabilizados granulometricamente e dimensionar dosagens ótimas para elas; e
- contribuir para a redução dos passivos ambientais das atividades de mineração e contribuir para a formação de recursos humanos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Infraestrutura Rodoviária: conceitos e definições

O sistema de pavimentação tem por objetivo resistir e distribuir os esforços aplicados devido às cargas de tráfego para as camadas inferiores sem comprometer a operacionalidade do pavimento durante sua vida útil e melhorar a segurança e a comodidade, quanto ao rolamento (RUSSO, 2011). Além disso, deve suportar as variações climáticas, não causar desgaste excessivo nos pneus, não gerar alto nível de ruído, proporcionar a drenagem da água e garantir boa aderência entre as rodas e a pista (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008).

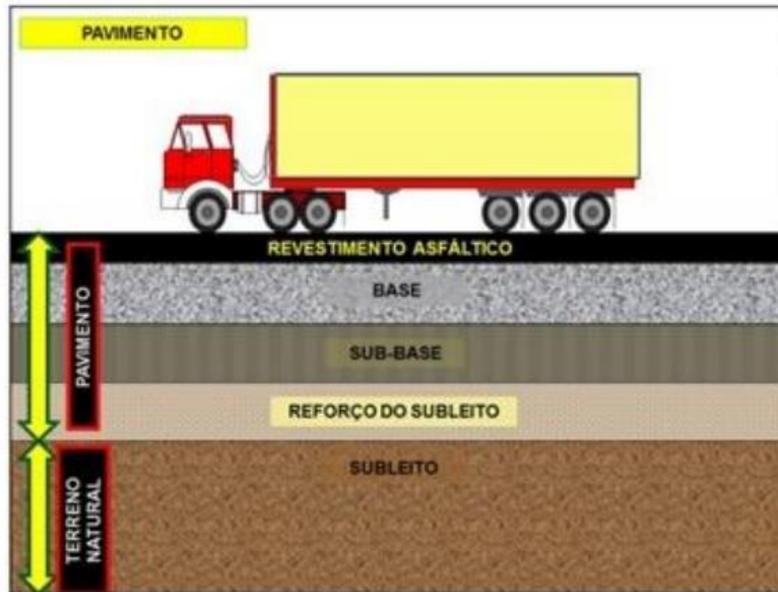
As estruturas dos pavimentos são feitas sobre o subleito, e a partir dela executam-se as demais camadas, podendo estas variar com o tipo de pavimento adotado: rígidos e flexíveis ou asfáltico (SANTOS e LEANDRO, 2017). Os pavimentos rígidos ou de concreto são compostos por camadas que trabalham principalmente à tração, normalmente, formam uma camada superficial de concreto que é feita utilizando o cimento Portland, no qual ela se apoia na sub-base, no reforço de subleito e no subleito. Normalmente é utilizado em corredores de áreas urbanas com tráfego pesado, pois devido a sua maior durabilidade e resistência, se comparado com os pavimentos flexíveis, propiciam uma vida útil de aproximadamente três vezes superior (SANTOS e LEANDRO, 2017; MARQUES, 2006).

Os pavimentos flexíveis ou asfálticos são compostos por camadas que não trabalham à tração, além disso, contém um revestimento de camada superficial betuminoso delgado, que se apoia sobre as camadas de base, sub-base, reforço de subleito e subleito, podendo haver variações destas, pois podem ser suprimidas, dependendo do volume de tráfego da via, da capacidade de suporte do subleito e da espessura das camadas. Esse tipo de pavimento, em relação com o pavimento rígido, na maioria das aplicações, tem uma execução mais rápida e um custo inicial menor (SANTOS e LEANDRO, 2017; MARQUES, 2006).

O revestimento superficial é composto por agregados e um ligante asfáltico, destinado a resistir aos esforços diretos do tráfego e transmiti-los para as camadas inferiores. A base e sub-base são camadas granulares responsáveis por reduzir as tensões provocadas pelas cargas repetidas de tráfego e transmiti-las ao subleito (GONÇALVES, 1999). O reforço de subleito é executado com a finalidade de reduzir elevadas espessuras de sub-base, ocasionadas quando o subleito (terreno de

fundação que servirá de apoio para o pavimento) possui baixa capacidade de suporte (CNT, 2019). A Figura 2.1 representa as camadas do pavimento flexível.

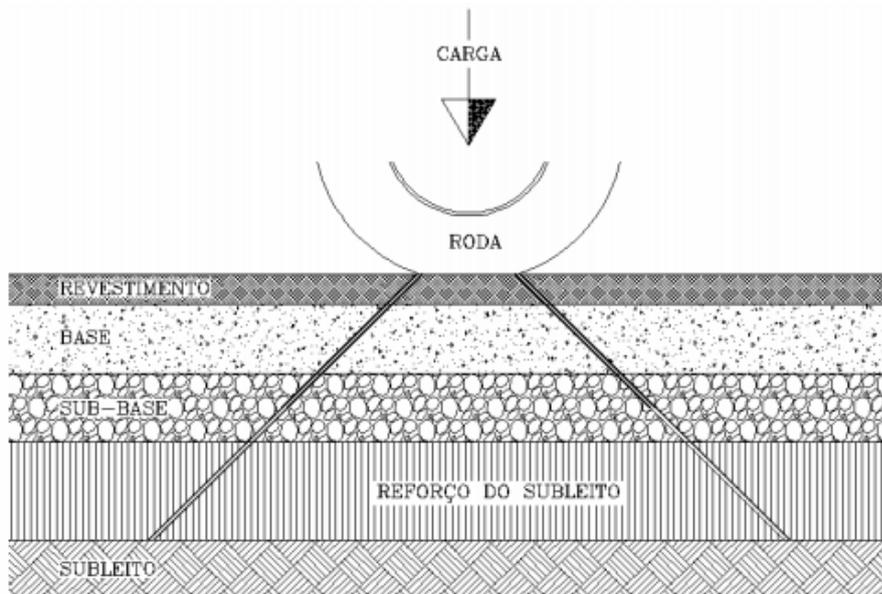
Figura 2.1 - Estrutura típica de pavimentos flexíveis.



Fonte: Silva, 2017.

As tensões aplicadas pelo tráfego e distribuídas pelo solo, formam ângulos próximos a 45° , com isso, devido ao aumento da área de aplicação, quanto maior a profundidade da camada, menor será a tensão aplicada sobre ela (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Distribuição de carga através das camadas de suporte de pavimento.



Fonte: Russo, 2011.

É importante ressaltar que todas as camadas do pavimento flexível devem trabalhar simultaneamente, de forma que o carregamento aplicado seja distribuído ao longo das faixas protegendo o subleito de deformações elásticas e plásticas. O tipo de material que será usado em cada camada varia essencialmente em função do tipo de tráfego que irá atuar na via (DNIT, 2006).

O pavimento, ao ser submetido a um carregamento cíclico e a tensões repetidas no mesmo local (passagem das rodas) estará sujeito a sofrer trincas e fraturas, levando ao processo de ruptura por fadiga (GONÇALVES, 1999). Esse tipo de defeito e as deformações plásticas são as patologias de maior recorrência nos pavimentos, principalmente em regiões tropicais. (BALBO, 2007). Existem outros defeitos que são notados no revestimento, sendo eles: desgaste, corrugação, segregação, escorregamento, dentre outros, em decorrência de dosagens e execuções das demais camadas de rolamento incorretas (SOUZA, 2019).

Para avaliação dos pavimentos flexíveis são realizados cálculos das tensões, das deformações e dos deslocamentos dos materiais. Faz-se, também, a análise da deformabilidade dos mesmos (MEDINA e MOTTA, 2015). Essa investigação é executada através de ensaios laboratoriais, onde se define o comportamento mecânico dos materiais e se estabelece modelos de previsão de desempenho (SOUZA, 2019). Para o dimensionamento dos pavimentos, no Brasil é realizado, principalmente, a partir de dois parâmetros de caracterização mecânica, o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR) (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.2 Materiais alternativos para infraestrutura rodoviária

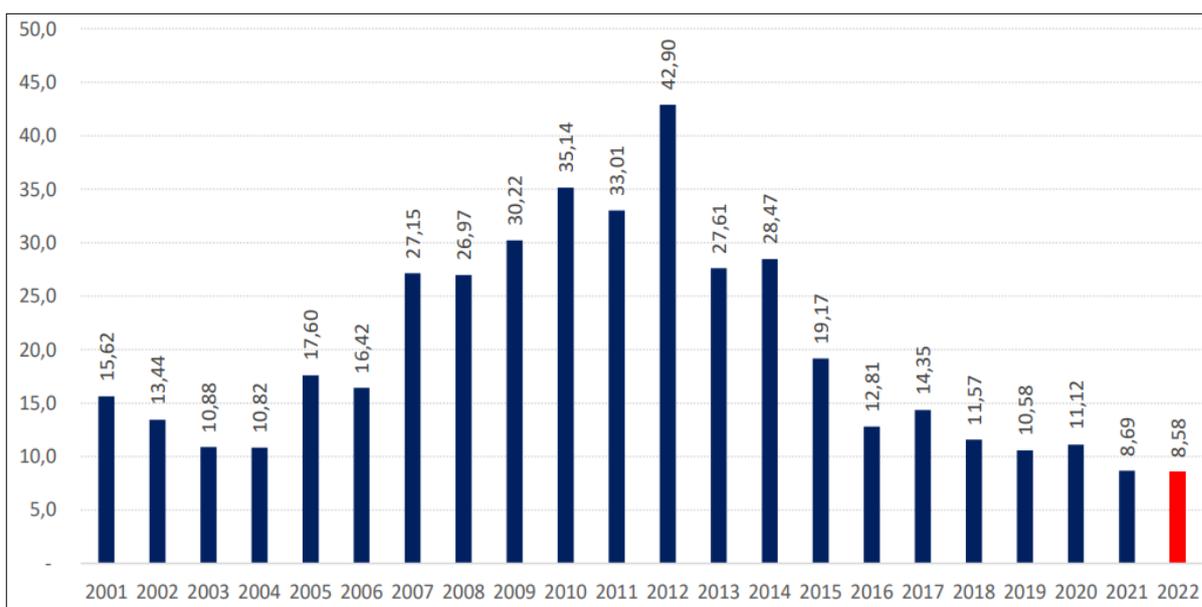
Buscando substituir a utilização de agregados naturais na superestrutura rodoviária, diferentes resíduos vêm sendo estudados a fim de avaliar o seu comportamento e validar a sua aplicabilidade na área da pavimentação. Nessas pesquisas, almeja-se encontrar materiais que proporcionem um pavimento que preencha os requisitos técnicos previstos em normas para a resistência e durabilidade.

Alinhado a isso, a geração de resíduos industriais causa grandes problemas ambientais pela sua disposição inadequada, em decorrência da ausência de alternativas técnicas e economicamente viáveis para o seu aproveitamento (LUZ, 2008). De acordo com Pereira (2012), o gerenciamento eficaz de resíduos sólidos é

um dos maiores desafios ambientais vivenciados pela população mundial no que tange um destino ecologicamente correto e sustentável.

Em paralelo, a última pesquisa de rodovias feita em 2019, pela Confederação Nacional de Transporte (CNT) apontou em sua análise uma piora considerável das condições da qualidade das rodovias nos últimos anos. As rodovias brasileiras, apresentaram problemas em 59% da extensão dos trechos que foram analisadas, sendo que em 2018 o percentual foi de 57%. A CNT estimou em seu plano logístico de 2019 que o Brasil precisa investir R\$ 496 bilhões em 981 projetos de infraestrutura rodoviária. Além do mais, outro agravante da situação, é a diminuição de recursos disponibilizados pelo governo. Em 2022, o investimento autorizado em transporte atingiu a mínima histórica em 21 anos, conforme mostrado na Figura 2.3 (CNT, 2022).

Figura 2.3 – Evolução dos investimentos do Governo Federal e do Ministério da Infraestrutura. 2001 – 2021. Em R\$ milhões



Fonte: CNT (2022).

Devido ao mal estado de conservação dos pavimentos, há um aumento nos custos operacionais, que refletem nos custos dos produtos. Com isso é notável a viabilidade de utilizar materiais alternativos na construção civil, visto que ao reaproveitá-los, possibilita-se a redução da utilização de recursos naturais, de energia para sua extração, de transporte dos materiais e a redução da quantidade de aterros sanitários e industriais.

Silveira *et al.* (2016) apresentou uma discussão sobre diversas pesquisas já realizadas com materiais alternativos como resíduos de construção e demolição,

resíduos de pedreira e fosfogesso. O autor conclui que o aproveitamento destes materiais apresenta viabilidade técnica positiva, tanto na aplicação quanto na execução, proporcionando um pavimento com desempenho satisfatório.

2.3 Rejeito de mineração de ferro e suas características

A mineração é um conjunto de atividades com o objetivo de pesquisar, descobrir, mensurar, extrair tratar ou beneficiar e transformar os recursos naturais para torná-los benéficos econômicos e sociais. Os resíduos sólidos que se destacam provenientes destas atividades são o estéril (extração) e rejeitos (tratamento/beneficiamento). Os estéreis em grande parte são dispostos em depósitos ou pilhas e até mesmo utilizados na recuperação de voçorocas e preenchimento de cavas. O rejeito, por sua vez, a maior parte da sua disposição é realizada em barragens de rejeito que podem ser de solo natural ou construídas com os próprios resíduos (IBRAM, 2016).

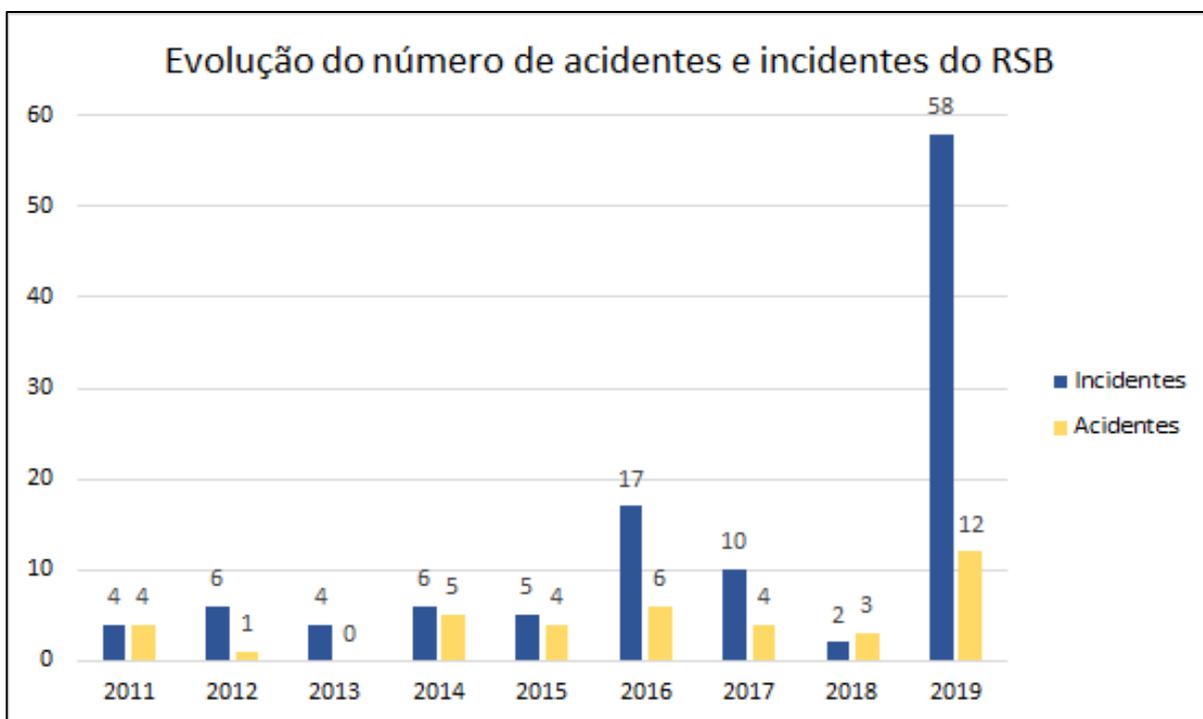
Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2016), as barragens são estruturas feitas em um curso de água, podendo ser permanente ou temporário, que tem como objetivo reter ou acumulação de água ou outras substâncias líquidas, ou também, realizar a contenção de misturas de líquidos e sólidos, como é feito por mineradoras com os rejeitos de barragens. O destino mais adotado para os rejeitos da indústria de mineração são as barragens. Devido ao crescente aumento da extração de mineração, a capacidade das barragens vem aumentando e com isso aumentando também a preocupação e o receio das pessoas, em virtude das graves catástrofes humanas e ambientais devido a ruptura das barragens (SANTOS, 2020).

Segundo a ANA (2020), em 2019 o número de acidentes e incidentes foram muito superiores aos demais anos, e isso se deve possivelmente, a união de alguns fatores, como o aumento de eventos como cheias, a má condição de conservação de barragens e o aumento do conhecimento dos fiscalizadores e do Cenad (Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres). As principais causas que constam no relatório de segurança, são as cheias, erosões ou percolação excessiva, problemas em vertedores, inundações de galerias e rompimento do canal de adução.

Na Figura 2.4, observa-se o aumento dos acidentes com barragens no decorrer dos anos (ANA, 2020). Dentre esses acidentes, incluem-se o rompimento de barragens de grande porte, como o da barragem de Fundão, situada no complexo de mineração da Samarco em Mariana-MG, 2015 e da Mina do Córrego de Feijão, em

Brumadinho, 2019, e há muitos incidentes que são ocorrências que podem levar a acidentes.

Figura 2.4 – Levantamento de Acidentes e Incidentes.

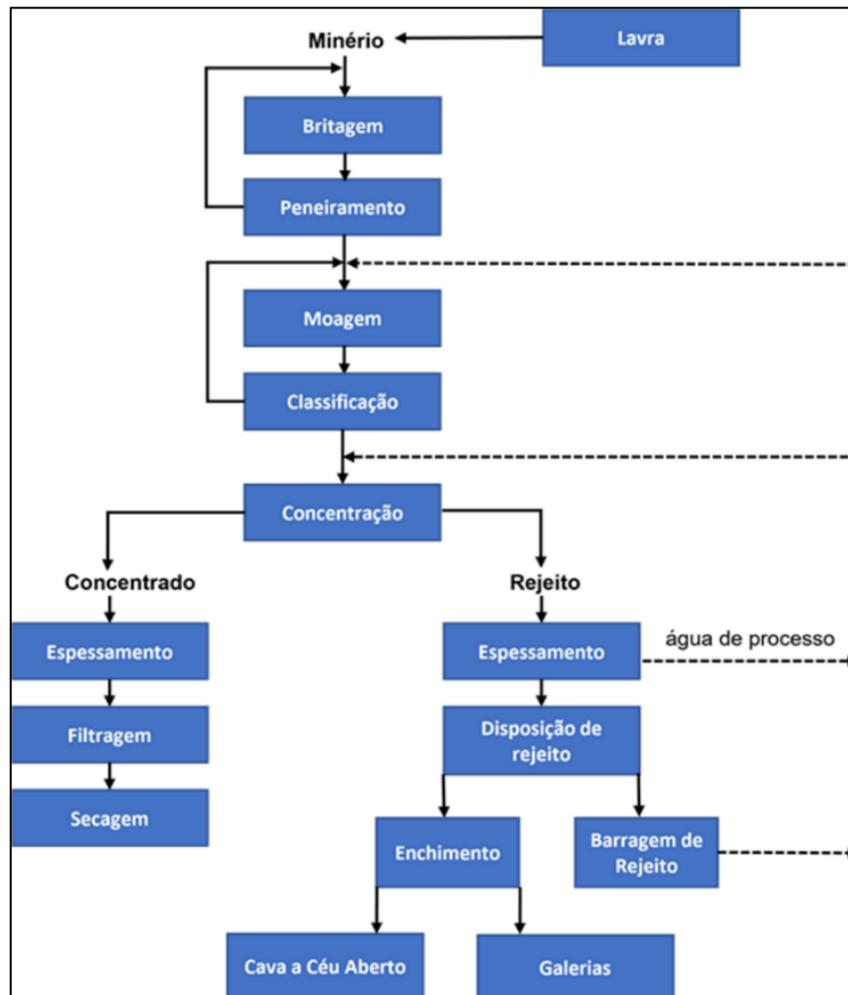


Fonte: Adaptado ANA, 2020.

O mineral com maior índice de exploração no Brasil é o ferro, que corresponde a 72,8% da produção total de minério do país (ANM, 2020). No estado de Minas Gerais, em particular, há uma região conhecida como Quadrilátero Ferrífero que abrange uma área de aproximadamente 7.000 km², no qual, nela estão compreendidas imensas reservas de minério de ferro. Portanto, as empresas de mineração exploram grandes quantidade de minério de ferro, que resulta em altos volumes de resíduo (PEREIRA, 2005).

No processo de lavra e de beneficiamento para a obtenção do minério de ferro é obtido quantidades relevantes de estéreis e rejeitos, uma razão média de 2/1, entre o produto e a geração de rejeito (ABRÃO, 1987). Na Figura 2.5 é demonstrado no fluxograma as etapas de tratamento de minério de ferro, desde as atividades de lavra até o produto.

Figura 2.5 – Fluxograma de tratamento de minério



Fonte: Adaptado de CETEM, 2004.

Durante o seu processo de extração são realizadas diversas etapas que determinam as características dos resíduos gerados no processo. Os rejeitos contêm características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas variadas, pois estas se alteram de acordo com a qualidade da matéria prima e com a tecnologia do processo industrial (FERNANDES, 2005).

Em relação às suas características geotécnicas, o rejeito de minério de ferro apresenta uma vasta heterogeneidade, devido aos seus diferentes processos de extração, do tipo de minério bruto, da variabilidade das frentes de lavra e da sua posição (FERNANDES, 2005). Além disso, as frentes de lavra e as etapas de beneficiamento do mineral influenciam nas propriedades e características dos rejeitos, como volumes produzidos, granulometria, mineralogia, densidade e forma das partículas. Portanto, suas características podem variar de materiais plásticos com

granulometria muito fina, até materiais não plásticos, com características arenosas (MACHADO, 2007).

O rejeito de minério de ferro apresenta como um material granular, constituído principalmente de partículas arenosas de baixa plasticidade, baixa compressibilidade e alta permeabilidade (SILVA, 2017). Segundo o autor, a sua aplicação é restrita na construção civil, entretanto, a sua utilização proporciona uma redução nos danos ambientais, diminui a extração e consumo dos agregados convencionais, além da quantidade de rejeitos gerados. Ainda conforme o autor, a utilização desse resíduo em rodovias poderá contribuir com a redução do número de barragens.

2.4 As barragens de mineração no Brasil

Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM) as barragens de mineração podem ser construídas utilizando os seguintes métodos construtivos:

- Etapa única: quando a barragem é constituída por um dique que foi construído em apenas uma única etapa;
- Alteada a jusante: quando ao longo da vida útil da estrutura, a mesma é ampliada com diques executados ao longo da sua parte externa;
- Alteada por linha de centro: quando a barragem é expandida com diques que se sobrepõem; e
- Alteada por montante: quando a barragem é ampliada com novos diques que são construídos sobre a borda do reservatório.

O método de alteamento a montante é o mais econômico a curto prazo, pois é possível obter uma menor relação entre volumes de areia/lama (TRONCOSO *apud* ARAÚJO, 1997). Entretanto, este método construtivo é o menos seguro, pois os diques são construídos assentando-se sobre o próprio rejeito do reservatório, e quando este é depositado na barragem, ele pode permanecer saturado por longos períodos, aumentando a susceptibilidade a liquefação (CHAMBERS & HIGMAN *apud* RODRIGUES, 2017).

Os últimos acidentes ocorridos com barragens alteadas com o método descrito acima, originou a Resolução ANM Nº 13/2019, em que é proibida a construção deste tipo de estrutura no país. Além disso, a norma determinou o descomissionamento e descaracterização das barragens a montante já existente no país, visando evitar novos rompimentos (ANM, 2006).

De acordo com as estruturas cadastradas no SIGBM, o Brasil possui 446 barragens, das quais 65 são alteadas a montante, o que corresponde a 14% do total. Destas, em Minas Geras estão inseridas 46, em seguida está o Pará com 4, Bahia, São Paulo e Goiás com 3, Rondônia e Rio Grande do Sul com 2 e Mato Grosso e Mato Grosso do Sul com 1 barragem cada. Desse total 3 barragens estão em Nível de Emergência (N.E.) 3, 6 barragens estão no N.E. 2 e outras 6 em N.E. 1. 50 barragens não apresentam nível de emergência (ANM, 2021).

Deve-se ressaltar que os níveis de emergência são definidos de acordo com o artigo 37º da Portaria, a saber:

- I. Nível 1 – Quando detectada anomalia que resulte na pontuação máxima de 10 (dez) pontos em qualquer coluna do Quadro 3 - Matriz de Classificação Quanto à Categoria de Risco (1.2 - Estado de Conservação), do Anexo V, ou seja, quando iniciada uma ISE e para qualquer outra situação com potencial comprometimento de segurança da estrutura;
- II. Nível 2 – Quando o resultado das ações adotadas na anomalia referida no inciso I for classificado como “não controlado”, de acordo com a definição do § 1º do art. 27 desta Portaria; ou
- III. Nível 3 – A ruptura é iminente ou está ocorrendo. (DNPM, 2017, Art. 37).

2.5 Rejeito de mineração aplicado na pavimentação

Em relação à utilização de rejeito em pavimentos, Fernandes (2005) analisou a combinação de resíduos de mineração de ferro e geossintéticos, na construção de um trecho experimental de uma ferrovia nas camadas de subleito e sublastro. O desempenho obtido foi positivo uma vez que as deformações verticais e horizontais sofridas pelas camadas estruturais do pavimento comprovou a qualidade técnica dessas misturas pode ser utilizada com os materiais empregados em pavimentos ferroviários. Pois, o resíduo de minério de ferro mostrou nos ensaios uma boa capacidade de suporte, altos valores de densidade e de Índice de Suporte Califórnia (ISC), baixa expansão e elevados módulos de resiliência.

A fim de estudar o uso de rejeito de minério de ferro como material de construção de pavimentação, Campanha (2011) realizou ensaios em laboratório para analisar as características químicas, mineralógicas e geotécnicas dos rejeitos. Foram feitos os ensaios de Granulometria Conjunta, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidades, Massa específica dos sólidos, Compactação, Índice Suporte Califórnia (ISC), Resistência à compressão simples e Durabilidade por molhagem e secagem dos rejeitos melhorados com cimento Portland, Triaxial de cargas repetidas, Difractometria de raio X, Espectometria por indução óptica e pH.

As composições granulométricas ensaiadas por Campanha (2011) demonstram a possibilidade de utilizar o material como sub-base ou base em solo cimento. Ademais, a partir das duas amostras de rejeito utilizadas na pesquisa foi realizado o ensaio de Índice Suporte Califórnia (ISC), executado na energia intermediária, no qual foram obtidos resultados condizentes com as exigências normativas para sub-base de pavimentos flexíveis, além disso, os valores obtidos de suas expansões também foram adequados. Com isso, a pesquisa apresentou um resultado satisfatório utilizando o rejeito de mineração de ferro na pavimentação, maiormente, quando melhorados com cimento Portland.

Bastos (2013) estudou, através de ensaios convencionais aplicados à pavimentação, a mistura de rejeito de minério de ferro estabilizado quimicamente com cimento, cal e escória de aciaria. Para a estabilização granulométrica, o autor utilizou escória. A avaliação das misturas foi realizada a partir dos ensaios de compactação, ISC, expansão, resistência a compressão, absorção e durabilidade. Os resultados obtidos pelo autor apresentaram potencial satisfatório para o rejeito de minério de ferro ser empregado na infraestrutura rodoviária, tanto pela estabilização química quanto pela estabilização granulométrica.

Silva (2017) estudou misturas asfálticas constituídas por gnaisse substituindo a fração fina desse material por rejeito de minério de ferro. A dosagem dos corpos de prova foi realizada conforme a Metodologia Marshall, com a distribuição granulométrica enquadrando a faixa C de rolamento do DNIT. Os resultados dos ensaios laboratoriais foram satisfatórios para a utilização do rejeito de minério de ferro na composição de misturas asfálticas a quente, em substituição parcial dos agregados convencionais.

2.6 Quartzito: características e utilização na superestrutura rodoviária

O quartzito é utilizado como pedra de revestimento em forma de placas com geometria e dimensões padronizadas. Em alguns contextos, o seu descarte pode obter uma taxa de 92% (RAMIRIO *et al.*, 2008). Essa alta taxa pode ser explicada porque o seu formato deve seguir padrões de espessura e comprimento para obter um produto satisfatório após o beneficiamento. Portanto, o material extraído que não possuir as características atribuídas, passa a ser considerado rejeito (FRANCKLIN JUNIOR, 2009).

O quartzito é geralmente caracterizado por ter uma coloração que varia entre as cores branca a cinza, mas pode conter outras variações de cores devido a presença de diversos minerais. É uma rocha metamórfica composta em grande parte de grãos de quartzo que é o principal mineral do grupo de SiO₂ dos tectossilicatos. Além do quartzo, ele também pode conter em sua composição outros minerais como o feldspato, moscovita e biotita (USP).

O quartzito pode ser formado através dos arenitos ricos em quartzo que, ao ser sujeito a altas pressões e temperaturas devido a movimentações tectônicas, os grãos da rocha são recristalizados gerando como produto a rocha metamórfica de quartzito (SOUZA, 2018). Outra maneira dele se formar é quando um cimento rico em sílica (SiO₂) preenche os espaços vazios entre os grãos, que são formados, através da circulação de fluidos desenvolvidos em condições de baixas temperaturas e pressões. Este tipo de quartzito é conhecido como ortoquartzito, e não é propriamente dita como rocha metamórfica, pois os minerais originais, os planos de estratificação e outras estruturas sedimentares da rocha original estão preservados (PIRES, 2007).

O quartzito entre os municípios de Mariana e Ouro Preto, é caracterizado pela sua xistosidade, que quando inalterado possui uma coloração esbranquiçada/cinza, mas devido a percolação de águas meteóricas atribui matizes amarelados, rosados a vermelho ferrugem. Ademais, as placas em sua maior parte, se separam em placas de espessura de 1,0 a 5,0 cm (PIRES, 2007).

A extração do quartzito é feita a céu aberto, por bancos, no qual os blocos que têm uma maior qualidade, são selecionados e retirados da encosta. Em seguida, são cortados e arremessados para baixo, onde serão divididas em pedras de revestimento. O corte é realizado através de técnicas rudimentares, utilizando ferramentas usuais para corte e alavancagem e ocasionalmente pequenas

quantidades de pólvora (PIRES, 2007). A Figura 2.6 apresenta a exploração do quartzito foliado.

Figura 2.6 – Exploração do quartzito na região de Ouro Preto, por bancos e blocos irregulares.



Fonte: Pires (2007).

A exploração do quartzito normalmente é direcionada para uso na construção civil, pois se trata de um material com alta resistência à ação de produtos químicos e alta resistência mecânica, além de características antideslizantes e uma considerável resistência ao aquecimento do sol (SOUZA, 2018). Ele é muito utilizado para revestimentos em ambientes, sendo uma ótima opção para pisos, escadas, paredes e entorno de piscinas. Em sua maior parte, não é polido, pois oferece uma superfície áspera fazendo com que possa ser usado como antiderrapante para pisos. Além de ser um material frio que absorve pouco calor e reduz a temperatura dos ambientes. Ademais, o quartzito também vem sendo utilizado para compor peças estruturais, soleiras, bancadas, dentre outros (RUSSO, 2011).

Em relação à utilização de quartzito foliado para a construção de infraestrutura rodoviária, Alecrim (2009) estudou a sua aplicação como base ou sub-base de pavimentos flexíveis. No estudo ele combinou o resíduo com Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Vermelho-Amarelo, solos de alta ocorrência no Sudoeste Mineiro, região da pesquisa. Tais misturas foram submetidas aos ensaios de compactação, Índice Suporte Califórnia e módulo de resiliência.

Após analisar os resultados das misturas agregado-solo, ele percebeu que, segundo as especificações do DNIT, é possível utilizá-lo como material granular para uso de base ou sub-base de camadas de pavimentos. As misturas apresentaram um comportamento adequado quanto à resistência e à deformabilidade, podendo ser comparadas à materiais nobres granulares e a misturas solo-agregado convencionais. Grande porcentagem dos grãos tem uma forma cúbica, existe uma parcela significativa de partículas lamelares alongadas ou mesmo alongadas/lamelares. Devido à sua forma, esse agregado não poderia ser utilizado para algumas aplicações rodoviárias, contudo, visando melhorar esta característica, poderia ser alterado o processo de britagem que traria maior cubicidade às partículas.

3 METODOLOGIA

O planejamento dos ensaios realizados no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto, foi idealizado de acordo com a Tabela 3.1.

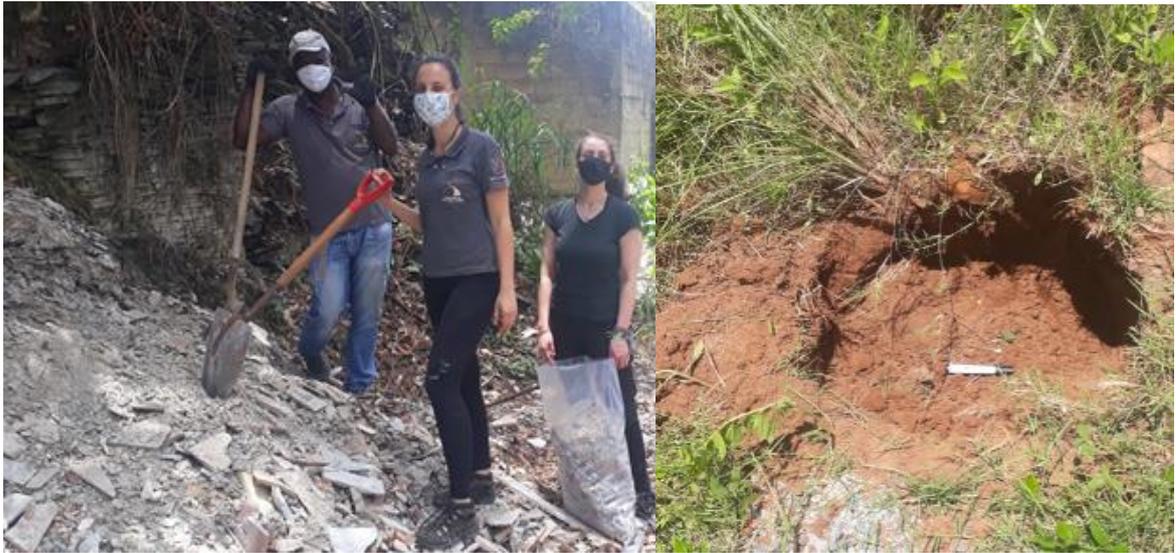
Tabela 3.1 – Planejamento das Atividades Experimentais

Rejeito de Minério de Ferro	
<u>Ensaio</u>	<u>Norma</u>
Granulometria Conjunta	DNER-ME 080/94 e DNER-ME 051/94
Índices de Consistência	DNER-ME 082/94 e DNER-ME 122/94
Densidade Real	DNER-ME 93/94 e NBR 6458
Ensaio de Compactação	DNIT-ME 164/2013
Mini – MCV e perda de massa por imersão para a classificação MCT	DNER-ME 258/94 e DNER-ME 256/94
Equivalente de Areia	DNER-ME 054/97
Índice Suporte Califórnia - ISC	DNIT-ME 172/2016
Resíduo de Quartzito Foliado	
<u>Ensaio</u>	<u>Norma</u>
Granulometria	DNER-ME 080/94
Forma das Partículas	DNIT - ME 424/2020
Densidade e Absorção	DNER-ME 081/98
Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98
Equivalente de Areia	DNER-ME 054/97
Índice Suporte Califórnia - ISC	DNIT-ME 172/2016
Estabilização Granulométrica	
<u>Ensaio</u>	<u>Norma</u>
Índice Suporte Califórnia - ISC	DNIT-ME 172/2016

3.1 Coleta das amostras

A coleta do rejeito foi feita em Paracatu de Baixo, distrito pertencente à cidade de Mariana - MG. O solo da região é composto pelo rejeito de minério de ferro (RMF), originado no ato do rompimento da barragem de Fundão, em 2015. O resíduo de quartzito foliado, aqui tratado como RQF, foi coletado em uma pedreira localizada no distrito de Passagem de Mariana, pertencente ao município de Mariana-MG, o composto foi cedido pelo proprietário da empresa. A realização dessa etapa da pesquisa é mostrada nas Figura 3.1 e Figura 3.2.

Figura 3.1 – Coleta das amostras de RQF e de RMF, respectivamente.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 3.1 – Amostra de RQF e de RMF.



Fonte: O autor, 2020.

Após a coleta, as amostras foram transportadas para o laboratório de Ferrovias e Asfalto do Departamento de Engenharia Civil da UFOP em sacos plásticos. Procederam-se então, a secagem em estufa, destorroamento e identificação dos mesmo para posterior utilização nos ensaios que serão descritos neste capítulo.

3.2 Caracterização do Rejeito de Minério de Ferro (RMF)

3.2.1 Densidade real - agregado miúdo

A determinação da densidade real dos grãos de solo, necessária para o ensaio de sedimentação, foi realizada de acordo com os métodos de ensaio DNER (1994f) e NBR (2016) e a realização deste é apresentada na Figura 3.3, respectivamente.

Figura 3.3 – Densidade Real do RMF.



Fonte: O autor, 2020.

3.2.2 Análise granulométrica conjunta

A análise granulométrica por peneiramento e por sedimentação do RMF foi realizada segundo os procedimentos de ensaios DNER (1994b) e DNER (1994a). A realização do ensaio é apresentada na Figura 3.4, onde são apresentadas, respectivamente, as duas etapas do ensaio, peneiramento e sedimentação.

Figura 3.4 – Ensaio de granulometria completa – Peneiramento e Sedimentação.



Fonte: O autor, 2020.

3.2.3 Índices de consistência

Para a determinação do limite de liquidez e do limite de plasticidade foram empregadas as seguintes normas, respectivamente, DNER (1994d) e DNER (1994c). A execução dos ensaios é apresentada na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Ensaio de limites de liquidez e de plasticidade.



Fonte: O autor, 2020.

3.2.4 Ensaio de Compactação

Para a determinação da correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente do solo seco foi empregada a seguinte norma, DNIT (2013). A execução do ensaio é apresentada na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Compactação do RMF – Proctor normal.



Fonte: O autor, 2020.

3.2.5 Índice Suporte Califórnia - ISC

Para a determinação do Índice Suporte Califórnia, utilizou-se da energia normal e foi empregada a seguinte norma DNIT (2016). As fases de execução do ensaio são apresentadas nas Figura 3.7 e Figura 3.8.

Figura 3.7 – Índice de Suporte Califórnia – Compactação e Imersão.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 3.2 – Índice de Suporte Califórnia – Rompimento na prensa hidráulica.



Fonte: O autor, 2020.

3.2.6 Mini - MCV e perda de massa por imersão para a classificação MCT

Para a caracterização e classificação tropical do solo foram empregados os seguintes métodos de ensaio DNER (1994e) e DNER (1994g). A execução do ensaio é apresentada na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Mini-MCV RMF e Imersão dos corpos de prova.



Fonte: O autor, 2020.

3.2.7 Equivalente de areia

Para a determinação do equivalente de areia dos resíduos empregou-se a seguinte norma, DNER (1997). A execução do ensaio é apresentada na Figura 3.10.

Figura 3.3 – Equivalente de areia do RMF.



Fonte: O autor, 2020.

3.3 Caracterização do Resíduo de Quartzito Folia (RQF)

3.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica por peneiramento do RQF foi realizada segundo o procedimento de ensaio DNER (1994b). A realização do ensaio é apresentada na Figura 3.11.

Figura 3.4 – Análise granulométrica do RQF.



Fonte: O autor, 2020.

3.3.2 Índice Suporte Califórnia - ISC

Para a determinação do Índice Suporte Califórnia, utilizou-se da energia normal e foi empregada a seguinte norma, DNIT (2016). A execução do ensaio e suas fases seguiram a mesma metodologia apresentada nas Figura 3.7 e Figura 3.8.

3.3.3 Forma das Partículas

Para a determinação do índice de forma das partículas foi empregado o seguinte ensaio, DNIT (2020). A execução do ensaio é demonstrada na Figura 3.12.

Figura 3.5 – Índice de forma do RQF.



Fonte: O autor, 2020.

3.3.4 Densidade e Absorção – Agregado Graúdo

Para a determinação da densidade aparente e da absorção d'água foi empregada a seguinte norma, DNER (1998b). A execução do ensaio é apresentada na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Massa hidrostática e densidade do resíduo do RQF.



Fonte: O autor, 2020.

3.3.5 Abrasão Los Angeles

Para a obtenção do valor da abrasão “Los Angeles” foi empregado o seguinte procedimento de ensaio DNER (1998a). A amostra antes de depois do ensaio é apresentada nas Figuras 3.21 e 3.22, respectivamente.

Figura 3.14 – Amostra do RQF antes e depois do ensaio abrasão.



Fonte: O autor, 2020.

3.3.6 Equivalente de Areia

Para a determinação do equivalente de areia dos resíduos empregou-se a seguinte norma, DNER (1997). A execução do ensaio é demonstrada na Figura 3.15.

Figura 3.6 – Equivalente de areia do RQF.



Fonte: O autor, 2020.

3.4 Caracterização mecânica das misturas

Para a realização dessa fase foram produzidas cinco misturas, a primeira composta por 50% RMF e 50% RQF, a segunda por 40% RMF e 60% RQF, a terceira 30% RMF e 70% RQF, a quarta 20% RMF e 80% RQF e a quinta 70% RMF e 30% RQF como apresentado na Tabela 3.2. No que tange ao Índice de Suporte Califórnia (ISC), foi determinado com base na metodologia descrita na ME 172 (DNIT, 2016), utilizando-se energia normal.

Tabela 3.1 – Composição das misturas de RMF e RQF

Misturas	RMF (%)	RQF (%)
1	50	50
2	40	60
3	30	70
4	20	80
5	70	30

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Granulometria Conjunta e Índices de Consistência

As curvas granulométricas do RMF e do RQF utilizados na pesquisa são apresentadas nas Figura 4.1 e Figura 4.2, respectivamente.

Figura 4.1 – Curva granulométrica do RMF.

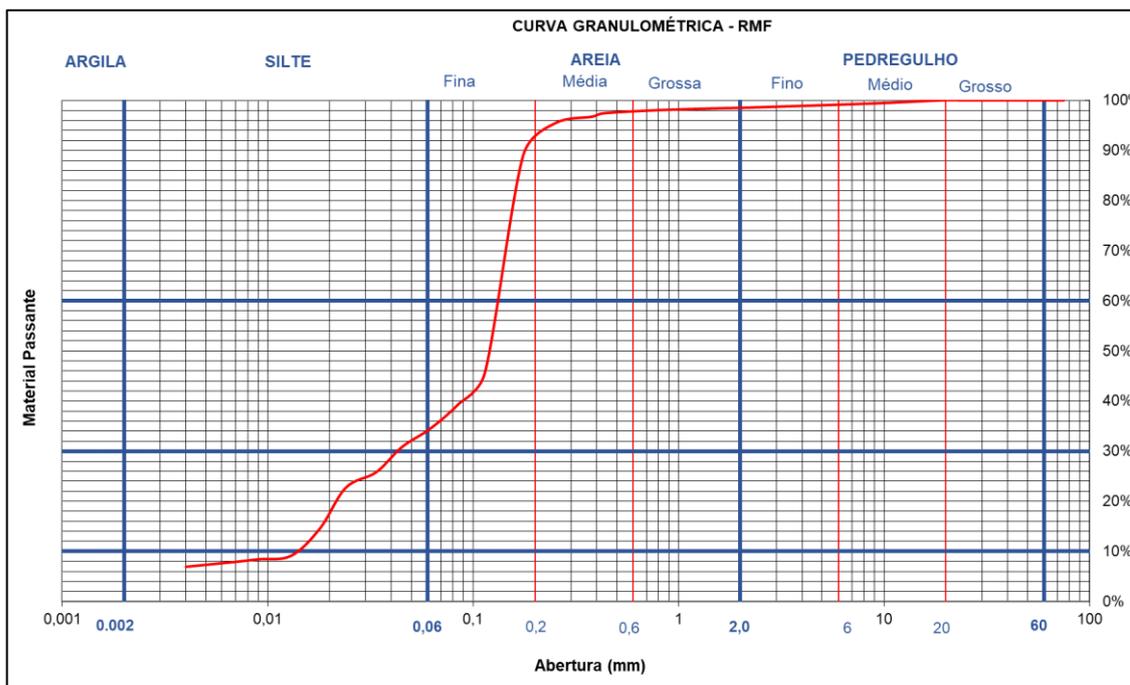
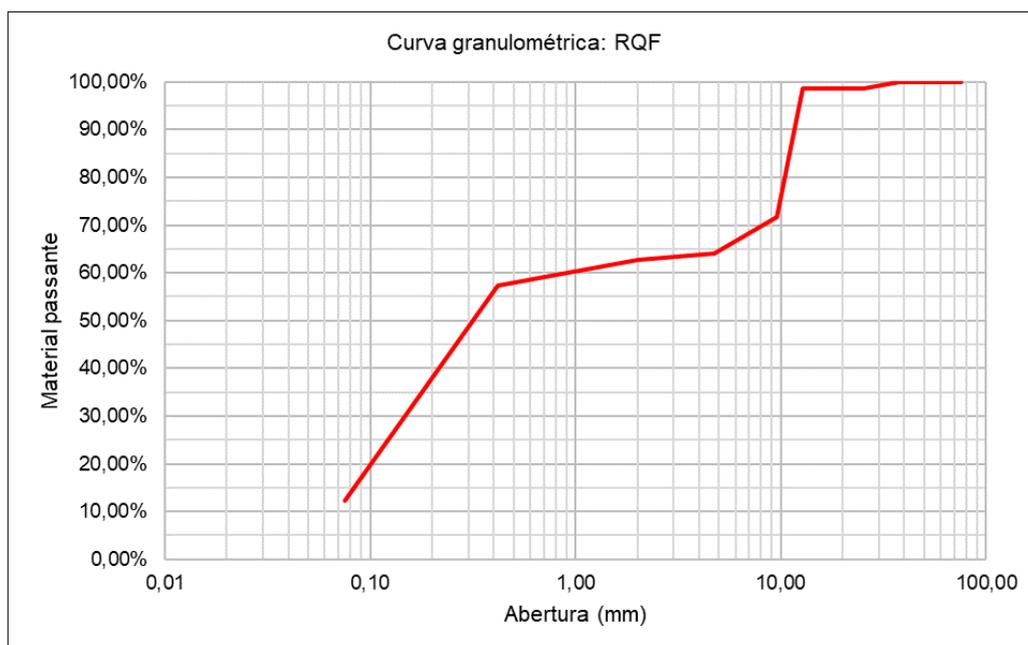


Figura 4.2 – Curva granulométrica do RQF.



A partir da curva do RMF obtém-se coeficiente de uniformidade (C_u) igual a 6 e coeficiente curvatura (C_c) igual a 1,60 e a curva do RQF apresenta C_u igual 19,42 e C_c 0,61. Conforme Das (2007), a partir dos valores obtidos de C_u e C_c para os materiais em estudo, o RMF pode ser classificado como um solo com uniformidade média e bem graduado e o RQF como um material desuniforme e mal graduado.

Os resultados obtidos na determinação dos índices de consistência do RMF são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Índices de Consistência do RMF.

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

A classificação encontrada indica um material de constituição siltosa, mas sua não plasticidade pode ser explicado pelo fato de possuir porcentagem relevante de areia, como pode ser observado na curva granulométrica.

4.2 Massa específica e equivalente de areia das amostras e absorção do quartzito foliado

O resultado da massa específica e do equivalente de areia do RMF e do RQF e a absorção do quartzito foliado são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Massa específica das amostras.

Amostra	Massa Específica (g/cm ³)		Equivalente de areia (%)		Absorção (%)	
	Resultado	Referência	Resultado	Mínimo normativo	Resultado	Referência
RMF	2,99	3,55 (Bastos, 2013)	36,07	40 (Bernucci, 2010)	-	-
RQF	2,75	2,62 (Melo, 2016)	52,00		0,75	0,5 – 2,0 (Bom) (Verhoef & Van De Wall <i>apud</i> Gomes, 2001)

Os resultados encontrados de massa específica de ambos os materiais e de equivalente de areia para o RQF estão apropriados com os valores determinados em pesquisas realizadas anteriormente e com o limite normativo. Essa diferença entre o

resultado de massa específica encontrado na pesquisa e o valor determinado por Bastos (2013), pode ser explicado pela origem de cada rejeito.

O valor excelente de absorção dos agregados é $< 0,5$ e resultados entre 0,5 e 2,0 são considerados bons (Verhoef & Van De Wall *apud* Gomes, 2001). Portanto, a absorção do quartzito foliado é considerada boa.

4.3 Índice Suporte Califórnia do RQF e do RMF (ISC)

O resultado do ensaio de ISC das amostras de RMF e de RQF são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Índice Suporte Califórnia (ISC) do RMF e RQF.

Amostra	ISC (%)	Expansão (%)	γ_d (g/cm ³)	H.ot (%)
RMF	15,90	0	2,11	11,40
RQF	19,40	0	1,88	10,70

Segundo a norma do DNIT 139/2010 o material para ser utilizado como sub-base para pavimentação deve apresentar ISC igual ou superior a 20% e expansão $< 1\%$. Além disso, a norma DNIT 138/2010 especifica que no caso de subleitos com valores de ISC inferiores a 2%, é necessário realizar seu reforço com um material com capacidade superior do que o existente, logo o RMF e o RQF, podem ser utilizados como reforço de subleito.

4.4 Classificação MCT

Os resultados obtidos segundo a metodologia MCT para o material RMF são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Classificação MCT.

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

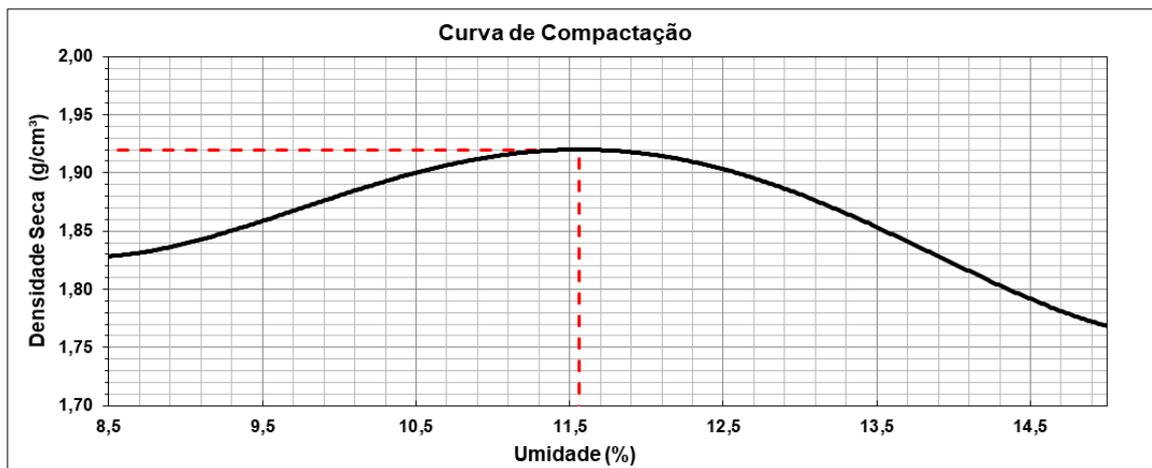
A metodologia MCT é utilizada para determinação das propriedades mais representativas do comportamento dos solos tropicais para sua utilização em obras viárias em geral e, em particular, as de pavimentação. De acordo com a classificação obtida através do ensaio descrito, o RMF em estudo pode ser classificado como uma laterita que possui em sua composição areia com pouca argila.

De acordo com a norma DNER-CLA 259 que classifica os solos tropicais para finalidades rodoviárias, os solos do grupo LA apresentam baixa perda de suporte por encharcamento, alto Mini-ISC sem encharcamento, baixa expansão e contração, permeabilidade baixa a média e plasticidade ausente ou baixa.

4.5 Ensaio de compactação

A curva de compactação obtida do material de RMF é apresentada na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Curva de compactação do RMF.



O resultado encontrado para densidade máxima seca foi de 1,92 kg/dm³ e para a umidade ótima foi de 11,56%. Valores típicos encontrados para solos argilosos são de umidade ótima em torno de 25% a 30% e densidades secas máximas que correspondem entre 1,4 e 1,5 kg/dm³. Já os solos arenosos lateríticos finos apresentam umidade ótima entre 9 e 10% e densidade máxima seca da ordem de 2 a 2,1 kg/dm³. As areias siltosas, por sua vez, possuem umidade ótima de 12 a 14% e densidades secas máximas em torno de 1,9 kg/dm³ (PINTO, 2006). Portanto, o RMF estudado tem um comportamento similar ao das areias siltosas.

4.6 Forma das partículas

O resultado obtido da amostra do RQF quanto ao seu índice de forma é disposto na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Índice de forma das partículas de RQF.

Amostra	Tamanho diretriz da fração (mm)	Crivo 1	Crivo 2	Amostra retida no crivo 1 (%)	Amostra retida no crivo 2 (%)	Índice de forma
RQF	12,7	Aberturas (mm)			35,59	93,74
	9,5	6,4	4,8	4,2		

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), o índice de forma das partículas varia de 0,0 a 1,0, sendo considerado de ótima cubicidade valores próximos ou iguais a 1,0. Para pavimentação o índice de forma deve ser maior ou igual a 0,5, portanto o material não apresenta desempenho satisfatório, principalmente para ser utilizado como base na camada de infraestrutura de uma rodovia.

4.7 Abrasão Los Angeles

A resistência à abrasão mede a capacidade do agregado não se alterar ao ser manuseado, sendo assim, é possível determinar a partir do ensaio o desgaste superficial quando submetido ao atrito. O resultado de abrasão Los Angeles da amostra do RQF é apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Abrasão Los Angeles do RQF.

Amostra	% de perda
RQF	96

De acordo com esse resultado do ensaio e com a norma DNIT (2010c) o RQF estudado na pesquisa não é recomendado para uso em base de pavimento, pois a norma descreve que a perda por abrasão máxima deve ser de 55%. Esse valor elevado pode ser justificado pelo quartzito se caracterizar como uma rocha metamórfica foliar, com formatos lamelares, sendo comum esse tipo de material possuir perda por abrasão elevada.

4.8 Índice Suporte Califórnia das misturas (ISC)

O resultado do ensaio de ISC das misturas de RMF e de RQF são apresentados na Tabela 4.7 e as curvas de compactação das amostras na

Tabela 4.7- Índice Suporte Califórnia (ISC) das misturas de RMF e RQF.

Amostra	RMF (%)	RQF (%)	ISC (%)	Expansão (%)	γ_d (g/cm ³)	H.ot (%)
1	50	50	39,60	0	2,13	12,00
2	40	60	46,80	0	2,19	12,80
3	30	70	17,30	0	2,10	8,00
4	20	80	28,40	0	2,06	12,20
5	70	30	18,80	0	2,41	13,20

Como citado anteriormente, segundo a norma do DNIT (2010b), o material para ser utilizado como sub-base para pavimentação deve apresentar ISC igual ou superior a 20% e expansão $< 1\%$, logo as amostras 1, 2 e 4 são adequadas para utilização nesta categoria. Além disso, a norma DNIT (2010a), especifica que no caso de subleitos com valores de ISC inferiores a 2%, é necessário realizar seu reforço com um material com capacidade superior do que o existente. Logo, as amostras possuem desempenho satisfatório para isso.

Além disso, deve-se ressaltar os valores encontrados para as amostras 3 e 5 que foram divergentes dos demais, podendo ser justificado por algum erro que possa ter ocorrido durante a execução do ensaio.

5 CONCLUSÃO

A partir do cenário de grande geração de resíduos, em especial, o montante de rejeito gerado nas mineradoras, juntamente com a dificuldade de disposição dos mesmos e com a obrigatoriedade de descomissionamento e de descaracterização das barragens alteadas a montante, faz-se necessário o reaproveitamento desses resíduos em diferentes âmbitos da sociedade.

Neste trabalho, o resultado encontrado no ensaio de abrasão Los Angeles para o resíduo de quartzito foliado está fora do limite normativo, entretanto, o resultado encontrado por Alecrim (2009) para o mesmo material foi de 28% e 31%. Portanto, faz-se necessária a repetição do ensaio para confirmação do resultado. Além disso, o valor encontrado para o índice de forma do mesmo material também não está dentro do limite normativo, uma alternativa seria britar o quartzito foliado adequando a sua forma e granulometria para uso na superestrutura rodoviária.

Entretanto, com base nos resultados encontrados para a resistência mecânica das misturas de resíduo de quartzito foliado (RQF) e de rejeito de minério de ferro (RMF), através do ensaio de Índice Suporte Califórnia, todas as composições são satisfatórias para o uso como reforço de subleito. Além disso, as misturas com 50% RQF e 50% RMF, 60% RQF e 40% RMF e 80% RQF e 20% RMF possuem desempenho adequado para serem utilizadas como sub-base.

Deve-se ressaltar que, segundo Bernucci (2010), o valor do módulo de resiliência do solo, definido através do ensaio triaxial de cargas repetidas, é o mais indicado para o dimensionamento da superestrutura rodoviária. O ensaio de obtenção do MR corresponde de forma mais efetiva ao efeito das cargas que os pavimentos são submetidos. Todavia, deve-se ressaltar que o equipamento para a execução deste ensaio é encontrado em poucos laboratórios das Universidades, dificultando a sua utilização nas pesquisas.

Contudo, esse estudo demonstra a capacidade que diferentes resíduos gerados pela humanidade podem ser reaproveitados em diversos âmbitos da sociedade, em especial na infraestrutura de rodovias. Portanto, confirma-se a importância de se ter pesquisas para atestar a potencialidade e aplicabilidade de materiais que não seriam mais utilizados. Com isso, teremos uma menor geração de resíduos, produzindo um mundo mais sustentável e auxiliando na qualidade do meio ambiente.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realização do ensaio de Módulo de Resiliência com as misturas para avaliação do seu comportamento e posterior análise através do Método MeDiNa.
- Estudar a estabilização granulométrica do rejeito com o quartzito foliado com a retirada do pó de pedra.
- Estudar a estabilização granulométrica do rejeito com quartzito foliado britado nas granulometrias adequadas para uso em pavimentação.
- Estudar a utilização das misturas como base de pavimentos urbanos (bloquetes de cimento, poliédricos e paralelepípedos).

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, P.C. (1987) *Sobre a Deposição de Rejeitos de Mineração no Brasil. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração*, REGEO'87, Rio de Janeiro.
- AGÊNCIA BRASIL. ANA aponta aumento no número de barragens críticas e acidentes. Brasília, 2020. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br>>. Acessado em: 22 novembro 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. *Guia Prático de Pequenas Barragens. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens*. 8, Brasília, 2016. Disponível em: <<https://biblioteca.ana.gov.br>>. Acessado em: 22 novembro 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. *Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas*. Brasília, 2020. Disponível em: <www.anm.gov.br>. Acessado em: 22 novembro 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. *Barragens de Mineração*. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens>>. Acessado em: 15 janeiro 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. Report Trimestral Descaracterização de Barragens a Montante. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao>>. Acessado em: 15 fevereiro 2022.
- ALECRIM, A. V. (2009) *Estudo do Resíduo de Quartzito Foliado para Emprego em Estruturas de Pavimento*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ARAÚJO, C. B. (2006) *Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2016.
- BALBO, J. T. (2007) *Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projetos e Restauração*. São Paulo: Oficina de Textos.
- BASTOS, A. D. C. (2013) *Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária*. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- BERNUCCI, L. B. *et al. Pavimentação Asfáltica- Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Abeba, v. 3ª reimpressão, 2008.
- BERNUCCI, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P; Soares, J. B. (2010) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2010.
- BRANCO, V. T. F. C. ; Vasconcelos, K. L.; Moreira, H. S.; Pinheiro, J. H. M. ; Soares, J. B. (2004) *Utilização de Resíduos na Pavimentação. Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia Em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável*

– ICTR 2004. Florianópolis.

- CAMPANHA, A. (2011) *Caracterização de Rejeitos de Minério de Ferro para Uso em Pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- CETEM (2004). *Introdução ao Tratamento de Minério*. Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia. Capítulo 1, Rio de Janeiro, 16p.
- CHAMBERS, David M.; Higman, Bretwood. LONG TERM RISKS OF TAILINGS DAM FAILURE. Seldovia, USA: 2011.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. *Pesquisa CNT de Rodovias 2019*. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT. *Radar CNT do Transporte – Orçamento 2022*. Disponível em <<https://www.cnt.org.br>>. Acesso em: 20 março 2022.
- DAS, B. M. (2007) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª Edição. São Paulo: Editora Thomson.
- DNER (1994a) *DNER-ME 051/94: Solos - Análise Granulométrica*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNER (1994b) *DNER-ME 080/94: Solos, Análise Granulométrica*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNER (1994c) *DNER-ME 082/94: Solos - Determinação do Limite de Plasticidade*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNER (1994d) *DNER-ME 122/94: Solos - Determinação do Limite de Liquidez - método de referência e método expedito*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNER (1994e) *DNER-ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNER (1994f) *DNER-ME 93/94: Solos - Determinação da Densidade Real*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNER (1994g) *DNER-ME 256/94: Solos compactados com equipamento miniatura-determinação da perda de massa por imersão*.
- DNER (1996) *DNER-CLA 259: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura*. Rio de Janeiro.
- DNER (1997) *DNER-ME 054/97: Equivalente de areia*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNER (1998a) *DNER-ME 035/98: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNER (1998b) *DNER-ME 081/98: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNIT (2010a) *DNIT - 138/2010: Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Distrito

Federal.

- DNIT (2010b) *DNIT - 139/2010: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Distrito Federal.
- DNIT (2010c) *DNIT - 141/2010: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Distrito Federal.
- DNIT (2013) *DNIT-ME 164/2013: Solos - Compactação utilizando amostras não trabalhadas - Método de Ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Distrito Federal.
- DNIT (2016) *DNIT-ME 172/2016: Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas - Método de Ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Distrito Federal.
- DNIT (2020) *DNIT - ME 424/2020: Pavimentação - Agregado - Determinação do índice de forma com crivos - Método de ensaio*”. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Distrito Federal.
- DNPM. Portaria nº PORTARIA Nº 70.389, DE 17 DE MAIO DE 2017. *Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração*. Brasília, 2017.
- FERNANDES, G. (2005) *Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 250p.
- FRANCKLIN JUNIOR, I. (2009) *Estudo tecnológico em rejeitos de quartzitos do Sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo no concreto*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- GOMES, R. L. (2001) *Características Tecnológicas de Alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da Bacia do Paraná*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- GONÇALVES, F. P. (1999) *O desempenho dos pavimentos flexíveis*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. *Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração*. Brasília, 2016.
- KLAMT, R. A.; Fontoura, P. R.; Budny, J.; Santos, F. F. dos (2017) *Estudo da utilização da reciclagem de concreto asfáltico como camada de pavimento*. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 7, n. 3, p. 539-553. DOI: 10.5585/geas.v7i3.782.
- LUZ, M. P. (2008) *Aproveitamento de filer de pedreiras da região metropolitana de*

Goiânia em pavimentos flexíveis urbanos: avaliação técnica e sócioambiental. Tese Doutorado. Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

- MACHADO, W. G. F. (2007) *Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração.* Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MARQUES, L. D. O. (2006) *Pavimentação.* Universidade Federal de Juiz de Fora.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2015) *Mecânica dos Pavimentos.* Rio de Janeiro: Interciência, 3ª ed.
- MELO, L. (2016) *Caracterização de compostos de cimento Portland confeccionados com resíduos do processamento a úmido de rochas ornamentais de origens distintas.* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- PEIXOTO, R. A. F.; Bastos, L. A. C.; Barros, J. B.; Silva, S. N.; Oliveira, J. R. (2015) *Utilização de rejeito de barragens de minério de ferro como matéria prima para construção de infra-estrutura rodoviária.* INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Patente: Privilégio de Inovação. BR1020130312606.
- PEREIRA, E. L. (2005) *Estudo Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estatístico.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- PEREIRA, K. L. A. (2012) *Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal.
- PINTO, C. S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.* 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos.
- PIRES, P. R. (2007) *Caracterização Socioeconômica e Ambiental da Atividade do Tratamento de Quartzito na Região de Ouro Preto.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- RAMIRIO, R. F., Pamplona, D. R. P., FRANCKLIN JUNIOR, I., & COLLARES, E. G. (2008) *Estudo comparativo de rejeitos de quartzito com outros agregados comercialmente utilizados como materiais de construção no Sudoeste de Minas Gerais.* Ciência et Praxis, v. 1, n. 1.
- RODRIGUES, A. B. (2017) *Alternativa para Disposição de Rejeitos da Mineração.* Monografia de graduação. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- RUSSO, L. C. (2011) *Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração.* Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SANTOS, L. F. D. (2020) *Avaliação da Viabilidade Técnica do Reaproveitamento de Rejeitos da Mineração de Alumina para a Construção Civil.* Monografia de Graduação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- SANTOS, S. D.; Leandro, D. A. (2017) *Estudo da aplicação de asfalto fresado e resíduo de rocha ornamental como base e sub-base de pavimentos.* Monografia de Graduação. Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- SILVA, R. G. O. *Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.* Universidade Federal de Ouro Preto.

Ouro Preto, p. 205. 2017.

SOUZA, M. C. (2018) *Caracterização químico-mineralógica do quartzito friável proveniente da microrregião do planalto de Araxá*. Monografia de Graduação, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá.

SOUZA, T. D. (2019) *Comportamento mecânico de concretos asfálticos dosados com rejeitos finos de minério de ferro*. Dissertação Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

USP (2021) *Quartzito*. São Paulo: Instituto de Geociências.