

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**Estudo do uso da escória siderúrgica de alto
forno e estéril de mineração como alternativa
de revestimento primário em estradas não
pavimentadas**

Kellen Poliana Mendes de Medeiros

Belo Horizonte

2019

Kellen Poliana Mendes de Medeiros

**Estudo do uso da escória siderúrgica de alto
forno e estéril de mineração como alternativa
de revestimento primário em estradas não
pavimentadas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2019

M488e	<p>Medeiros, Kellen Poliana Mendes de.</p> <p>Estudo do uso da escória siderúrgica de alto forno e estéril de mineração como alternativa de revestimento primário em estradas não pavimentadas [recurso eletrônico] / Kellen Poliana Mendes de Medeiros. - 2019.</p> <p>1 recurso online (xiv, 80 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Gustavo Ferreira Simões.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 78-80.</p> <p>Bibliografia: f. 72-77.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Meio ambiente - Teses. 3. Altos-fornos - Teses. 4. Escória - Teses. 5. Estradas - Pavimentos - Teses. I. Simões, Gustavo Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
-------	--

Ficha catalográfica: Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos
Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL
Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br
<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Estudo do Uso de Escória de Alto Forno e Estéril de Mineração Como Alternativa de Revestimento Primário Em Estradas Não Pavimentadas

KELLEN POLIANA MENDES DE MEDEIROS

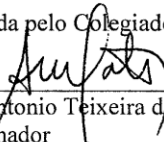
Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Prof. GUSTAVO FERREIRA SIMÕES

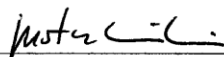

Profa LISÉTE CELINA LANGE


Profa JISELA APARECIDA SANTANNA GRECO

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH


Prof. Antonio Teixeira de Matos
Coordenador

Versão Final aprovada por


Prof. Gustavo Ferreira Simões
Orientador

Belo Horizonte, 25 de junho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Professor Gustavo, pela paciência e, principalmente, pelo apoio e ensinamentos.

À ArcelorMittal, em nome de seus representantes Aécio Januzzi e Luciana Magalhães, pela oportunidade de desenvolvimento do projeto e incentivo.

Aos meus pais, que sempre estiveram comigo, e aos familiares e amigos, em especial Emily, Carlito, Lucas e Edimar, pelo encorajamento e constância nesses últimos anos.

RESUMO

O Brasil é um país de grande concentração rodoviária de transporte de cargas e passageiros, sendo as rodovias responsáveis por cerca de 75% do escoamento da produção nacional.

No entanto, grande parte das rodovias brasileiras não possuem qualidade estrutural para tráfego satisfatória, resultando no aumento de gastos na manutenção de veículos, tempo de tráfego e incidência de acidentes.

Grande parte dos defeitos estruturais podem ser sanados com estradas devidamente pavimentadas ou revestidas. No entanto, métodos tradicionais de pavimentação e revestimento são onerosos, deixando de ser prioridade frente a outras necessidades dos estados e municípios.

Como alternativa de revestimento de baixo custo, foi realizado o estudo do reuso de resíduos industriais provenientes das atividades minerária e siderúrgica – estéril e escória, abundantes no Estado de Minas Gerais – como alternativa de insumos de baixo custo para o revestimento primário, com aplicação, prioritariamente, em vias de acesso que não possuem prioridade para os tipos já conhecidos de pavimentação.

O estudo embasou-se na norma brasileira DNIT nº 141/2010, que trata de pavimentação por base estabilizada granulometricamente, ou revestimento primário.

Os resultados, relacionados a indicadores qualitativos, e monitorados por observação qualitativa em campo de uma pista experimental construída, indicam melhoria do desempenho do revestimento estudado em relação a trechos não pavimentados, sujeitos às mesmas condições de tráfego e clima.

PALAVRAS-CHAVE: Escória de Alto Forno, Estéril de Mineração, Valorização de Resíduos, Pavimentação, Revestimento Primário

ABSTRACT

Brazil has a high concentration of passengers and freight transport in roads, which are responsible for about 75% of national industrial production outflow.

However, most Brazilian highways do not present structural quality for a satisfactory traffic, resulting in increasing expenses in vehicle maintenance, traffics spend time, and the incidence of accidents.

Most structural defects can be remediated with properly paved or coated roads. However, traditional methods of paving and coating are costly, no longer being a priority over other needs of states and counties.

As an alternative of low cost coating, it was studied the reuse of industrial waste from mining and steel industry – mining waste and steel slag – which are abundant in Minas Gerais state – as alternative low cost inputs for primary coating, with application, as a priority, on roads that do not have priority for usual types of paving.

The study was based on Brazilian Standard DNIT 141/2010, which deals with paving by granulometrically stabilized materials, or primary coating.

The results, related to qualitative indicators, and monitored by qualitative observation of a constructed experimental road, indicate improvement of the performance of the studied coating in relation to unpaved roads with the same traffic and climate conditions.

KEY WORDS: Blast Furnace Slag, Mining Waste, Waste Valorisation, Paving, Primary Coating

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE SIGLAS.....	XIII
LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS	XIV
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	7
2.1 OBJETIVO GERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3 REVISÃO DA LITERATURA	8
3.1 REVESTIMENTO PRIMÁRIO	10
3.1.1 <i>Ensaio laboratoriais</i>	11
3.1.2 <i>Determinação do tráfego de veículos</i>	13
3.1.3 <i>Aplicação do revestimento</i>	15
3.1.3.1 Execuao da base.....	15
3.1.3.2 Mistura dos materiais e espalhamento	15
3.1.3.3 Correo e homogeneização da umidade.....	16
3.1.3.4 Espessura da camada compactada	16
3.1.3.5 Compactação e Acabamento	16
3.2 DEFEITOS QUALITATIVOS EM ESTRADAS.....	17
3.2.1 <i>Seo Transversal Inadequada</i>	18
3.2.2 <i>Drenagem Lateral Inadequada</i>	19
3.2.3 <i>Corrugaces</i>	20
3.2.4 <i>Buracos</i>	21
3.2.5 <i>Poeira</i>	23
3.2.6 <i>Trilhas de Rodas</i>	25

3.2.7	<i>Segregação de Agregados</i>	26
4	MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1	AMOSTRAGEM DOS INSUMOS	30
4.1.1	<i>Coleta</i>	30
4.1.2	<i>Ensaio laboratoriais</i>	31
4.2	NÚMERO EQUIVALENTE DE OPERAÇÕES DO EIXO PADRÃO DE 8,2TF – N	32
4.2.1	<i>Tempo do projeto – TP</i>	33
4.2.2	<i>Tráfego Médio Diário Anual – TMDA</i>	33
4.2.3	<i>Veículo da Frota – FV</i>	33
4.2.4	<i>Fator Climático Regional – FR</i>	33
4.2.5	<i>Fator Direcional – FD</i>	33
4.3	CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL	34
4.4	AValiação do desempenho qualitativo da pista construída	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	DEFINIÇÃO DO REVESTIMENTO PRETENDIDO	40
5.1.1	<i>Cálculo do Número N</i>	40
5.1.2	<i>Ensaio laboratoriais</i>	41
5.2	APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO	45
5.2.1	<i>Determinação do teor de umidade</i>	45
5.2.2	<i>Determinação do grau de compactação</i>	45
5.3	AValiação do desempenho qualitativo das estradas	46
5.3.1	<i>Período chuvoso</i>	47
5.3.1.1	<i>Setembro de 2018</i>	47
5.3.1.2	<i>Maio de 2019</i>	54
5.3.2	<i>Período Seco</i>	64
5.4	VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO	69
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

APÊNDICE A.....	78
APÊNDICE B.....	79
APÊNDICE C.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.3.1 - Seção transversal típica de um pavimento.....	8
Figura 3.2 - Seção Transversal Inadequada, severidade baixa.....	18
Figura 3.3 - Seção Transversal Inadequada, severidade média.....	18
Figura 3.4 - Seção Transversal Inadequada, severidade alta.....	19
Figura 3.5 - Drenagem Lateral Inadequada, severidade baixa.....	19
Figura 3.6 - Drenagem Lateral Inadequada, severidade média.....	20
Figura 3.7 - Drenagem Lateral Inadequada, severidade alta.....	20
Figura 3.8 - Corrugações, severidade baixa.....	21
Figura 3.9 - Corrugações, severidade média.....	21
Figura 3.10 - Corrugações, severidade alta.....	21
Figura 3.11 - Buracos, severidade baixa.....	23
Figura 3.12 - Buracos, severidade média.....	23
Figura 3.13 - Buracos, severidade alta.....	23
Figura 3.14 - Poeira, severidade baixa.....	24
Figura 3.15 - Poeira, severidade média.....	24
Figura 3.16 - Poeira, severidade alta.....	25
Figura 3.17 - Trilhas de roda, severidade baixa.....	26
Figura 3.18 - Trilhas de roda, severidade média.....	26
Figura 3.19 - Trilhas de roda, severidade alta.....	26
Figura 3.20 - Segregação de Agregado, severidade baixa.....	27
Figura 3.21 - Segregação de Agregado, severidade média.....	27
Figura 3.22 - Segregação de Agregado, severidade alta.....	28
Figura 4.1 - Distância entre as indústrias em rota de acesso e linear: No ponto A, a mineradora, e em B a siderúrgica.....	30

Figura 4.2 - Imagem aérea da estrada experimental, na qual foi construída o revestimento. ...	34
Figura 4.3 - Perfil de elevação do trecho experimental.	34
Figura 4.4 - Máquina realizando o transporte dos insumos para o pátio definido como central de mistura, para posterior mistura e aplicação.	35
Figura 4.5 - Mistura finalizada, aplicada e compactada em 50% de seu volume inicial.	36
Figura 4.6 - Aplicação do revestimento finalizada e estrada liberada para o trânsito de veículos.	37
Figura 4.7 - Modelo de formulário utilizado para verificação em campo do desempenho qualitativo das pistas monitoradas.	38
Figura 5.1 - Composição granulométrica dos insumos e mistura de agregados pretendidos para o revestimento em estudo.	42
Figura 5.2 - Comparação entre os valores da composição granulométrica obtida para a mistura em adequação aos valores mínimos e máximo definidos para a faixa E.	43
Figura 5.3 – Comparação entre os valores da composição granulométrica obtida para a mistura em adequação aos valores mínimos e máximo definidos para a faixa F.	44
Figura 5.4 - Histórico pluviométrico fornecido pela empresa considerando a média histórica e o período de análise do revestimento proposto já construído na estrada experimental.	47
Figura 5.5 - Ausência do defeito qualitativo corrugações na pista experimental construída. ...	48
Figura 5.6 - Formação de camada de lama sobre as pistas não revestidas, impossibilitando a visualização da formação de corrugações.	49
Figura 5.7 - Visualização do revestimento construído, isento de buracos em sua extensão. ...	49
Figura 5.8 – Verificada a ocorrência de buracos ao longo das estradas não revestidas, caracterizados pela ação das chuvas em concomitância ao tráfego constante de veículos.	50
Figura 5.9 - Ocorrência de buracos com diâmetros superiores a 30 cm nas pistas não revestidas do empreendimento.	50
Figura 5.10 - Predominância do defeito qualitativo trilhas de rodas em um fragmento de estrada não revestida.	51

Figura 5.11 - O defeito qualitativo trilhas de rodas foi classificado como alto devido à sua alta frequência e à altura das trilhas formadas no solo.....	51
Figura 5.12 - Solo caracterizado por formação argilosa, dificultando a infiltração pluviométrica, propiciando a formação de trilhas.	52
Figura 5.13 – Acúmulo de escória nas laterais da pista experimental, sobretudo nas canaletas de escoamento pluvial, caracterizando segregação de agregados.....	52
Figura 5.14 - Visão geral da pista construída, sem maiores defeitos qualitativos que justifiquem a formação da segregação de agregados.....	53
Figura 5.15 - Formação do defeito qualitativo segregação de agregados de intensidade alta, sobretudo na parte central e acostamentos da pista.	54
Figura 5.16 - Incidência de agregados soltos nas áreas menos trafegáveis da pista, área central e acostamento.	54
Figura 5.17 - Interseção entre estrada experimental com o revestimento construído (à esquerda) e estrada não revestida (abaixo), após ocorrência de precipitação.	56
Figura 5.18 - Estrada experimental após 11 meses de utilização.	56
Figura 5.19 - Trecho de uma das pistas não revestidas com impossibilidade de verificação apurada do defeito estrutural corrugação devido à lama formada na superfície.	57
Figura 5.20 - Formação de corrugações de baixa intensidade, caracterizadas, sobretudo, pela baixa frequência e pequena profundidade.	57
Figura 5.21 - Evidência de dos defeitos estruturais qualitativos corrugações de média intensidade em estrada não revestida.....	58
Figura 5.22 - Não foi detectada a presença de buracos no revestimentos construído na pista experimental.	58
Figura 5.23 - A frequência aumentada concomitantemente à profundidade das cavidades classificaram o defeito qualitativo buraco em severidade alta.	59
Figura 5.24 - Ocorrência de cavidades acima de 7,5cm são classificadas como severidade alta: na imagem, cavidade com 20 cm de profundidade.	59

Figura 5.25 - Ocorrência do defeito estrutural buraco com diâmetro maior que 60cm, caracterizado como severidade alta.	60
Figura 5.26 - Ocorrência do defeito estrutural buraco com diâmetro maior que 60cm, caracterizado como severidade alta.	60
Figura 5.27 - Estrada não revestida com mais de 30% de sua superfície coberta por buracos.	60
Figura 5.28 - Estrada não revestida com formação de trilhas de rodas com alta severidade em toda a sua extensão.	61
Figura 5.29 - Evidência de trilha de roda de alta severidade, caracterizada por sua profundidade.	61
Figura 5.30 - Identificação de trilha de roda com profundidade 13cm, caracterizando o defeito estrutural como alta severidade.	61
Figura 5.31 - Marcas de rodas no revestimento construído, não caracterizadas como trilhas de rodas.	62
Figura 5.32 - Ocorrência da segregação de agregados de alta intensidade, sobretudo, nos canteiros e proporções centrais (menos transitadas) das estradas não revestidas.	63
Figura 5.33 - Ocorrência do defeito estrutural segregação de agregados em grande frequência no acostamento das estradas não revestidas.	63
Figura 5.34 - Ajuntamento de sedimentos nas canaletas de escoamento de água pluvial na via experimental, descartando a hipótese de segregação de agregados do revestimento construído.	64
Figura 5.35 - Defeito qualitativo poeira, classificado como média intensidade advinda do tráfego de veículos sobre o revestimento construído.	66
Figura 5.36 – Defeito qualitativo poeira, classificado como alta intensidade advinda do tráfego de veículos sobre estrada não revestida.	66
Figura 5.37 - Paralelamente, em A, revestimento primário construído a partir da mistura estéril e escória e, em B, trecho em solo natural.	67
Figura 5.38 - Trecho com revestimento primário construído exclusivamente com escória, 4 meses após a sua construção.	68

Figura 5.39 - Realização da limpeza de canaletas de escoamento de águas pluviais após período de chuvas: a manutenção garante maior longevidade do revestimento construído....68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Camadas típicas da pavimentação por especificação.....	9
Tabela 3.2 - Índice dos elementos do custo de operação segundo a natureza da superfície de rolamento em unidade de medida – base 100.....	10
Tabela 3.3 - Composição granulométrica satisfatória por faixa N.....	12
Tabela 3.4 - Fatores de equivalência de carga do USACE.....	14
Tabela 3.5 - Valores para FR segundo a pluviometria anual regional.	15
Tabela 3.6 - Classificação de severidade dos buracos com diâmetro menor que 100cm a partir da profundidade e diâmetro.	22
Tabela 4.1 - Classificação dos defeitos qualitativos mais comuns em estradas por intensidade.	39
Tabela 5.1 - Detalhamento do cálculo realizado para a obtenção do fator N, considerando as características prévias da estrada experimental.	41
Tabela 5.2 - Composição do agregado retido na peneira nº 10 da análise granulométrica.	42
Tabela 5.3 - Resultados das análises laboratoriais realizadas para a mistura 70% e 30% de escória e argila, respectivamente.	43
Tabela 5.4 - Determinação dos valores em % da umidade da mistura ao longo da estrada experimental.	45
Tabela 5.5 – Determinação do grau de compactação na estrada experimental.	46
Tabela 5.6 – Avaliação do desempenho qualitativo das estradas analisadas, realizado após ao início das precipitações do período, em Setembro de 2018.	48
Tabela 5.7 - Avaliação do desempenho qualitativo das estradas analisadas, realizado após ao início das precipitações do período, em Maio de 2019.	55
Tabela 5.8 - Avaliação do desempenho qualitativo das estradas analisadas, realizado durante o período seco, na segunda quinzena de maio de 2019.	65

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CNT – Confederação Nacional dos Transportes

DIEESE – Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

IAB – Instituto Aço Brasil

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

ISC – Índice de Suporte Califórnia

MG – Minas Gerais

NSA – *Nippon Slag Association*

PET - Polietileno Tereftalato

PRF – Polícia Rodoviária Federal

RSMS – *Road Surface Management System*

WSA – *World Steel Association*

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ρ_d – Massa específica aparente seca

FC – Fator carga

FD – Fator direcional

FE – Fator eixo

FR – Fator climático regional

FV – Fator veículo da frota

N – número de operações do eixo padrão de 8,2tf

N/A – Não avaliado

N/E – Não evidenciado

TMDA – Tráfego médio diário anual na rodovia

TP – Tempo do projeto

Wot – Umidade ótima

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, influenciado pelo seu território, é o país que tem a maior concentração rodoviária de transporte de cargas e passageiros entre as principais economias mundiais. As rodovias brasileiras são responsáveis pelo transporte de 61% das cargas e 95% dos passageiros do país (CNT, 2018).

A necessidade do transporte terrestre influi diretamente na malha rodoviária, utilizada para o escoamento de 75% da produção do país, de acordo com Resende *et al.* (2018). Segundo a Confederação Nacional do Transporte - CNT (2018), são estimados, no Brasil, 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km² de área, ou 12,3% da extensão rodoviária nacional.

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2017), em uma pesquisa realizada em 57.152,55km de rodovias federais analisadas, 67,5% foram consideradas com boa qualidade para o tráfego, enquanto 11,9% foram avaliadas com trafegabilidade ruim ou péssima.

Segundo a Polícia Rodoviária Federal - PRF (2018), em 2017 ocorreram 89.318 acidentes em rodovias federais que resultaram na morte de 6.244 pessoas e 83.978 feridos. Desses, pouco mais de 6% - um total de 5.653 acidentes - foram causados por problemas qualitativos advindos de defeitos estruturais de vias, resultando em 4.979 feridos e 244 mortos (PRF, 2018).

Além de acidentes, vias em más condições contribuem, também, para maior desgaste estrutural dos veículos considerando manutenção e vida útil dos pneus, maior gasto de combustíveis e lubrificantes (SENÇO, 2007) e, conseqüentemente, maiores impactos ambientais ligados à emissão de poluentes e uso de matéria prima advindos desses cenários.

Minas Gerais possui a maior malha rodoviária do Brasil, equivalente a 16% de toda a malha viária existente no país (Estado de Minas Gerais, 2018). Quanto às características das estradas, a malha federal é toda pavimentada, a estadual se divide em 13.995 km pavimentados e 9.724 km não pavimentados ou revestidas, e a maioria das rodovias municipais não é pavimentada ou revestida (Estado de Minas Gerais, 2018).

O motivo desse cenário pode ser presumido pelo alto valor da construção das pavimentações tradicionais que vão em desencontro com a economia e prioridade dos estados e municípios,

demandando a necessidade do estudo de novas técnicas que se utilizem de revestimentos de vias menos onerosos.

A reutilização de resíduos na construção de pavimentações com foco na diminuição nos custos do produto e impactos ambientais é amplamente estudada, com resultados, em sua maioria, satisfatórios. El-Naga *et al.* (2019) propôs a reutilização de resíduos de PET como aditivo aglutinante em misturas asfálticas para pavimentação. Os resultados dos testes indicaram que a adição deste modificador reduziu a penetração e aumentou o ponto de amolecimento do ligante asfáltico, aumentando a sua resistência. Os testes também indicaram o aumento da vida útil do pavimento em 2,81 vezes e economia de cerca de 20% da espessura da camada de asfalto. Leng *et al.* (2018) estudou a viabilidade da utilização de resíduos de PET e resíduos de borracha fragmentada a fim da melhoria do desempenho estrutural do asfalto convencional. Houve a conclusão de que a incorporação dos aditivos contribuiu para o aumento da viscosidade rotacional dos ligantes modificados, garantindo melhoras da estruturação do pavimento quanto à sua estabilidade e resistência.

De acordo com o World Bank (2012), a geração de resíduos sólidos no planeta possui uma perspectiva de geração por volta de $2,2 \times 10^9$ toneladas até 2025. Segundo a Fundação Estadual de Meio Ambiente - FEAM (2018), em 2018 as indústrias mineiras geraram mais de 49 milhões de toneladas de resíduos, estando a escória de alto forno e o estéril de mineração entre os mais gerados.

O Brasil é reconhecido internacionalmente pela sua diversidade geológica propícia à existência de vários minerais, com posições de destaque tanto em reservas quanto em produção mineral. De acordo com Tonietto e Silva (2011), as reservas de minérios medidas e indicadas no Brasil totalizam 28,9 bilhões de toneladas, sendo que, dessas, 67% estão localizadas no estado de Minas Gerais. No Estado, destaca-se a região do Quadrilátero Ferrífero, uma área geológica de aproximadamente 7.000 km², abundante em reservas minerais, que se estende entre as cidades de Ouro Preto e Belo Horizonte.

Além das arrecadações com vendas e impostos, a mineração pode ser considerada como um dos setores básicos mais importantes da economia, pois contribui de forma decisiva para a melhoria da qualidade de vida da população, uma vez que gera expressivos números de empregos direta e indiretamente. A indústria mineral empregou em 2016 cerca de 185 mil trabalhadores diretamente, segundo dados do Ministério do Trabalho. Segundo o

Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, o fator multiplicador para a indústria extrativa com a indústria de transformação mineral é de 1 para 3,6 postos de trabalhos, ou seja, ao final de 2016 este setor empregava diretamente 663 mil trabalhadores (Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, 2017).

Apesar de instigar positivamente a economia do país, as atividades minerárias também estão associadas a diversos impactos ambientais, como a geração de resíduos. O estéril é um resíduo da indústria minerária, formado a partir de agregados naturais sem valor econômico. Os estéreis são descartados em pilhas na condição natural dentro das próprias minerações. Apesar de não constituir risco ambiental quando disposto de forma ordenada e ambientalmente correta, há a necessidade da disponibilidade de grandes áreas para a sua acumulação, causando alterações significativas no relevo e paisagem locais. Quando sem controle, o estéril é susceptível a erosões, podendo ser carregado pela ação de chuvas e ventos, contaminando e assoreando corpos hídricos.

Visando a diminuição dos impactos ambientais gerados pela atividade minerária, diversas pesquisas envolvendo a reutilização dos resíduos do processo são realizadas, especialmente ao que tange a sua aplicação como substituto de agregados naturais e sintéticos em obras estruturais.

Santana Filho *et al.* (2017) avaliou a viabilidade técnica e ambiental do uso de rejeitos de minério de ferro como agregado na produção de blocos de concreto intertravados. Caracterizações químicas e físicas dos rejeitos foram realizadas substituindo o agregado natural em proporções de 10 a 80% em protótipos fabricados. Os pavimentos construídos apresentaram propriedades físicas e mecânicas significativamente similares, ou superiores, às convencionais para tráfego regular.

Bastos *et al.* (2016) avaliou a viabilidade do rejeito de minério de ferro de barragens de rejeito como material alternativo para a infraestrutura rodoviária. Os rejeitos de minério de ferro foram caracterizados de acordo com suas propriedades químicas, mineralógicas, ambientais e físicas, e quimicamente estabilizados usando cimento, cal ou escória de fabricação de aço como aglutinante. No geral, os resultados indicaram que os rejeitos de minério de ferro são uma solução viável para uso em camadas na pavimentação de estradas, no entanto, a amostra de rejeito não suportou os ciclos de durabilidade, necessitando, assim, de mais pesquisas para garantia de sua viabilidade técnica como solução duradoura.

A indústria siderúrgica, assim como a minerária, é um dos principais pilares da economia brasileira. De acordo com o Instituto Aço Brasil - IAB (2017), em 2016 a indústria siderúrgica foi responsável pela produção de 31,3 milhões de toneladas de aço bruto e 30,2 milhões de toneladas de produtos siderúrgicos, com um saldo comercial de US\$ 3,9 bilhões.

O setor siderúrgico é um ponto forte da economia mineira (ANDRADE; CUNHA, 2003). Em Minas Gerais se encontram cerca de 17% do total de trabalhadores que atuam no setor em todo país (DIEESE,2002), justificando a importância do setor na geração de empregos no estado.

Em Minas Gerais, as indústrias siderúrgicas possuem predominância na faixa do Quadrilátero Ferrífero, estrategicamente próximas às minerações, que provêm o principal insumo para a produção do aço: o minério de ferro.

O principal resíduo da siderurgia é a escória, que possui a função de agregar as impurezas do processo, separando-as dos metais (BALTAZAR,1995).

Na produção do aço são gerados por volta de 450 Kg a 500 Kg de resíduos por tonelada de aço bruto produzido (COSTA, 2017). Deste total, as escórias representam mais de 70% (COSTA, 2017).

Anualmente, a produção brasileira de escória de siderurgia supera os 3 milhões de toneladas, além do estoque que vem sendo acumulado ao longo do tempo (Prado et al., 2001), sendo a produção de escória de alto forno entre 260 Kg e 300 Kg para cada tonelada de ferro-gusa (NSA, 2009; Peacey e Davenport, 1979; WSA, 2010; CROSSIM, 2015) e a de escória de aciaria entre 100 Kg e 150 Kg para cada tonelada de aço produzida (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2008).

Um dos maiores desafios atuais na prevenção da poluição consiste na busca de soluções adequadas à excessiva geração de resíduos (COSTA; MASSARAD; AGARWAL, 2010; PEREIRA; CURI, 2013; EFING; PAIVA, 2016; VENZON et al., 2018) ou métodos para seu reaproveitamento. A preocupação mundial frente a esta situação é crescente visto o aumento da produção de resíduos concomitante ao seu gerenciamento inadequado e a falta de áreas para disposição final destes (JACOBI; BESEN, 2011; LANER et al., 2012; VENZON et al., 2018).

O reaproveitamento de resíduos permite a redução da extração de matérias primas naturais, preservando os recursos naturais e zelando pela qualidade ambiental (COSTA, 2017). Além disso, inovações sustentáveis são susceptíveis à exploração de novos mercados e notoriedade competitiva, tornando um diferencial de negócio entre empresas (BARBIERI et al., 2010; SEEBODE; JEANRENAUD; BESSANT, 2012; GAVRONSKI et al., 2012; NIDUMOLU; PRAHALAD; RANGASWAMI, 2013; VENZON et al., 2018).

A escória de aciaria é um coproduto da produção de aço gerada a partir do aquecimento do ferro em fornos de oxigênio de base, ou na refusão da sucata de aço em fornos elétricos a arco (CROSSIM, 2015). Embora a escória de aciaria exiba propriedades cimentícias, é amplamente utilizada na substituição de agregados em concretos (SHI, 2004). Alternativamente, escória de aciaria pode ser usada na produção de cimento (TSAKIRIDIS et al., 2008).

A escória de alto forno é produzida como um coproduto do ferro gusa em alto fornos. Ela é formada por reações de combustão que separam o ferro-gusa de resíduos e impurezas da produção (CHENG E CHIU, 2003). Por sua baixa expansibilidade, a escória de alto forno é constantemente estudada na composição de pisos e pavimentos.

O estudo e a reutilização da escória de alto forno em processos já são bastante difundidos mundialmente. De acordo com Hooton (1987), a produção de cimentos com escórias granuladas já era desenvolvida em 1863 na Europa.

A utilização do resíduo para pavimentação é consagrada e tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores em todo o mundo. ElNouhy (2013) estudou o efeito e a possibilidade do uso de um cimento a partir de escória na produção de unidades de pavimentação interligadas, viabilizando sua utilização para a fabricação de blocos.

Passeto (2010) analisou a utilização da escória como substituto de agregados naturais na composição de base e concreto de asfalto para pavimentos flexíveis na Itália, tendo observado que todos os testes apresentaram melhores características mecânicas do que as dos asfaltos correspondentes com agregado natural e satisfizeram os requisitos de aceitação nas normas técnicas do setor rodoviário italiano, apresentando-se adequado para uso na construção de estradas.

Além do uso estrutural na pavimentação, as propriedades da escória também são estudadas como alternativa de estabilização de solos pobres, técnica que pode melhorar as propriedades de engenharia para a construção de estradas.

Diniz *et al.* (2017) propôs a utilização do resíduo siderúrgico em substituição aos estabilizantes químicos, cimento e cal, comumente empregados. Os resultados indicaram que os solos estabilizados com escória possuem a mesma classificação ambiental dos solos estabilizados com cimento e cal. Os finos de escória estabilizaram com sucesso o solo estudado, levando a um aumento nos valores do Índice Suporte Califórnia - ISC - de até 230%, juntamente à diminuição na expansibilidade.

Como forma de utilização dos resíduos gerados nas indústrias minerária e siderúrgica a fim da otimização qualitativa de estradas não pavimentadas a baixo custo, serão empregados nessa pesquisa o uso do estéril e escória de alto forno na construção de um revestimento primário.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

Estudar a aplicação dos resíduos das indústrias minerária e siderúrgica, estéril e escória, como alternativa de insumos para o revestimento de estradas, com foco no revestimento primário, como proposta de melhoria do desempenho qualitativo de vias sem pavimentação.

2.2 *Objetivos específicos*

- Analisar, a partir de testes de bancada em laboratório, as propriedades físicas e mecânicas dos resíduos estéril e escória, e sua mistura, considerando a norma brasileira DNIT nº 141/2010, que trata de revestimentos primários;
- Mapear as anomalias estruturais mais comuns que interferem no desempenho qualitativo de vias não pavimentadas ou revestidas;
- A partir da implantação de um trecho experimental, monitorar e analisar qualitativamente o desempenho estrutural do pavimento proposto em comparação a vias não pavimentadas de mesmo fluxo de tráfego.

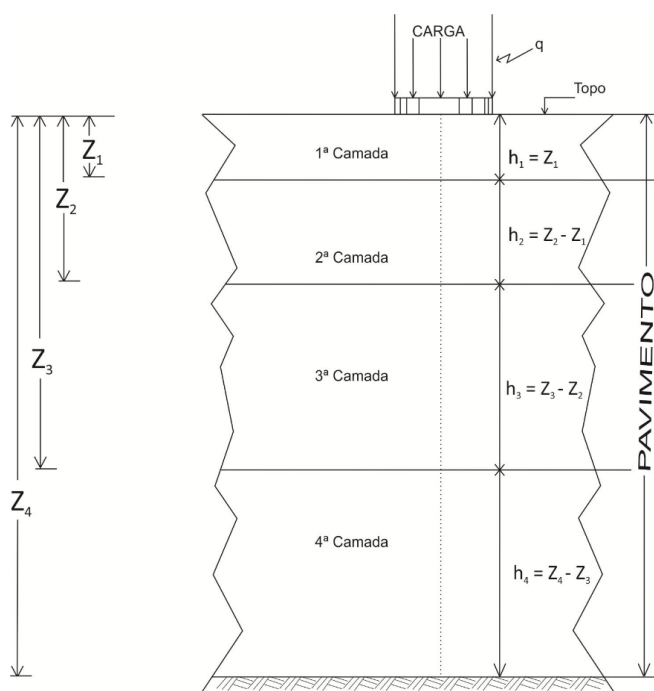
3 REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Senço (2007), pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada, técnica e economicamente, a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança, e resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

A pavimentação, tradicionalmente, é um sistema de camadas de espessuras finitas que se assenta sobre um semi-espaço infinito e exerce a função de fundação da estrutura, chamado subleito (SENÇO,2007).

Uma seção transversal típica de um pavimento – com todas as camadas possíveis – consta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por inúmeros métodos de dimensionamento (SENÇO,2007), sendo elas o reforço de subleito, sub-base, base e revestimento (Figura 3.1).

Figura 3.3.1 - Seção transversal típica de um pavimento.
Fonte: SENÇO (2007).



Cada uma das camadas exerce papel específico na pavimentação, podendo ser necessárias ou não (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Camadas típicas da pavimentação por especificação.

Camada	Denominação	Especificação
4 ^a	Reforço do Subleito	Tem a função de melhorar a qualidade do subleito, e regularizar a espessura da sub-base. É uma camada de espessura constante transversalmente e de variável longitudinalmente, de acordo com o dimensionamento do pavimento. Deve ser executada sobre o subleito regularizado.
3 ^a	Sub-base	Complementar, essa camada geralmente é utilizada para regularizar a espessura da base. Deve ser construída quando não for aconselhável a execução da base diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço, por circunstâncias técnicas e/ou econômicas.
2 ^a	Base	Camada que resiste e distribui os esforços oriundos do tráfego ao subleito.
1 ^a	Revestimento	É camada que suporta diretamente a ação do rolamento dos veículos. Deve ser o tanto quanto possível impermeável, e servir para melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e segurança e resistente ao desgaste. Também pode ser chamada de capa ou camada de desgaste.

Segundo Senço (1997), os pavimentos são classificados em rígidos e flexíveis. Pavimentos flexíveis são compostos por camada superficial, no caso o revestimento, apoiada sobre as demais camadas tradicionais de um pavimento: base, sub-base, reforço do subleito, quando necessário. Essas camadas são constituídas por matérias granulares, solos e misturas.

Pavimentos rígidos são compostos por uma camada superficial rígida, geralmente em placas, podendo haver armação ou não. O revestimento é apoiado diretamente em solo, em uma camada granular ou, em certos casos, sobre um material estabilizado com cimento, no caso a sub-base (HILÁRIO, 2016).

O revestimento é a camada da pavimentação destinada a resistir ao desgaste imposto pela ação do tráfego, devendo a sua execução ser precedida de detalhados ensaios de dosagem e

acompanhada por rigorosos ensaios de controle (SENÇO, 2007). A capacidade de suporte das vias depende das características do material da superfície e da resistência do solo, à medida que a umidade varia (ODA, 1995). O tipo e qualidade do material aplicados na superfície influenciam no desempenho das estradas e relacionam-se aos defeitos que se agravam à medida em que a estrada é trafegada.

Vias com defeitos estruturais interferem no desempenho dos veículos em fatores que causam maior consumo de combustível e lubrificantes, maior necessidade de manutenção e amortização e diminuição da vida útil dos pneus (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Índice dos elementos do custo de operação segundo a natureza da superfície de rolamento em unidade de medida – base 100.

Fonte: SENÇO, 2007.

1. Automóveis e veículos de duas rodas	Combustível	Lubrificantes	Manutenções	Pneus
Pavimento/revestimento muito bom	Base 100	Base 100	Base 100	Base 100
Pista não-revestida regular	115	125	130	200
Pavimento/revestimento em mau estado, ou caminho de terra	130	150	180	350
2. Caminhões	Combustível	Lubrificantes	Lubrificantes	Pneus
Pavimento/ revestimento muito bom	100	100	100	100
Pista não-revestida regular	130	140	150	200
Pavimento/revestimento em mau estado, ou caminho de terra	170	200	250	450

3.1 Revestimento primário

O revestimento primário constitui-se de uma camada de material disposta diretamente sobre o subleito regularizado. Essa camada é obtida pela compactação de uma mistura de material argiloso e material granular (ODA, 1995), como proposta de melhora no desempenho

qualitativo de estradas a baixo custo, uma vez que não se utiliza de técnicas robustas de construção e verificação.

Na mistura, o objetivo da adição de argila no material granular é o de atuar como ligante e regularizar a superfície final de rolamento, enquanto o objetivo do uso do material granular é aumentar o atrito da pista com as rodas dos veículos (ODA, 1995). Nesse trabalho, foram utilizados estéril de mineração e escória de alto forno como insumos argiloso e granular, respectivamente, para o estudo de aplicação como revestimento primário.

A lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001 dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre a partir da criação, entre outros, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – o DNIT.

Em seu texto, capítulo VII, Seção I, são dados os objetivos e atribuições do departamento.

Art. 82. São atribuições do DNIT, em sua esfera de atuação:

I - estabelecer padrões, normas e especificações técnicas para os programas de segurança operacional, sinalização, manutenção ou conservação, restauração ou reposição de vias, terminais e instalações;

II - estabelecer padrões, normas e especificações técnicas para a elaboração de projetos e execução de obras viárias;

[...]

Dessa forma, cabe ao departamento, em âmbito federal, o estabelecimento de padrões e normas técnicas a serem seguidos como base para projetos e execuções de pavimentações no Brasil.

A norma DNIT nº 141 de 17 de novembro de 2010 trata da definição da sistemática a ser empregada na execução da camada de base do pavimento utilizando solo estabilizado granulometricamente, ou revestimento primário. A norma também apresenta os requisitos concernentes à execução e plano de amostragem e de ensaios utilizados como base nesse estudo.

3.1.1 Ensaios laboratoriais

Segundo GEIPOT (1981), estradas revestidas com argila são menos susceptíveis ao aumento de irregularidades ao longo dos anos, e isso se deve à capacidade de aglutinação da argila, que a torna um bom insumo para o revestimento de estradas. Segundo Oda (1995), o agregado

ideal para revestimento primário deve possuir proporções em volume em torno de 1 de argila para 2,5 de material granular.

Para a mistura, segundo a norma DNIT 141/2010, devem ser realizados ensaios de compactação (massa específica aparentemente seca e umidade ótima) (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2016d), expansão (ABNT, 2016d), índice de suporte Califórnia – ISC (ABNT, 2016e), limite de liquidez (ABNT, 2016b) e limite de plasticidade (ABNT, 2016c), a fim da garantia da qualidade estrutural do revestimento proposto.

Ainda, segundo a norma, a mistura deve possuir composição granulométrica satisfatória a uma das faixas da Tabela 3.3, de acordo com o número N de tráfego calculado.

Tabela 3.3 - Composição granulométrica satisfatória por faixa N.

Fonte: norma DNIT nº 141/2010-

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerâncias de faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

A fração passante na peneira nº 40 deve apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%. Quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deve ser maior que 30%. A porcentagem do material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40. O valor do Índice suporte Califórnia para a mistura deve ser maior ou igual para a 60% para

$N < 5 \times 10^6$ e maior ou igual a 80% para Número $N > 5 \times 10^6$. A expansão deve apresentar valor máximo de 0,5% (DNIT, 2010).

3.1.2 Determinação do tráfego de veículos

Segundo a norma DNIT nº 141/2010, para a correta interpretação dos dados laboratoriais, é imprescindível que seja determinado o tráfego de veículos, a fim de se obter melhor desempenho e durabilidade do revestimento primário.

Para tal, a norma recomenda que sejam feitos os cálculos pelo método *U.S. Army Corps of Engineers*, ou USACE, conforme proposto em 1962 por Turnbull, Foster & Ahlvin (MEDINA, 1997), conforme equação 3.1.

$$N = TP \times TMDA \times FV \times FR \times FD$$

(3.1)

Em que: N = número de operações do eixo padrão de 8,2tf;

- TP = Tempo do projeto (em dias);
- TMDA = Tráfego Médio Diário Anual na rodovia;
- FV = fator veículo da frota (valor tabelado);
- FR = fator climático regional (valor tabelado);
- FD = Fator Direcional (igual a 0,5 para pistas simples) (SOUZA, 1981).

O FV é calculado a partir da pesagem de eixos simples e tandem, por categoria de veículo e sua frequência de rodagem. Por meio de um fator, deve ser calculada a equivalência em relação ao eixo padrão de 8,2 tf (Tabela 3.4), determinando assim, o fator carga.

Tabela 3.4 - Fatores de equivalência de carga do USACE.

Tipos de Eixo	Faixas de Carga (t)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 - 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem Duplo	0 - 11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem Triplo	0 - 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

P = peso bruto total sobre o eixo.

Multiplicando-se o Fator Eixo (FE) pelo Fator Carga (FC), obtém-se o Fator de Veículo (equação 3.2).

$$FV = FE \times FC$$

(3.2)

Em que:

- FE = coeficiente que corresponde ao número de eixos (conjuntos) do veículo;
- FC = coeficiente que, multiplicado pelo número de eixos que circulam, resulta no número equivalente de eixos padrão (TURNBULL et al., 1962).

Os valores de FV também são disponibilizados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER (1996) para os métodos USACE e AASHTO, considerando veículos vazios (APÊNDICE A), veículos com transporte de carga legal (APÊNDICE B) e veículos com transporte de carga máxima - com tolerância (APÊNDICE C).

O FR é calculado a partir das características climáticas pluviométricas anuais da região de estudo. Segundo Betega (2013), os valores podem ser definidos segundo a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Valores para FR segundo a pluviometria anual regional.

Índice pluviométrico anual (mm)	Valor FR
Até 800	0,7
Entre 800 e 1500	1,4
Acima de 1500	1,8

Segundo o DNIT (2006), tem-se adotado o FR igual a 1 no país, face aos resultados do fator calculado a partir de pesquisas desenvolvidas.

O fator direcional determina a direção da pista, aplicando-lhe variáveis quanto ao número de vias e sentido. Segundo Souza (1981), deve-se adotar 50% para o caso de pistas simples, e 100% para as demais pistas.

3.1.3 Aplicação do revestimento

3.1.3.1 Execução da base

Segundo o DNIT (2010), a execução da base compreende as operações de mistura e pulverização, umedecimento ou secagem dos materiais, em central de mistura ou na pista, seguidas de espalhamento, compactação e acabamento, realizadas na pista devidamente preparada, na largura desejada, nas quantidades que permitam, após a compactação, atingir a espessura projetada.

3.1.3.2 Mistura dos materiais e espalhamento

De acordo com a norma DNIT nº 141/2010, a mistura dos materiais pode ocorrer previamente – mistura prévia – nas chamadas “centrais de mistura” para posterior carregamento ao local de aplicação, ou diretamente na pista – mistura na pista – quando na mesma for utilizado material da pista existente, ou quando as quantidades a serem executadas não justificarem a instalação de central de mistura.

Após a mistura prévia, o material deve ser transportado e depositado sobre a pista, em pilhas adequadamente espaçadas e deve ser realizado o seu espalhamento (DNIT, 2010).

3.1.3.3 Correção e homogeneização da umidade

Segundo o DNIT (2010), a variação do teor de umidade admitida para o material para início da compactação é de menos 2 pontos percentuais até mais 1 ponto percentual em relação à umidade ótima de compactação. Caso o teor de umidade apresente valor abaixo do limite mínimo especificado, deve ser umedecida a camada, preferencialmente, por meio de caminhão-tanque irrigador. Se o teor de umidade de campo exceder ao limite superior especificado em laboratório, o material deve ser aerado para que o material atinja o intervalo da umidade especificada.

Concluída a correção e homogeneização da umidade, o material deve ser conformado, para obtenção da espessura desejada após a compactação (DNIT, 2010).

3.1.3.4 Espessura da camada compactada

Segundo o DNIT (2010), a espessura da camada compactada não deve ser inferior a 10 cm, nem superior a 20 cm. Quando houver necessidade de se executar camadas de base com espessura final superior a 20 cm, estas devem ser subdivididas em camadas parciais. A espessura mínima de qualquer camada de base deve ser de 10 cm, após a compactação. Para a definição da porcentagem de compactação, deverá ser considerada a amostragem realizada de massa específica aparente seca máxima.

3.1.3.5 Compactação e Acabamento

Segundo o DNIT (2010), os cálculos do grau de compactação devem ser realizados utilizando-se os valores da massa específica aparente seca máxima obtida no laboratório e da massa específica aparente seca “in situ”, obtida na pista. Não devem ser aceitos valores de grau de compactação inferiores a 100%.

A compactação deve evoluir longitudinalmente, iniciando pelas bordas. Nos trechos em tangente, a compactação deve prosseguir das duas bordas para o centro, em percursos equidistantes da linha base, o eixo. Os percursos ou passadas do equipamento utilizado devem distar entre si de forma tal que, em cada percurso, seja coberta metade da faixa coberta no percurso anterior (DNIT, 2010). Nos trechos em curva, havendo superelevação, a compactação deve progredir da borda mais baixa para a mais alta, com percursos análogos aos descritos para os trechos em tangente (DNIT, 2010).

Nas partes adjacentes ao início e ao fim da base em construção, a compactação deve ser executada transversalmente à linha base, o eixo. Nas partes inacessíveis aos rolos compactadores, assim como nas partes em que seu uso não for recomendável, tais como cabeceira de pontes e viadutos, a compactação deve ser executada com rolos vibratórios portáteis ou sapos mecânicos (DNIT, 2010).

Durante a compactação, se necessário, pode ser promovido o umedecimento da superfície da camada, mediante emprego de carro-tanque distribuidor de água. Esta operação é exigida sempre que o teor de umidade estiver abaixo do limite inferior do intervalo de umidade admitido para a compactação (DNIT, 2010).

3.2 Defeitos qualitativos em estradas

Entende-se por defeito qualquer alteração na superfície da estrada que influencie negativamente as suas condições de rolamento (ODA, 1995). Os defeitos podem aparecer devido a uma confluência de fatores, como tráfego, chuvas e manutenções mal programadas, ou a falta delas – agentes externos que exercem esforços dinâmicos consideráveis às vias, principalmente vias sem pavimentação ou revestimento.

Os defeitos estruturais de vias também podem ser ocasionados por fatores intrínsecos, como perfis longitudinais e transversais de estradas, drenagem, tipo de solo, entre outros. É necessário que sejam conhecidos os defeitos estruturais de uma estrada antes do início de um projeto de pavimentação ou revestimento, a fim de sua recuperação.

Segundo o RSMS (1991) e Oda (1995), os defeitos seção transversal e/ou drenagem lateral inadequadas surgem em função de características da estrada ainda sem pavimentação ou revestimentos, como o tipo de solo (capacidade de suporte) e o relevo. No entanto, esses defeitos, a partir do tráfego, são os causadores de outros tipos de danos qualitativos nas estradas, como a formação de corrugações, poeira, buracos (ou panelas), trilhas de rodas e segregação de agregados, que podem ser definidos em vários níveis de severidade. Esses fatores influenciam diretamente na qualidade da estrada, e, conseqüentemente, no conforto e segurança dos usuários e nos gastos de manutenção com os veículos.

3.2.1 Seção Transversal Inadequada

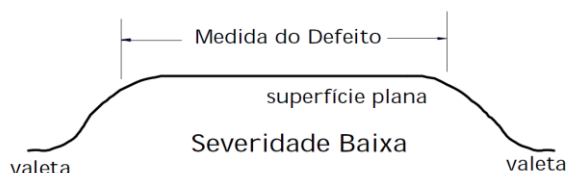
A seção transversal inadequada é o resultado de uma superfície sem declividade transversal para direcionar a água para as valetas laterais de drenagem, evidenciada pela água escoando ao longo da superfície de rolamento e, conseqüentemente, a erosão causada pela intensidade da chuva (ODA, 1995).

Eaton et al. (1987), RSMS (1991) e Oda (1995), classificam a qualidade da estrada a partir dos níveis de severidade e extensão do defeito, sendo os níveis de severidade da seção transversal inadequada divididos em:

- Baixa: quando a superfície é completamente plana (Figura 3.2);

Figura 3.2 - Seção Transversal Inadequada, severidade baixa.

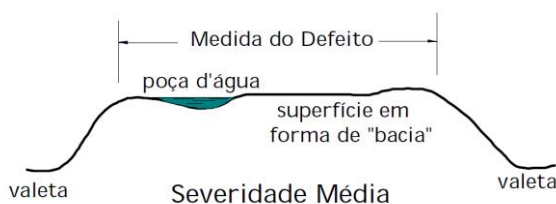
Fonte: ODA (1995).



- Média: superfície em forma de "bacia" (Figura 3.3);

Figura 3.3 - Seção Transversal Inadequada, severidade média.

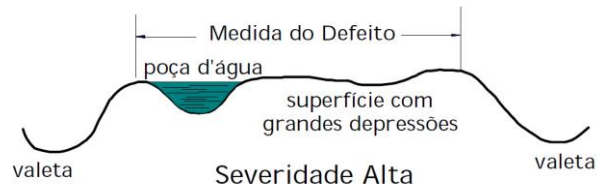
Fonte: ODA (1995).



- Alta: grandes depressões nas trilhas das rodas na superfície da estrada (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Seção Transversal Inadequada, severidade alta.

Fonte: ODA (1995).



3.2.2 Drenagem Lateral Inadequada

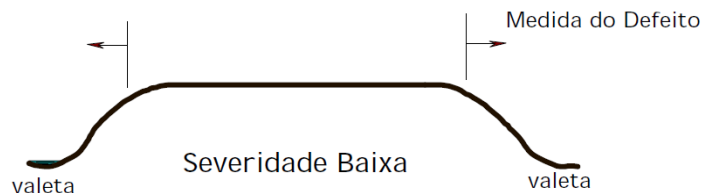
A drenagem lateral inadequada é verificada por valetas obstruídas, seja por vegetação, sedimentos ou entulhos, não condicionadas ao direcionamento e transporte hídrico, provocando o empoçamento da água.

Eaton et al. (1987), RSMS (1991) e Oda (1995) definem os níveis de severidade da drenagem lateral inadequada em:

- Baixa: pequena quantidade de água empoçada nas valetas, estando as valetas sem vegetação, sedimentos ou entulhos (Figura 3.5);

Figura 3.5 - Drenagem Lateral Inadequada, severidade baixa.

Fonte: ODA (1995).



- Média: quantidade moderada de água empoçada na valeta e/ou valetas com pequena quantidade de vegetação e entulhos, e evidência de erosão das valetas do lado de dentro da estrada (Figura 3.6);

Figura 3.6 - Drenagem Lateral Inadequada, severidade média.

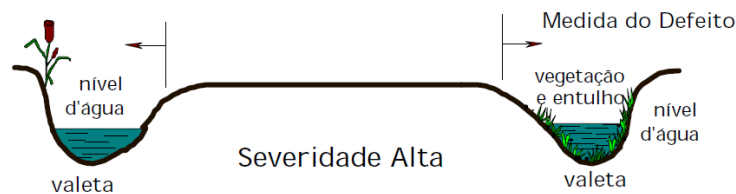
Fonte: ODA (1995).



- Alta: grande quantidade de água nas valetas e/ou valetas cobertas de vegetação e entulho, e erosão das valetas do lado de dentro da estrada (Figura 3.7).

Figura 3.7 - Drenagem Lateral Inadequada, severidade alta.

Fonte: ODA (1995).



3.2.3 Corrugações

As corrugações constituem um tipo particular de irregularidade em estradas. Segundo Aguiar (1963), as corrugações podem ser definidas como espécies de ondas no sentido transversal, com distâncias entre si que variam entre 0,60m e 1,10m, e resultam do movimento vibratório transmitido pelo tráfego de veículos em uma estrada, além de forças de tração, frenagem etc.

Segundo Paige-Green e Nettrberg (1987), estradas com elevada concentração de pedras são ainda mais propensas à formação de corrugações, devido ao movimento oscilatório dos veículos sobre as pedras.

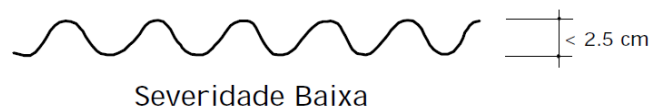
Segundo Riverson et al. (1987) e Oda (1995), as corrugações ocorrem, na maioria dos casos, em intervalos regulares de 40cm de distância e profundidade de 1,5cm em estradas de material fino sem compactação e com falta de material ligante, e em intervalos de, aproximadamente, 120cm e profundidade de 3,5cm em estradas de material mais granular, sem compactação e com falta de material ligante.

Eaton et al. (1987), RSMS (1991) e Oda (1995), definem as corrugações como uma série de sulcos regularmente espaçados ou ondulações que ocorrem em intervalos bastante regulares, perpendiculares à direção do tráfego, e definem a sua severidade da seguinte maneira:

- Baixa: corrugações com profundidade menor que 2,5cm ou menos que 10% da área total da superfície da estrada coberta por corrugações (Figura 3.8);

Figura 3.8 - Corrugações, severidade baixa.

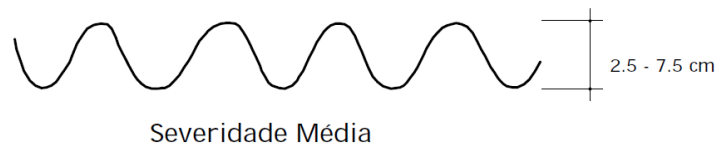
Fonte: ODA (1995).



- Média: corrugações com profundidade entre 2,5cm a 7,5 cm ou entre 10% e 30% da área total da superfície da estrada por corrugações (Figura 3.9);

Figura 3.9 - Corrugações, severidade média.

Fonte: ODA (1995).



- Alta: corrugações mais profundas que 7,5cm ou mais que 30% da área total da superfície da estrada coberta por corrugações (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Corrugações, severidade alta.

Fonte: ODA (1995).



3.2.4 Buracos

Segundo Santos et al. (1985), os buracos surgem pela contínua expulsão de partículas sólidas de um leito devido ao tráfego de veículos em locais de empocamento de água. Dessa forma,

os buracos podem ser definidos como um defeito estrutural de via consequente de má drenagem.

Segundo Eaton et. al (1987), RSMS (1991) e Oda (1995), os buracos em vias podem ser definidos como pequenas depressões em forma de bacias produzidos pelo desgaste de pequena parte na superfície de estradas, geralmente menores que 100cm de diâmetro, acelerados pela umidade dentro da bacia.

Os níveis de buracos com diâmetro menor que 100cm são baseados no diâmetro e profundidade, conforme Tabela 3.6 (ODA, 1995).

Tabela 3.6 - Classificação de severidade dos buracos com diâmetro menor que 100cm a partir da profundidade e diâmetro.

Fonte: ODA (1995).

Profundidade Máxima	Diâmetro Médio			
	<30cm	30 – 60 cm	60 – 100 cm	>100cm
1,25 – 5cm	Baixa	Baixa	Média	Média
5 – 10cm	Baixa	Média	Alta	Alta
>10cm	Média	Alta	Alta	Alta

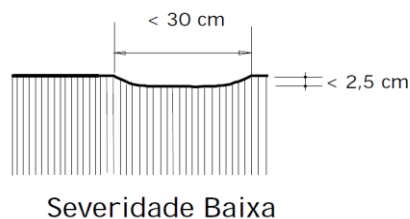
Horta (1991) ressalta que os buracos são resultantes, principalmente, da remoção de partículas sólidas do solo, no entanto, não comuns a estradas com solos finos ou argilosos, mas em estradas cascalhosas e de pedras compactadas.

RSMS (1991) e Oda (1995) classificam a qualidade das estradas de acordo com os níveis de severidade e extensão dos buracos, sendo a classificação:

- Baixa: buracos com profundidade menor que 2,5cm e/ou diâmetro menor que 30cm e menos que 10% da área total da superfície da estrada coberta por buracos e/ou menos que 5 buracos por seção (Figura 3.11);

Figura 3.11 - Buracos, severidade baixa.

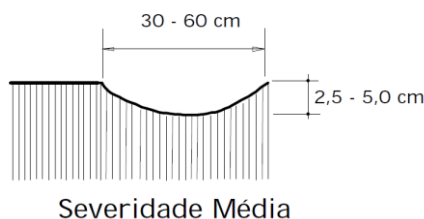
Fonte: ODA (1995).



- Média: buracos com profundidade entre 2,5cm e 5,0cm e/ou diâmetro entre 30 e 60 cm e entre 10% e 30% da área total da superfície da estrada coberta por buracos e/ou menos que 5 a 10 buracos por seção (Figura 3.12);

Figura 3.12 - Buracos, severidade média.

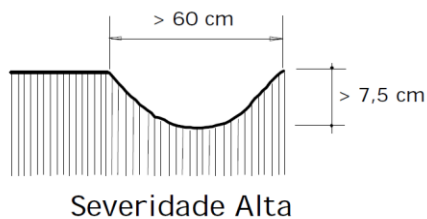
Fonte: ODA (1995).



- Alta: buracos com profundidade maior que 7,5cm e/ou diâmetro maior que 60cm e mais que 30% da área total da superfície da estrada coberta por buracos e/ou mais que 10 buracos por seção (Figura 3.13).

Figura 3.13 - Buracos, severidade alta.

Fonte: ODA (1995).



3.2.5 Poeira

O tráfego de veículos em estradas não pavimentadas ou revestidas, a partir de uma ação abrasiva dos pneus, faz com que partículas do solo se soltem da superfície formando nuvens de poeira. A poeira formada, além de causar problemas ambientais devido à emissão de

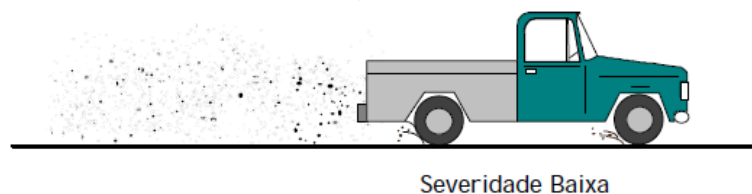
particulados na atmosfera, também são prejudiciais à saúde humana, e à segurança dos veículos, devido à diminuição de visibilidade dos condutores.

Segundo Eaton et al. (1987) e Oda (1995), a quantidade de pó é determinada pelo tamanho da nuvem de poeira causada por um veículo trafegando a 40Km/h e pela redução da visibilidade, sendo estimada como densa, suavemente densa e muito densa. Eaton et al (1987), RSMS (1991) e Oda (1995) classificam a qualidade da estrada de acordo com os seguintes níveis de severidade de formação de poeira:

- Baixa: nuvem pouco densa que não obstrui a visibilidade (Figura 3.14);

Figura 3.14 - Poeira, severidade baixa.

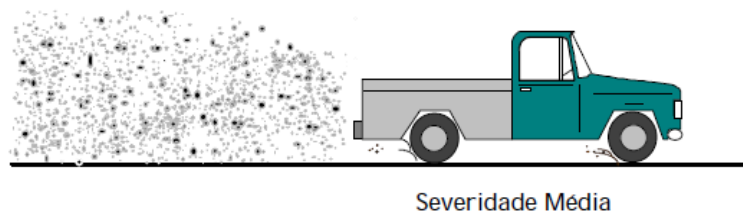
Fonte: ODA (1995).



- Média: nuvem densa que parcialmente obstrui a visibilidade e causa tráfego lento (Figura 3.15);

Figura 3.15 - Poeira, severidade média.

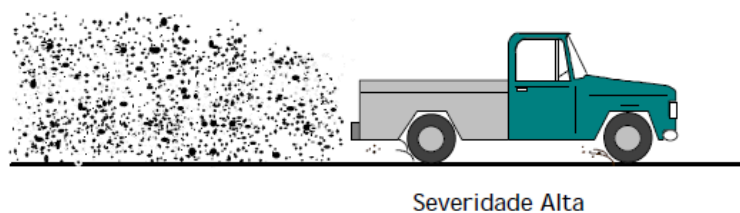
Fonte: ODA (1995).



- Alta: nuvem muito densa que obstrui severamente a visibilidade e causa tráfego muito lento ou parado (Figura 3.16).

Figura 3.16 - Poeira, severidade alta.

Fonte: ODA (1995).



3.2.6 Trilhas de Rodas

Caracterizam-se trilhas de rodas o afundamento ou depressão na superfície de estradas causados pelos pneus dos veículos, resultado, na maioria das vezes, de cargas repetidas de tráfego pesado em vias de capacidade de suporte baixa e em períodos de chuva.

Riverson et al. (1987) e Oda (1995) definem que trilhas de rodas surgem em estradas com superfície de material fino. Segundo os autores, a perda do material de revestimento natural, como um resultado do desenvolvimento de uma superfície inadequada, pode também expor um subleito de solos finos sujeitos aos efeitos da umidade que, combinada com uma drenagem ineficiente, também cria condições para a formação de trilhas de rodas.

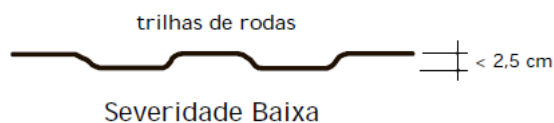
Segundo a GEIPOT (1981) e Oda (1995), as trilhas mais profundas atuam como poças e impedem que a água escoe da pista, causando problemas de drenagem que podem levar a uma rápida deterioração da qualidade de rolamento da estrada, tornando-a intransitável. Ainda, segundo os autores, o afundamento das trilhas nas estradas revestidas com argila ocorre mais lentamente do que em estradas revestidas com quartzo ou laterita, devido à porosidade dos materiais.

Eaton et al (1987), RSMS (1991) e Oda (1995) classificam a qualidade da estrada de acordo com os seguintes níveis de severidade e extensão das trilhas de rodas:

- Baixa: sulcos com profundidade menor que 2,5cm e menos que 10% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos (Figura 3.17);

Figura 3.17 - Trilhas de roda, severidade baixa.

Fonte: ODA (1995).



- Média: sulcos com profundidade entre 2,5cm e 7,5 cm e entre 10% e 30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos (Figura 3.18);

Figura 3.18 - Trilhas de roda, severidade média.

Fonte: ODA (1995).



- Alta: sulcos com profundidade maior que 7,5cm e mais que 30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos (Figura 3.19).

Figura 3.19 - Trilhas de roda, severidade alta.

Fonte: ODA (1995).



3.2.7 Segregação de Agregados

Segundo Eaton et al. (1987), Walker (1991) e Oda (1995), a ação abrasiva do tráfego em estradas não pavimentadas ou não revestidas faz com que as maiores partículas de solos granulares se soltem da superfície de rolamento, movendo-se, a partir do tráfego, para fora das trilhas de roda, formando bermas no centro ou ao longo do acostamento das estradas, ou em áreas menos trafegáveis, paralelas à linha central da estrada.

GEIPOT (1981) e Oda (1995) definem a perda de agregados em estradas como a variação na espessura, ou altura, do cascalho ao longo de um período de tempo, sendo a ação do clima, o

tráfego e a manutenção – a partir de nivelamento utilizando equipamentos – os fatores que mais influenciam na perda de agregados.

Eaton et al. (1987), RSMS (1991) e Oda (1995) classificam a qualidade de estradas não pavimentadas de acordo com os seguintes níveis de severidade e extensão da perda de agregados:

- Baixa: agregados soltos na superfície da estrada ou uma berma de agregados de menos de 5cm de altura no acostamento ou na área menos trafegável e menos que 10% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos (Figura 3.20);

Figura 3.20 - Segregação de Agregado, severidade baixa.

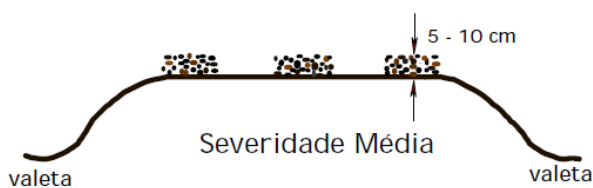
Fonte: ODA (1995).



- Média: berma de agregados de 5cm a 10cm de altura no acostamento ou na área menos trafegável da estrada e entre 10% e 30% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos (Figura 3.21);

Figura 3.21 - Segregação de Agregado, severidade média.

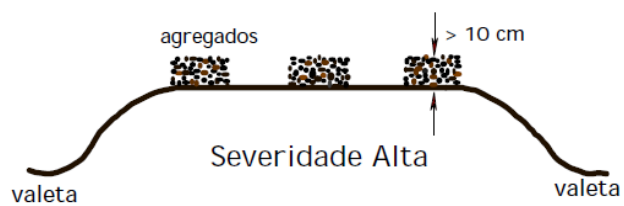
Fonte: ODA (1995).



- Alta: grande quantidade de agregados soltos ou uma berma com mais de 10cm de altura no acostamento ou na área menos trafegável da estrada e mais que 30% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos (Figura 3.22).

Figura 3.22 - Segregação de Agregado, severidade alta.

Fonte: ODA (1995).



4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada para a realização do estudo baseou-se na norma DNIT nº 141 de 17 de novembro de 2010 por se tratar do modelo técnico oficialmente utilizado na definição de procedimentos para instalação de revestimentos primários em âmbito federal.

Para a realização do estudo do revestimento a partir de resíduos industriais foram utilizados estéril argiloso proveniente do processo de obtenção de minério de ferro de uma mineração em Bela Vista de Minas – MG, e escória de alto forno proveniente de uma usina siderúrgica da cidade de João Monlevade – MG.

O trabalho foi dividido em três fases. A primeira definiu-se pela análise laboratorial dos insumos estéril e escória, e a avaliação da viabilidade de empedimento desses materiais na confecção do revestimento primário para uma estrada de estudo, considerando os critérios de aceitação de misturas para o revestimento em questão, e do tráfego de veículos.

A segunda fase do trabalho compreendeu a aplicação da mistura definida como ideal em laboratório em escala teste, a partir da implantação de um trecho experimental em campo.

Por fim, a terceira fase constituiu-se da análise comparativa qualitativa do trecho experimental com o revestimento aplicado, em comparação a estradas não pavimentadas com características semelhantes de tráfego e revestimento natural, após a ocorrência de precipitações e em períodos secos.

Os estudos e aplicações foram realizados em segmentos de vias não pavimentadas ou não revestidas de uma indústria minerária. O local foi escolhido, além da disponibilidade dos insumos, devido à pequena distância entre os empreendimentos geradores dos resíduos industriais utilizados – cerca de 8,2km (Figura 4.1), e ao tráfego constante de veículos e maquinários de grande porte e diferentes configurações de eixos durante todo o ano, portanto passíveis de monitoramento sob a influência dos fatores climáticos existentes.

Figura 4.1 - Distância entre as indústrias em rota de acesso e linear: No ponto A, a mineradora, e em B a siderúrgica.

Fonte: Google Earth.



Por parte da empresa de mineração, houve grande incentivo para a construção do revestimento, considerando a sua utilidade tanto como medida para a melhoria na qualidade das estradas internas do empreendimento, quanto à possibilidade de reuso dos resíduos gerados no processo, uma vez que uma das formas que as empresas estão buscando para reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar o descarte de resíduos na natureza é a reintegração desses em seus processos produtivos, acarretando na redução de passivos ambientais (SANTOS; TEIXEIRA; KNISS, 2014; CALAZANS; SILVA, 2016; VENZON et al., 2018).

Dessa forma, foram cedidos pela empresa não somente os resíduos e área para a construção da estrada, como demais insumos, como maquinário e análises laboratoriais necessárias.

4.1 Amostragem dos insumos

4.1.1 Coleta

Previamente às análises laboratoriais, foi realizada a coleta dos insumos de estudo, escória e estéril, nas suas unidades de estocagem de origem.

A coleta da escória foi realizada no pátio de resíduos da usina siderúrgica, sendo coletados para amostragem cerca de 50Kg do material em pontos aleatórios da pilha, considerando as diferentes granulometrias disponíveis. Em análises laboratoriais fornecidas pela empresa, o material foi classificado como inerte, viabilizando, dessa forma, sua utilização sem prévio tratamento.

Da mesma forma, o estéril foi coletado diretamente na pilha de disposição final, considerando pontos aleatórios, no entanto, aparentemente, com característica predominantemente argilosa. Foram coletados cerca de 30Kg do material para amostragem.

4.1.2 Ensaios laboratoriais

Considerando a proporção em volume defendida por Oda (1995) de que o agregado ideal para revestimento primário deve possuir proporções em volume em torno de 1 de argila para 2,5 de material granular, foram realizadas análises de composição granulométrica (ABNT, 1984a) dos insumos estéril e escória em uma mistura contendo cerca de 70% de agregado siderúrgico, e 30% de estéril argiloso - cerca de 1 de argila para 2,3 de material granular - como primeiro teste. Para a quantificação em campo, foi utilizada a medida, em volume, de uma pá carregadeira.

A análise granulométrica da mistura foi imprescindível para a determinação da composição granulométrica satisfatória por faixa N – número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2tf – e, então, caso favorável, a continuidade dos testes.

Além da granulometria, foram analisados outros parâmetros necessários para assegurar melhor qualidade ao revestimento primário, sua aplicação e utilização, sendo eles:

- Massa específica aparentemente seca (ABNT, 2016a): determina a massa específica de um solo seco pelo seu correspondente volume deslocado de água;
- Umidade Ótima (ABNT, 2016d): determina o teor de umidade em que o solo atinge a maior massa específica aparente seca máxima – processo que minimiza os vazios do solo, proporcionando o aumento da densidade, da resistência e da estabilidade;
- Expansão (ABNT, 2016d): determina o grau de expansão do solo em função da umidade;

- Compactação (ABNT, 2016d) – Energia de Proctor modificado: analisa e determina a capacidade de compactação, do revestimento pretendido, para suporte a altas resistências, como o trânsito de caminhões de carga pesada e máquinas;
- Índice de suporte Califórnia – ISC (ABNT, 2016e): analisa e determina a resistência à penetração de uma amostra saturada compactada segundo o método Proctor;
- Limite de liquidez (ABNT, 2016b): determina o valor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico;
- Limite de plasticidade (ABNT, 2016c): determina o valor de umidade na qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido;
- Índice de plasticidade (ABNT, 2016b e ABNT, 2016c): obtido através da diferença numérica entre o Limite de liquidez e o Limite de plasticidade, em porcentagem, pode ser interpretado como a quantidade máxima de água que pode ser adicionada à pavimentação pretendida, a partir de seu limite de plasticidade, de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica, prevendo o comportamento da pavimentação sob atuação de diversos fatores climatológicos, como precipitações ou estiagem.

As análises laboratoriais foram realizadas por laboratório contratado, devidamente acreditado.

4.2 Número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2tf – N

O cálculo do número N tornou-se necessário para a garantia do desempenho do revestimento construído quanto às necessidades da estrada, considerando a sua estimativa de utilização, composição do tráfego (tipos de veículos) e condições naturais do clima local.

Para o estudo da viabilidade do revestimento proposto, foi utilizada a metodologia da *US Army Corps of Engineers - USACE* para o cálculo de N (equação 3.1), e posterior verificação da empregabilidade dos insumos pretendidos, na proporção pretendida, a fim da melhora do desempenho qualitativo da via.

Para a identificação dos fatores que determinam N, foi realizada pesquisa com dados fornecidos pela mineradora e disponíveis na literatura.

4.2.1 Tempo do projeto – TP

Considerando a aplicação da estrada teste em uma mineradora, cujas estradas sofrem alterações de rota constantemente devido às atividades de lavra e depósito de materiais, foi estimada, com apoio da equipe técnica local, uma média necessária de durabilidade das vias de 2 anos. Dessa forma, considerando a necessidade de conversão do TP para dias, o valor para a variável foi calculado em 730.

4.2.2 Tráfego Médio Diário Anual – TMDA

Para o cálculo do TMDA, foram tomadas como referência as planilhas de monitoramento de viagens diárias controladas pelo setor de logística interna da mineração, durante o ano de 2017. As informações fornecidas pela empresa determinaram a quantidade média de veículos que transitaram pela estrada de estudo regularmente.

4.2.3 Veículo da Frota – FV

Além do tráfego médio diário do ano de 2017, foi possível, a partir do controle fornecido pela mineradora, a identificação dos veículos quanto ao número de eixos e rodas.

A partir desses dados, o FV pode ser calculado, segundo o método USACE, utilizando-se das tabelas padrões do DNER (APÊNDICES A, B e C) para veículos com transporte de carga legal.

4.2.4 Fator Climático Regional – FR

O FR é tabelado e estimado a partir da média pluviométrica local. Para tal, foi utilizada a média pluviométrica disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia - InpWINMET, considerando a média histórica entre os anos de 1981 e 2010.

Outra forma de obtenção do FR é considerá-lo igual a 1, conforme orientação DNIT (2006).

4.2.5 Fator Direcional – FD

O fator direcional foi definido por observação em campo da pista experimental previamente à aplicação do revestimento, constatando-se pista simples.

A pista experimental constituiu-se da construção, sobre solo natural, de um revestimento primário a partir da combinação estéril e argila, considerando-se proporção e umidade da amostragem definida em laboratório. Para essa aplicação, a mistura foi ordenada e compactada a partir de maquinários próprios para esse fim, cedidos pela mineração onde o projeto foi executado.

A literatura, a partir da norma adotada para o estudo, instrui quanto à possibilidade da realização da mistura dos insumos utilizados já no local de construção do revestimento, quando os trechos a serem revestidos são pouco extensos, ou quando há a intenção de aproveitar o material da própria estrada como matéria-prima.

Apesar de caracterizado como um trecho experimental de pequena extensão, a estrada escolhida para a construção do revestimento foi determinada como uma estrada industrial em operação e de tráfego médio a intenso. Dessa forma, a mistura dos materiais foi realizada em um pátio próximo ao local de aplicação, denominado central de mistura (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Máquina realizando o transporte dos insumos para o pátio definido como central de mistura, para posterior mistura e aplicação.



Para a definição da proporção dos insumos, a medida-padrão considerada foi a concha da pá carregadeira utilizada no carregamento e mistura dos materiais, e disposição da mesma para compactação.

Após a mistura prévia, o material foi depositado sobre a pista em pilhas adequadamente espaçadas. Em seguida foi realizado o espalhamento a partir da sua distribuição de forma

homogênea. Quando da ocorrência na mistura materiais estranhos, como galhos, ou fragmentos de tamanho excessivo, esses foram removidos.

Após o espalhamento, foi realizado, em campo, a determinação da umidade do material, a fim de assegurar que o teor de umidade cumprisse a orientações legais para a compactação. Para tal, foram coletadas e pesadas amostras de misturas homogeneizadas em 3 pontos aleatórios da estrada. Em seguida, essas amostras foram desidratadas e novamente pesadas, a fim de se obter os teores de umidade.

Não havendo necessidade de correção do teor de umidade, a construção do revestimento foi prosseguida.

Precedentemente à compactação, ainda no espalhamento da mistura, foram depositados cerca de 30cm de material ao longo da trecho experimental. A espessura do material disposto foi monitorada a partir de réguas instaladas ao longo da pista. A compactação inicial foi definida em 50%, ou seja, com espessura final de 15cm (Figura 4.5), e realizada com o auxílio de rolo compactador.

Figura 4.5 - Mistura finalizada, aplicada e compactada em 50% de seu volume inicial.



Para a verificação da necessidade de maior compactação do revestimento aplicado, verificou-se a conformidade da massa específica aparentemente seca *in loco* após a compactação diante da massa específica aparentemente seca máxima determinada em laboratório.

Para a realização desse cálculo, foram amostrados dois pontos aleatórios ao longo da estrada experimental com volumes definidos em 125cm³ (5cm x 5cm x 5cm). As amostras foram desidratadas e pesadas para a definição da massa individual. A partir do conhecimento do volume inicial, foi possível a determinação da massa específica aparentemente seca para posterior comparação ao resultado laboratorial do parâmetro.

Após a análise, a pista foi liberada para tráfego (Figura 4.6).

Figura 4.6 - Aplicação do revestimento finalizada e estrada liberada para o trânsito de veículos.



4.4 Avaliação do desempenho qualitativo da pista construída

Após a construção do revestimento na via, e diante da sua liberação para tráfego, o desempenho estrutural foi avaliado de forma qualitativa, a partir do monitoramento visual de defeitos na pista, considerando como parâmetros de avaliação corrugações, buracos, poeira, trilhas de rodas e segregação de agregados ao longo de toda a extensão da pista.

Para a metodologia de avaliação, definiu-se a avaliação do parâmetro poeira para o período seco, enquanto os demais parâmetros foram avaliados após ocorrências pluviométricas.

Considerando o período de chuvas, foram especificados dois momentos para a realização dos monitoramentos – setembro de 2018 e maio de 2019.

A avaliação da poeira no período seco foi realizada na segunda quinzena de maio de 2019.

Durante o período abrangido entre a construção do revestimento e os 11 meses subsequentes direcionados à avaliação estrutural da pista, não foi realizado nenhum tipo de manutenção nesta, de forma que a avaliação da estrada experimental fosse procedente à investigação e estudo.

Em contrapartida, nas pistas não pavimentadas ou revestidas do empreendimento houve manutenção corretiva após a todos os eventos de precipitação, o que impossibilitou a investigação dos defeitos qualitativos acumulados no período de estudo.

Como ferramenta de campo, para padronização dos resultados avaliados, foi utilizado um formulário (Figura 4.7) confeccionado para esse fim.

Figura 4.7 - Modelo de formulário utilizado para verificação em campo do desempenho qualitativo das pistas monitoradas.

FORMULÁRIO DE CAMPO: VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO QUALITATIVO DA PISTA						
Período: () Seco () Úmido			Precipitação (mm/dia):			
Data:			Precipitação reincidente (mm):			
DEFEITO	PISTA SEM PAVIMENTAÇÃO OU REVESTIMENTO			PISTA COM O REVESTIMENTO PROPOSTO		
	SEVERIDADE			SEVERIDADE		
	BAIXA	MÉDIA	ALTA	BAIXA	MÉDIA	ALTA
CORRUGAÇÕES						
BURACOS						
POEIRA						
TRILHAS DE RODA						
SEGREGAÇÃO DE AGREGADOS						
QUANTITATIVO POR SEVERIDADE						
% POR SEVERIDADE						

Os parâmetros utilizados para a avaliação do desempenho qualitativo foram os mesmos defendidos por Eaton et al. (1987), RSMS (1991) e Oda (1995), resumidamente apontados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Classificação dos defeitos qualitativos mais comuns em estradas por intensidade.

Fonte: Adaptado de Eaton et al. (1987), RSMS (1991) e Oda (1995).

Defeito	Severidade		
	Baixa	Média	Alta
Corrugações	Profundidade <2,5cm ou <10% da área total da superfície da estrada.	Profundidade >2,5cm e <7,5 cm ou >10% e <30% da área total da superfície da estrada.	Profundidade >7,5cm ou >30% da área total da superfície da estrada.
Buracos	Profundidade <2,5cm e/ou diâmetro < 30cm e <10% da área total da superfície da estrada coberta por buracos.	Profundidade >2,5cm e <5,0cm e/ou diâmetro >30cm e <60 cm e >10% e <30% da área total da superfície da estrada coberta por buraco.	Profundidade >7,5cm e/ou diâmetro >60cm e >30% da área total da superfície da estrada coberta por buracos.
Poeira	Nuvem pouco densa que não obstrui a visibilidade.	Nuvem densa que parcialmente obstrui a visibilidade e causa tráfego lento.	Nuvem muito densa que obstrui severamente a visibilidade e causa tráfego muito lento ou parado.
Trilhas de Roda	Profundidade < 2,5cm e < 10% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos.	Profundidade >2,5cm e <7,5 cm e >10% e <30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos.	Profundidade >7,5cm e >30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos.
Segregação de Agregados	Agregados soltos na superfície da estrada ou uma berma de agregados <5cm de altura no acostamento ou na área menos trafegável e <10% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos.	Berma de agregados >5cm e <10cm de altura no acostamento ou na área menos trafegável da estrada e >10% e <30% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos.	Grande quantidade de agregados soltos ou uma berma > 10cm de altura no acostamento ou na área menos trafegável da estrada e >30% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Definição do revestimento pretendido

5.1.1 Cálculo do Número N

Para a obtenção do número N, considerou-se o período de projeto (P) igual a 2 anos, ou 730 dias, sendo esse o tempo médio corresponde à vida útil de estradas na mineração, local de construção do revestimento proposto.

As demais variáveis necessárias ao cálculo da equação foram obtidas a partir da coleta de informações em campo, considerando dados da estrada experimental.

Para o cálculo do TMDA foram tomadas como referência planilhas de monitoramento de viagens diárias controladas pelo setor de logística interna da mineração, durante o ano de 2017.

De acordo com a análise do material fornecido pela empresa, foi possível a obtenção de dados referentes às características do tráfego rotineiro, e registrada a predominância de caminhões de peso médio e pesados do tipo 2C, 3C e 4C:

- Os veículos do tipo 2C são caracterizados por veículos de dois eixos, sendo o primeiro eixo simples, com rodas simples, e o segundo eixo simples com rodas duplas. Dessa forma, cada veículo possui 2 eixos e 6 pneus;
- os veículos do tipo 3C são caracterizados por veículos com dois eixos, sendo o primeiro eixo simples, com rodas simples, e o segundo eixo duplo tandem. Dessa forma, cada veículo possui 3 eixos e 10 pneus;
- os veículos do tipo 4C são caracterizados por veículos de dois eixos, sendo o primeiro eixo simples, com rodas simples, e o segundo eixo triplo tandem. Dessa forma, cada veículo possui 4 eixos e 14 pneus.

Foi registrado, para o ano de 2017, o tráfego médio diário de 8 viagens de veículos do tipo 2C, 16 viagens de veículos do tipo 3C e 138 viagens de veículos do tipo 4C na estrada escolhida para a construção do revestimento proposto.

O valor de FV é tabelado. Dessa forma, os veículos do tipo 2C, 3C e 4C foram determinados com os fatores veiculares iguais a 7,738; 17,438 e 16,938, respectivamente.

Segundo o INMET (2018), considerando a Norma Climatológica do Brasil entre os anos de 1981 e 2010, a média pluviométrica anual para a cidade de João Monlevade foi de 1.401,30mm. Dessa forma, considerando a Tabela 3.5, o valor do Fator Climatológico Regional foi definido como 1,4.

Por se tratar de pista simples, mesmo sendo de mão dupla, o Fator Direcional foi definido como 50%, ou 0,5, segundo a recomendação normativa.

De posse dos valores das constantes tempo de projeto, tráfego médio diário anual, fator veículo de frota, fator climático regional e fator direcional, a partir da equação 3.1, foi calculado o número N, conforme detalhado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Detalhamento do cálculo realizado para a obtenção do fator N, considerando as características prévias da estrada experimental.

Classificação do veículo	Tempo de Projeto (dias)	TMDA	FV	FR	FD	Fator N
2C	730	8	7,738	1,4	0,5	31.632,94
3C		16	17,438			142.573,09
4C		138	16,938			1.194.433,88
		Total				1.337.006,972

A partir do cálculo da equação 3.1, obteve-se o valor do número $N = 1,34 \times 10^6$, ou seja, Fator $N < 5 \times 10^6$, segundo a definição da norma DNIT (2010).

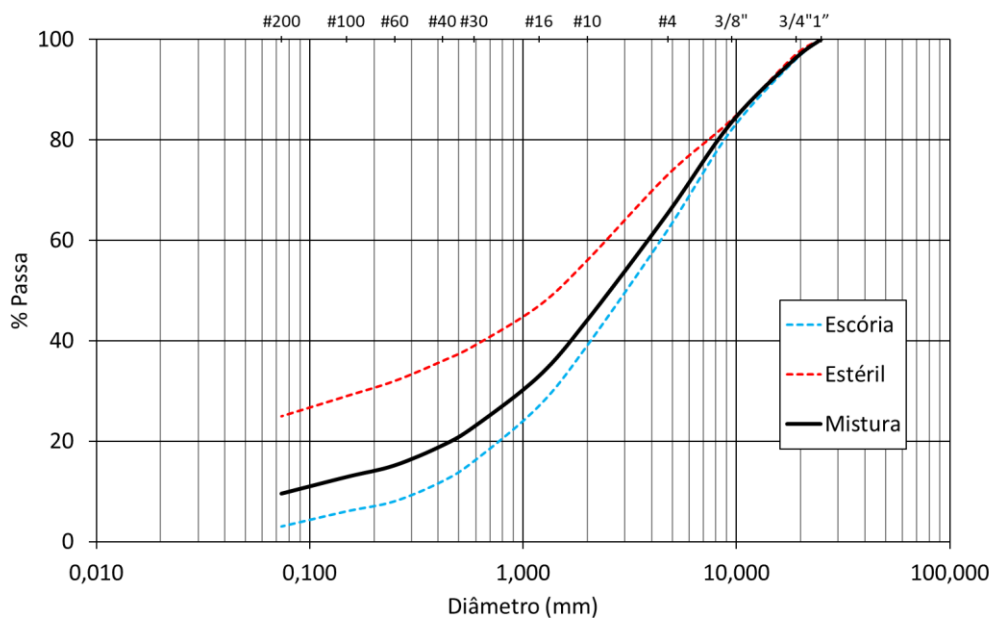
5.1.2 Ensaios laboratoriais

Para a interpretação das análises laboratoriais para o revestimento de estudo, foram utilizadas as diretrizes da norma DNIT nº 141/2010, que define a sistemática a ser empregada na execução da camada de base do pavimento utilizando solo estabilizado granulometricamente, bem como os limites que devem ser considerados nas análises físicas para determinação de um revestimento primário considerado ideal.

Após a coleta dos resíduos escolhidos para insumos do revestimento de teste, estéril argiloso e escória de alto forno, e encaminhamento ao laboratório, esses foram analisados de forma

individual e como mistura, na proporção volumétrica 30% argila e 70% escória. Os resultados da análise granulométrica são apresentados na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Composição granulométrica dos insumos e mistura de agregados pretendidos para o revestimento em estudo.



O agregado retido na peneira nº 10, foi caracterizado como constituído de partículas duras e resistentes, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, e isento de matéria vegetal ou outra substância prejudicial, conforme determinado na norma DNIT 141/2010 (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Composição do agregado retido na peneira nº 10 da análise granulométrica.

Fração	Pedregulho	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila	Total
Diâmetro (mm)	>4,8	4,8 a 2,0	2,0 a 0,42	40 a 200	0,05 a 0,005	< 0,005	-
Valor Retido (%)	25,96	14,67	19,77	39,60	-	-	100

Os resultados dos ensaios para a obtenção da massa específica aparente seca máxima (ρ_d), umidade ótima (w_{ot}), ISC, expansão, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) para a mistura são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultados das análises laboratoriais realizadas para a mistura 70% e 30% de escória e argila, respectivamente.

Parâmetro	ρ_d g/cm ³	w_{ot} %	ISC %	Expansão %	LL %	LP %	IP %
Valor	2,292	12,6	102,1	0	60	34	25

Para a verificação da aceitação da faixa granulométrica da mistura para um revestimento viável, foram comparados os resultados da composição granulométrica da mistura de agregados pretendidos e a composição granulométrica satisfatória por faixa N, considerando $N < 5 \times 10^6$. Os resultados, já considerando a tolerância estabelecida, são apresentados na Figura 5.2, para a Faixa E, e na Figura 5.3 para a Faixa F.

Figura 5.2 - Comparação entre os valores da composição granulométrica obtida para a mistura em adequação aos valores mínimos e máximo definidos para a faixa E.

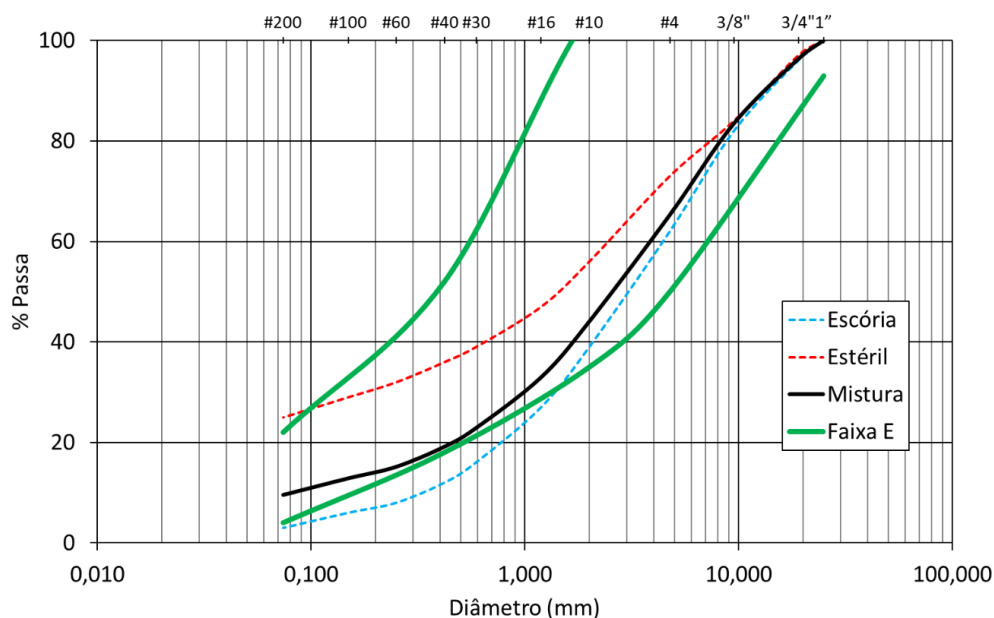
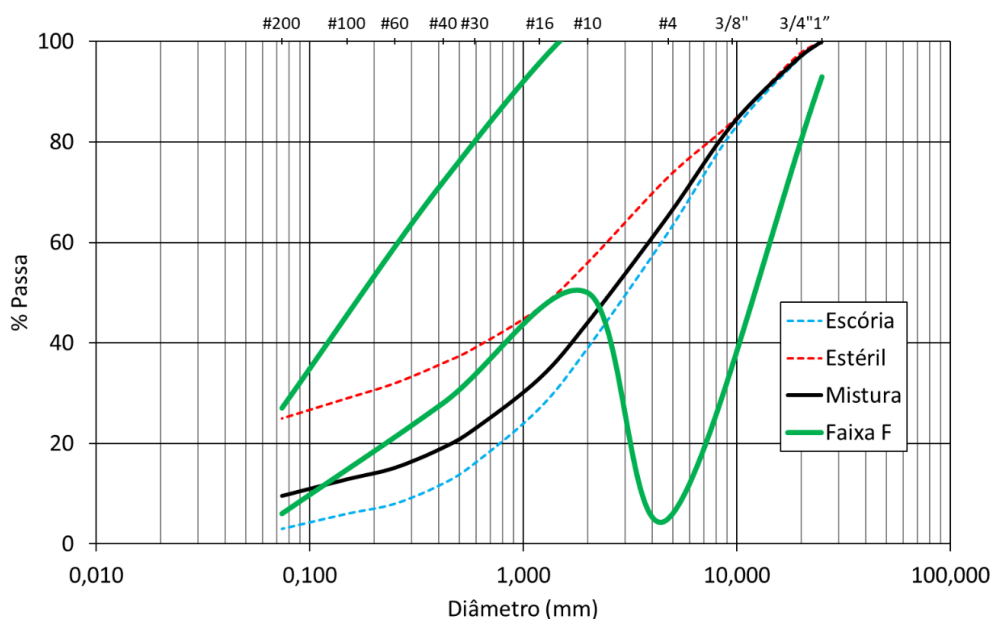


Figura 5.3 – Comparação entre os valores da composição granulométrica obtida para a mistura em adequação aos valores mínimos e máximo definidos para a faixa F.



Conforme ilustrado, os resultados obtidos foram satisfatórios para a faixa E definida pela norma DNIT nº 141/2010, caracterizando a proporção do material adotada (70% agregado siderúrgico e 30% estéril argiloso) como aceitável para a continuidade do estudo.

Em continuidade das análises segundo a norma, a proporção dos insumos na mistura analisada também atendeu à necessidade que define que a porcentagem do material passante na peneira nº 200 não ultrapassasse em mais de 2/3 a porcentagem do material passante na peneira nº 40. Foi determinado nos testes laboratoriais um percentual de material passante de 9,6 e 19,2 para as peneiras nº 200 e nº 40, respectivamente, viabilizando essa condição.

Ainda, para $N < 5 \times 10^6$, o resultado do parâmetro ISC deveria ser maior ou igual a 60%, e o da expansão menor ou igual a 0,5. Conforme os valores apresentados, esses foram iguais a 102% e 0%, respectivamente. Dessa forma, todas as condições definidas pela norma foram alcançadas, não havendo, inicialmente, necessidade de ensaios com outras proporções dos insumos, ou outros impedimentos, proporcionando a continuidade do experimento.

5.2 Aplicação do revestimento

5.2.1 Determinação do teor de umidade

A partir das análises laboratoriais, foi definida uma umidade ótima (W_{ot}) para a mistura de 12,6% para o momento de sua aplicação. A variação do teor de umidade admitida para o material, em norma, para início da compactação varia em menos 2 pontos percentuais até 1 ponto percentual acima da umidade ótima de compactação, ou seja, de 10,6% a 13,6%.

Foram realizados ao longo da estrada experimental, em pontos aleatórios, 3 amostragens da mistura estéril e escória previamente à compactação a fim da determinação da umidade em conformidade aos valores estabelecidos. Os resultados são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Determinação dos valores da umidade da mistura ao longo do trecho experimental.

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Wf (%)	12,69	12,62	12,65

Considerando os resultados apresentados a partir das análises nos pontos aleatoriamente escolhidos, não houve necessidade de correção ou homogeneização da umidade na mistura, visto o enquadramento do resultado na faixa de variação permitida.

5.2.2 Determinação do grau de compactação

Para a determinação do grau de compactação, verifica-se a conformidade da massa específica aparentemente seca *in loco* (ρ_d campo) após a compactação, diante à massa específica aparente seca máxima determinada em laboratório (ρ_{dmax} laboratório). Para tal, foram amostrados 2 pontos aleatórios da estrada experimental logo após à compactação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Determinação do grau de compactação na estrada experimental.

Parâmetros	Ponto 1	Ponto 2
ρ_d campo (g/cm ³)	2,470	2,295
ρ_{dmax} laboratório (g/cm ³)	2,292	2,292
Grau de compactação (%)	107,77	100,13

Dada a aceitação do grau de compactação, cujo valor mínimo deveria ser igual a 100%, e não havendo maior necessidade de alterações, foi realizado o acabamento da pista com o auxílio de um rolo compactador, e a pista liberada para uso.

Ressalta-se que deve-se atentar à aproximação do grau de compactação a 100%, a fim da diminuição nos custos de aplicação do revestimento relacionados à utilização do maquinário, mão de obra, gasto de combustível e emissões atmosféricas advindas no maquinário.

5.3 Avaliação do desempenho qualitativo das estradas

A avaliação do desempenho do revestimento foi desenvolvida de forma qualitativa, a partir da observação da pista experimental, comparada às demais vias não revestidas próximas e sujeitas às mesmas condições de tráfego.

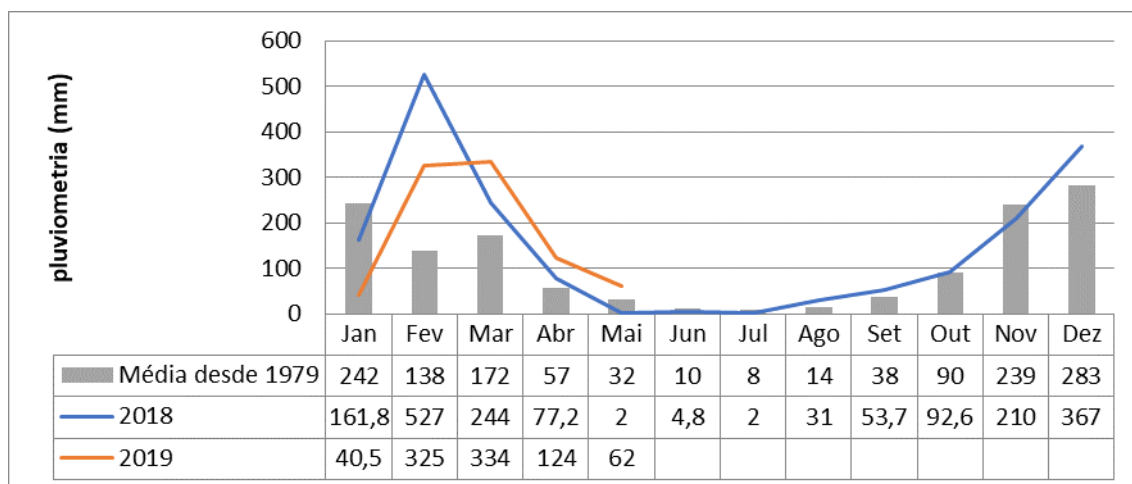
Os monitoramentos ocorreram em três momentos, considerando o início e o fim do período chuvoso, considerando a pluviometria acumulada, e o período seco.

Para o período chuvoso, as avaliações se deram em setembro de 2018 e maio de 2019, considerando um intervalo de chuvas próximo a 6 meses, enquanto a análise do revestimento em período seco ocorreu na segunda quinzena de maio de 2019, após ao fim do período chuvoso.

Conforme histórico pluviométrico fornecido pelo empreendimento no qual foi construída a estrada experimental, consideradas as medições no intervalo entre 1979 a 2019 (Figura 5.4), o período analisado excede a média histórica local em 24,5% quanto ao volume de precipitações, 1.608mm e 1.291mm, respectivamente, o que torna a avaliação realizada para o desempenho qualitativo do revestimento ainda mais fundamentado.

Figura 5.4 - Histórico pluviométrico fornecido pela empresa considerando a média histórica e o período de análise do revestimento proposto já construído na estrada experimental.

Fonte: Mina do Andrade (2019).



5.3.1 Período chuvoso

5.3.1.1 Setembro de 2018

O início da avaliação do desempenho qualitativo do revestimento construído iniciou-se em setembro de 2018, juntamente ao início do período de chuvas da região, 3 meses após a instalação e início da utilização do revestimento de estéril e escória.

Foi avaliado qualitativamente o desempenho do segmento revestido e, posteriormente, comparado ao desempenho de estradas sem tratamento, em solo natural, após um evento de precipitação de 11,8mm em 24h, o mais intenso de uma semana de precipitação total de 38,4mm.

Em função da ocorrência da precipitação no período da noite, e a necessidade da imediata manutenção das vias principais do empreendimento após ao término das chuvas, o revestimento construído foi comparado a outras estradas, descontinuadas da pista experimental, porém de mesma litologia e tráfego semelhante.

Os resultados do desempenho qualitativo são apresentados na Tabela 5.6. O parâmetro poeira não foi avaliado devido às condições do período.

Tabela 5.6 – Avaliação do desempenho qualitativo das estradas analisadas, realizado após ao início das precipitações do período, em Setembro de 2018.

Parâmetro monitorado	Qualificação do Defeito na Estrada	
	Revestida	Sem Revestimento
Corrugações	N/E	N/E
Buracos	N/E	Média
Poeira	N/A	N/E
Trilhas de Rodas	N/E	Alta
Segregação de Agregados	Baixa e Média	Alta
Somatório por Severidade:		
Baixa	1	0
Média	1	2
Alta	0	2

- Corrugações

Não foi observada a incidência do defeito qualitativo corrugação na pista experimental revestida (Figura 5.5).

Figura 5.5 - Ausência do defeito qualitativo corrugações na pista experimental construída.



No entanto, também não foi possível a visualização, e, conseqüentemente, a avaliação do defeito nas estradas adjacentes não revestidas devido à lama excessiva formada nessas estradas após às chuvas (Figura 5.6).

Figura 5.6 - Formação de camada de lama sobre as pistas não revestidas, impossibilitando a visualização da formação de corrugações.



- Buracos

Não foram observados defeitos estruturais caracterizados como buracos na pista experimental construída (Figura 5.7), no entanto, buracos de média intensidade foram identificados na estrada não revestida analisada (Figura 5.8).

Figura 5.7 - Visualização do revestimento construído, isento de buracos em sua extensão.

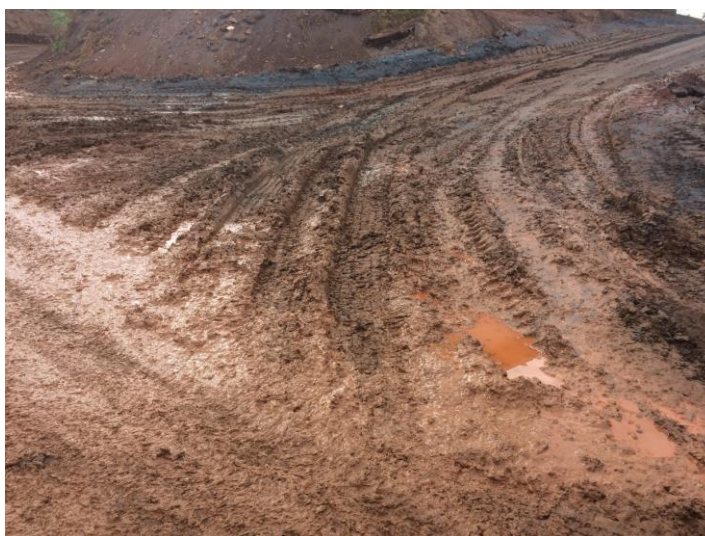


Figura 5.8 – Verificada a ocorrência de buracos ao longo das estradas não revestidas, caracterizados pela ação das chuvas em concomitância ao tráfego constante de veículos.



Apesar de não muito frequentes, em cerca de 15% da extensão analisada, as cavidades mensuradas variaram em torno de 30 a 50 cm de diâmetro (Figura 5.9).

Figura 5.9 - Ocorrência de buracos com diâmetros superiores a 30 cm nas pistas não revestidas do empreendimento.



O defeito estrutural buracos de média intensidade é caracterizado por cavidades de profundidade entre 2,5cm e 5,0cm e/ou diâmetro entre 30cm e 60 cm e predominância entre 10% e 30% da área total da superfície da estrada.

- Trilhas de rodas

Não foi verificada a presença do defeito qualitativo trilhas de rodas na estrada experimental, no entanto esse foi o defeito qualitativo de maior frequência e intensidade, caracterizadas como altas, identificado nas vias não pavimentadas (Figura 5.10).

Figura 5.10 - Predominância do defeito qualitativo trilhas de rodas em um fragmento de estrada não revestida.



Trilhas de rodas de alta intensidade são caracterizadas por profundidade maior que 7,5cm e mais de 30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos (Figura 5.11).

Figura 5.11 - O defeito qualitativo trilhas de rodas foi classificado como alto devido à sua alta frequência e à altura das trilhas formadas no solo.



Esse fenômeno pode ser justificado pela formação do solo local com predominância argilosa, propicia à baixa infiltração pluviométrica, concomitante ao tráfego de veículos pesados.

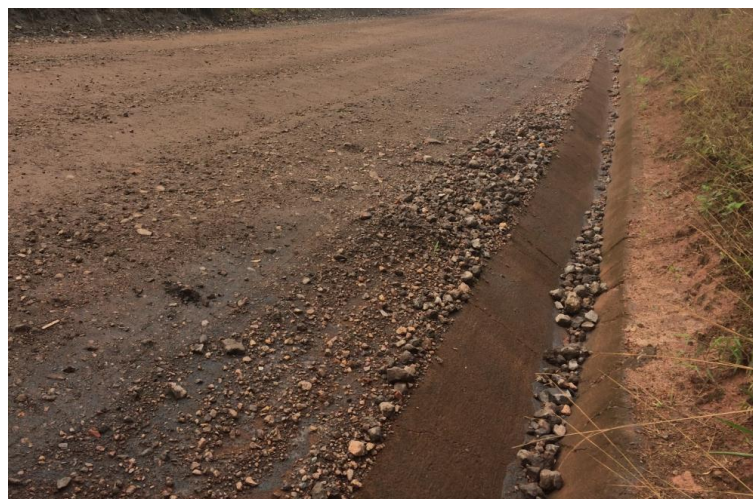
Figura 5.12 - Solo caracterizado por formação argilosa, dificultando a infiltração pluviométrica, propiciando a formação de trilhas.



- Segregação de agregados

Foi observado na estrada experimental, com revestimento construído, fragmentos da pista com intensidade baixa e média de segregação de agregados, sobretudo, nas canaletas de escoamento pluvial (Figura 5.5).

Figura 5.13 – Acúmulo de escória nas laterais da pista experimental, sobretudo nas canaletas de escoamento pluvial, caracterizando segregação de agregados.



No entanto, apesar de caracterizados como uma deficiência estrutural qualitativa da estrada, propõe-se que os agregados não foram erodidos da pavimentação construída por não haver

vestígios desse deslocamento (Figura 5.6), mas que já estavam soltos na superfície da estrada, podendo ser caracterizados por fuga de cargas de escória que trafegam a estrada, ou limpeza ineficiente da superfície do revestimento após sua construção.

Figura 5.14 - Visão geral da pista construída, sem maiores defeitos qualitativos que justifiquem a formação da segregação de agregados.



Outra justificativa, e a mais provável, é o não alcance do rolo compactador durante a construção da estrada nas laterais da pista, uma vez que os desprendimentos são próximos às canaletas de água pluvial, e havia risco de quebrá-las caso o equipamento as alcançasse.

A segregação de agregados de baixa intensidade é caracterizada por agregados soltos na superfície da estrada ou uma berma de agregados menor que 5cm de altura no acostamento ou na área menos trafegável e menor que 10% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos, enquanto a intensidade média é caracterizada por uma berma de agregados maior que 5cm e menor que 10cm de altura no acostamento ou na área menos trafegável da estrada e maior que 10% e menor que 30% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos.

Em contrapartida, as estradas adjacentes à estrada experimental, não pavimentadas ou não revestidas, apresentaram intensidade alta quanto ao defeito qualitativo segregação de agregado.

O defeito qualitativo segregação de agregados é considerado de alta intensidade quando grande quantidade de agregados soltos em uma berma com mais 10cm de altura no

acostamento ou na área menos trafegável da estrada e em mais que em 30% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos (Figuras 5.7 e 5.8).

Figura 5.15 - Formação do defeito qualitativo segregação de agregados de intensidade alta, sobretudo na parte central e acostamentos da pista.



Figura 5.16 - Incidência de agregados soltos nas áreas menos trafegáveis da pista, área central e acostamento.



5.3.1.2 Maio de 2019

O final da avaliação do desempenho qualitativo do revestimento de estéril e escória no período chuvoso deu-se em maio de 2019, 11 meses após a sua construção e início da utilização, representando 46% do período projetado para a estrada.

Foi avaliado qualitativamente o desempenho de segmentos revestido e sem revestimento após um evento de precipitação de 23,6mm em 24h, em uma semana com precipitação total de 39,2mm. Comparado ao evento de setembro de 2018, a precipitação foi 100% maior, em volume, em 24horas. Considerando o período total, a chuva acumulada incidente na estrada foi de 1.608,80mm em 11 meses, referente ao período de junho de 2018 a maio de 2019.

Para avaliação do revestimento, foi monitorado o desempenho estrutural da pista após a incidência pluviométrica de forma comparativa entre a via experimental e outras vias do empreendimento, de mesma litologia e de tráfego contínuo semelhante a partir de parâmetros pré-estabelecidos. Os resultados são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Avaliação do desempenho qualitativo das estradas analisadas, realizado após ao início das precipitações do período, em Maio de 2019.

Parâmetro monitorado	Qualificação do Defeito na Estrada	
	Revestida	Sem Revestimento
Corrugações	N/E	Baixa e média
Buracos	N/E	Alta
Poeira	N/A	N/E
Trilhas de Rodas	N/E	Alta
Segregação de Agregados	Baixa	Alta
Quantitativo por Severidade:		
Baixa	1	1
Média	0	1
Alta	0	3

Da mesma maneira como realizado em setembro de 2018, o monitoramento realizado nas estradas adjacentes à estrada experimental foi realizado de forma pontual após às precipitações, visto a realização de manutenções constantes nas estradas por parte da mineradora. Foram observadas as características litológicas e o tráfego de veículos para que houvesse compatibilidade entre os trechos estudados (Figura 5.17).

Figura 5.17 - Interseção entre estrada experimental com o revestimento construído (à esquerda) e estrada não revestida (abaixo), após ocorrência de precipitação.



- Corrugações

Mesmo após os 11 meses de uso, não foram detectados os defeitos estruturais qualitativos corrugações na pista experimental (Figura 5.18).

Figura 5.18 - Estrada experimental após 11 meses de utilização.



No entanto, foi possível a identificação de ocorrências isoladas do defeito corrugação nas estradas não revestidas monitoradas, em pequenas proporções, especialmente, em função da lama formada na maior parte das vias.

Figura 5.19 - Trecho de uma das pistas não revestidas com impossibilidade de verificação apurada do defeito estrutural corrugação devido à lama formada na superfície.



Devido à baixa incidência, no entanto com profundidades com significância, as corrugações foram classificadas como de baixa e média intensidade, conforme Figura 5.20 e Figura 5.21, respectivamente.

Figura 5.20 - Formação de corrugações de baixa intensidade, caracterizadas, sobretudo, pela baixa frequência e pequena profundidade.



Figura 5.21 - Evidência de dos defeitos estruturais qualitativos corrugações de média intensidade em estrada não revestida.



- Buracos

Embora não identificados no revestimento construído (Figura 5.22), a incidência de buracos nas vias não revestidas analisadas foi notória quando comparada ao ano de 2018, em quantidade e proporção (Figura 5.23), sendo classificadas como severidade alta.

Figura 5.22 - Não foi detectada a presença de buracos no revestimentos construído na pista experimental.



Figura 5.23 - A frequência aumentada concomitantemente à profundidade das cavidades classificaram o defeito qualitativo buraco em severidade alta.



A severidade de buracos classificada como alta incide de cavidades com profundidade maior que 7,5cm (Figura 5.24) e/ou diâmetro maiores que 60cm (Figura 5.25 e Figura 5.26), além de mais que 30% da área total da superfície da estrada coberta por buracos (Figura 5.27).

Figura 5.24 - Ocorrência de cavidades acima de 7,5cm são classificadas como severidade alta: na imagem, cavidade com 20 cm de profundidade.



Figura 5.25 - Ocorrência do defeito estrutural buraco com diâmetro maior que 60cm, caracterizado como severidade alta.



Figura 5.26 - Ocorrência do defeito estrutural buraco com diâmetro maior que 60cm, caracterizado como severidade alta.



Figura 5.27 - Estrada não revestida com mais de 30% de sua superfície coberta por buracos.



- Trilhas de rodas

Assim como no monitoramento realizado em junho de 2018, o defeito qualitativo trilha de rodas foi identificado com severidade ou intensidade alta nas vias não revestidas e, da mesma forma, justificado pela litologia do solo, rico em argila, dificultando a absorção da água e, concomitante ao tráfego de veículos, viabilizando a formação do defeito estrutural (Figura 5.28).

Figura 5.28 - Estrada não revestida com formação de trilhas de rodas com alta severidade em toda a sua extensão.



Trilhas de rodas de alta intensidade são caracterizadas por profundidade maior que 7,5cm e mais de 30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos (Figura 5.29 e Figura 5.30).

Figura 5.29 - Evidência de trilha de roda de alta severidade, caracterizada por sua profundidade.



Figura 5.30 - Identificação de trilha de roda com profundidade 13cm, caracterizando o defeito estrutural como alta severidade.



Com relação à estrada experimental, foram detectadas marcas de rodas no revestimento construído, porém não caracterizados como trilhas de rodas (Figura 5.31).

Figura 5.31 - Marcas de rodas no revestimento construído, não caracterizadas como trilhas de rodas.



Dessa forma, o defeito estrutural qualitativo foi classificado como inexistente na pista experimental.

- Segregação de agregados

Assim como os demais parâmetros identificados, o fenômeno segregação de agregados também apresentou maior incidência nas pistas não revestidas quando comparado à análise realizada no ano anterior (Figura 5.32), sendo caracterizado como de alta intensidade.

Figura 5.32 - Ocorrência da segregação de agregados de alta intensidade, sobretudo, nos canteiros e proporções centrais (menos transitadas) das estradas não revestidas.



O defeito qualitativo segregação de agregados é considerado de alta intensidade quando grande quantidade de agregados soltos em uma berma com mais 10cm de altura no acostamento (Figura 5.33) ou na área menos trafegável da estrada e em mais que em 30% da área total da superfície da estrada coberta por agregados soltos

Figura 5.33 - Ocorrência do defeito estrutural segregação de agregados em grande frequência no acostamento das estradas não revestidas.



Diferentemente da análise realizada em setembro de 2018, não foi observada a formação de segregação de agregados no revestimento construído, no entanto, foi verificado o acúmulo de

sedimentos, diferentes dos materiais empregados na construção do revestimento, nas canaletas da via, reforçando a hipótese de advirem de carreamento junto aos pneus ou cargas que trafegam a estrada.

Figura 5.34 - Ajuntamento de sedimentos nas canaletas de escoamento de água pluvial na via experimental, descartando a hipótese de segregação de agregados do revestimento construído.



5.3.2 Período Seco

O monitoramento do revestimento durante o período seco deu-se na segunda quinzena de maio de 2019, após ao final do período de chuvas da região, a fim da identificação e classificação do defeito qualitativo poeira, em comparação às estradas não pavimentadas ou revestidas.

Para tal, foi estabelecido um período superior a 7 dias consecutivos sem precipitações, de modo que não houvesse qualquer tipo de interferência nos resultados. Foi considerada a continuidade da estrada experimental para o estudo do parâmetro.

A observação do parâmetro poeira foi realizada sem interferência externa pelo período de 3h, devido à necessidade de umectação das vias pela mineradora, resultando na interrupção e finalização da investigação, cujos resultados qualitativos do monitoramento são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Avaliação do desempenho qualitativo das estradas analisadas, realizado durante o período seco, na segunda quinzena de maio de 2019.

Parâmetro monitorado	Qualificação do Defeito na Estrada	
	Revestida	Sem Revestimento
Corrugações	N/A	N/A
Buracos	N/A	N/A
Poeira	Baixa a Alta	Baixa a Alta
Trilhas de Rodas	N/A	N/A
Segregação de Agregados	N/A	N/A
Quantitativo por Severidade:		
Baixa	1	0
Média	1	1
Alta	0	1

A classificação da severidade do defeito qualitativo poeira foi realizada a partir da análise visual de sua intensidade, provocada por veículos a 40km/h.

Classifica-se baixa severidade nuvens de poeira pouco densas que não obstruem a visibilidade; as severidades média e alta são classificadas como nuvem densa que parcialmente obstrui a visibilidade e causa tráfego lento, e nuvem muito densa que obstrui severamente a visibilidade e causa tráfego muito lento ou parado, respectivamente.

Apesar de notória melhora da condição dos demais defeitos qualitativos anteriormente analisados, quanto ao parâmetro poeira o revestimento proposto apresentou performance mediana. Apesar de discreta diminuição da densidade da poeira, a nuvem ainda é existente, sendo classificada como baixa a média na estrada revestida (Figura 5.35) e média a alta nas estradas não revestidas (Figura 5.36).

Figura 5.35 - Defeito qualitativo poeira, classificado como média intensidade advinda do tráfego de veículos sobre o revestimento construído.



Figura 5.36 – Defeito qualitativo poeira, classificado como alta intensidade advinda do tráfego de veículos sobre estrada não revestida.



Em uma análise geral, a partir da Figura 5.37 é possível verificar notável diferença entre as estradas analisadas. Paralelamente, em A, é verificado o revestimento primário construído a partir da mistura estéril e escória e, em B, trecho em solo natural: ambos os trechos foram submetidos ao mesmo tráfego e condições climáticas, atestando a viabilidade do revestimento construído quanto à melhoria qualitativa de defeitos estruturais em estradas não pavimentadas.

Figura 5.37 - Paralelamente, em A, revestimento primário construído a partir da mistura estéril e escória e, em B, trecho em solo natural.



No entanto, deve-se considerar a necessidade da análise laboratorial dos insumos empregados sempre que houver a variação da origem, sobretudo quando à proporção dos materiais empregados e cálculos em campo com a finalidade de que haja êxito na construção do revestimento primário pretendido.

A proporção estéril e escória concomitante à compactação adequada devem ser preservados, a fim de que os resultados advindos da construção de revestimento sejam duradouros, principalmente quando comparados à aplicação de revestimentos primários compostos unicamente por material granular, como cascalho ou escória que, ao passar do tempo, sofrem afundamento na pista, resultando nos defeitos qualitativos estruturais estudados (Figura 5.38).

Figura 5.38 - Trecho com revestimento primário construído exclusivamente com escória, 4 meses após a sua construção.



Por fim, considera-se importante a manutenção das estradas revestidas quanto à limpeza das canaletas de drenagem antes e/ou após ao período de chuvas, e/ou sempre que necessário, de modo que o escoamento superficial pluviométrico não incorra em defeitos no revestimento construído (Figura 5.39).

Figura 5.39 - Realização da limpeza de canaletas de escoamento de águas pluviais após período de chuvas: a manutenção garante maior longevidade do revestimento construído.

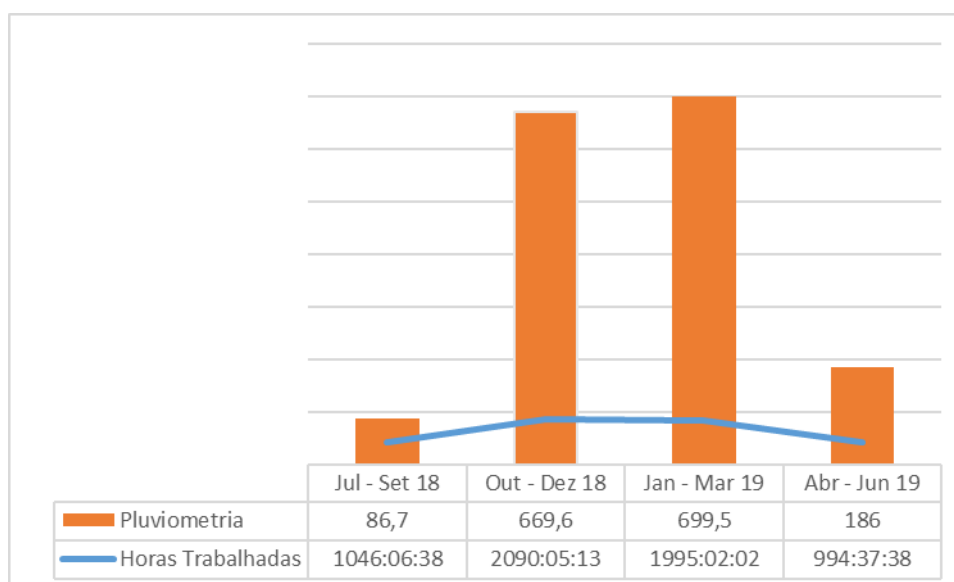


5.4 Viabilidade econômica do projeto

Considerando o período entre a construção do revestimento primário na estrada teste e o seu último monitoramento de qualidade estrutural, o empreendimento demandou de, aproximadamente, 6.125 horas de operação de maquinário na manutenção de vias não pavimentadas - equivalente a, aproximadamente, 255 dias em 11 meses.

De acordo com as estatísticas repassadas pela empresa, representadas na Figura 5.40, a frequência na demanda do uso de maquinários para a manutenção de estradas aumenta consideravelmente no período de chuvas, onde a ocorrência de defeitos estruturais causados pela movimentação dos veículos é maior.

Figura 5.40 - Correlação entre a frequência em horas de utilização de equipamentos em manutenções de estradas não revestidas e índices pluviométricos



Considerando que foram necessárias cerca de 6 horas para a construção da via revestida com extensão de, aproximadamente, 600 m, e que a mineração do estudo possui cerca de 15km de estradas de uso rotineiro e fixo, seriam necessárias 150 horas para a construção do revestimento primário em todo o empreendimento.

Tendo em vista a vida útil da estrada construída em uma média de 2 anos, ou 730 dias, seriam economizados, no período, mais de 13.000 horas de operação de máquinas para a manutenção de estradas.

Ressalta-se que, concomitante à operação das máquinas, são despendidos gastos de combustível, operadores e manutenções, que também seriam economizados. Prejuízos relacionados à paralização das estradas por más condições da pista, e, conseqüentemente, atrasos na produção, também seriam impedidos.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O experimento conduzido, referente à utilização de resíduos industriais mineral e siderúrgico, estéril e escória, respectivamente, viabilizou resultados positivos na construção do revestimento primário, a fim da diminuição de defeitos estruturais recorrentes em estradas não pavimentadas e não revestidas.

Para todos os parâmetros de defeitos estruturais qualitativos analisados foram consideradas notáveis melhorias na estrada construída quando comparada à estrada não revestida.

A construção do revestimento também se mostrou economicamente viável quando comparado aos custos de manutenção de estradas não revestidas, no que tange a utilização de máquinas e equipamentos em horas. No entanto, também deve ser considerado no cálculo de viabilização do projeto para uma aplicação real os custos de obtenção e frete dos insumos.

Além da melhoria de estradas, o estudo contribui para a prevenção da poluição ambiental uma vez que, além de se utilizar de resíduos que anteriormente seriam descartados, auxilia também na redução de manutenções corretivas e preventivas de veículos associados ao desgaste provocado por pistas mal estruturadas, e gasto expedidos de combustíveis. Em âmbito social, estradas bem estruturadas também previnem a ocorrência de acidentes de trânsito causados por má qualidade da pista.

Recomenda-se a continuidade do monitoramento visual qualitativo da estrada durante todo o tempo de projeto estimado, a fim da confirmação da metodologia utilizada.

É também de interesse a verificação da metodologia e construção do revestimento em estradas com tráfego predominantemente leve, a fim de observação das variações estruturais e defeitos não observados.

Análises laboratoriais adicionais para a comparação, ao longo do tempo, do percentual de lixiviação do material fazem-se importantes para a determinação de possíveis impactos ambientais, sobretudo em drenagens de alcance a corpos hídricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. E., 1963. A corrugação Ritmada e Outros Problemas das Estradas de Terra. IN: 1º SIMPÓSIO DE CONSERVAÇÃO DE RODOVIAS – ABPv, SP, 1963.

ANDRADE, M. L. A., CUNHA, L. M. D. S. Siderurgia no Brasil: produzir mais para exportar. BNDES. Rio de Janeiro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico. Brasília, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 7181/2016 - Solo – Análise granulométrica – procedimento. Rio de Janeiro: 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. - NBR 6459/2016 - Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 7180/2016 - Solo – Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro: 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. - NBR 7182/2016 – Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. - NBR 9895/2016 – Solo - Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro: 2016e.

BALTAZAR, R. P. Caracterização de uma rede municipal de estradas não pavimentada. Tese (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 186. 1995

BARBIERI, J. C.; VASCONCELOS, I. F. G.; ANDREASSI, T.; VASCONCELOS, F. C. Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições. Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 50, n. 2, p. 146-154, 2010.

BASTOS, L. A. C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. 2016. Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, p. 04016102-1 - 04016102-9, 2016.

BETEGA, W. P. 2013. Cálculo do número “N” – USACE. Universidade Federal do Paraná. Paraná: 2013.

CALAZANS, L. B. B.; SILVA, G. Inovação de processo: uma análise em empresas com práticas sustentáveis. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 115-129, 2016.

CHENG, T.W., CHIU, J.P., 2003. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Miner. Eng.* 16, 205 e 210. 2003.

CNT. Confederação Nacional do Transporte, 2018. Pesquisa CNT de Rodovias 2017. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>. Acesso em: 29/09/2018.

COSTA, I.; MASSARAD, G.; AGARWAL, A. Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 18, n. 8, p. 815-822, 2010.

COSTA, K.A. et al. Study of controlled leaching process of steel slag in Soxhlet extractor aiming employment in pavements. *Matéria (Rio J.)* vol.22 no.2 Rio de Janeiro, 2017 Epub June 01, 2017.

CROSSIM, E., 2015. The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute. *Journal of Cleaner Production*. Volume 95, 15 May 2015, Pages 101-108.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. DIEESE. Setor Siderúrgico. São Paulo: DIEESE, 2002.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, 1996. Manual de Pavimentação. 2ª ed., Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Ministério dos Transportes.

DINIZ, D. H.; CARVALHO, J. M. F.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. 2017. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, p. 04017118-1 - 04017118-7, 2017.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006. Manual de Pavimentação. 3ª ed., Rio de Janeiro, 2006, 274 p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010. DNIT ES 141/2010: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010, 9 p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2017. ICM Brasil. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/icm/icm-brasil-2.pdf>. Acesso em: 28 de agosto de 2018.

EFING, A. C.; PAIVA, L. L. Consumo e obsolescência programada: sustentabilidade e responsabilidade do fornecedor. *Revista de Direito, Globalização e Responsabilidade nas Relações de Consumo*, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 117-135, 2016.

ELNOUHY, H. A. Properties of paving units incorporating slag cement. *HBRC Journal*, 9 (1) (2013), pp. 41-48. 2013.

EATON, R. A.; GERARD, S.; DATTILO, R. S. 1987. A Method for Rating Unsurfaced Roads. *Transportation Research Record* 1106, vol. 02, pages 34-42. 1987.

EL-NAGA, I.A.; RAGAB, M. 2019. Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 219, p. 81 - 90, 2019.

Estado de Minas Gerais, 2018. Rodovias. Disponível em: <http://mg.gov.br/conhecaminas/rodovias>. Acesso em 01 de outubro de 2018.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2018. Inventário de Resíduos Sólidos Industriais. Ano base 2017. Minas Gerais. FEAM, 2018. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/2018/RESIDUOS/Relat%C3%B3rio_Invent%C3%A1rio_Industria_2018_ano_base_2017.pdf. Acesso em 20 de julho de 2019.

GAVRONSKI, I.; KLASSEN, R. D.; VACHON, S.; NASCIMENTO, L. F. M. A learning and knowledge approach to sustainable operations. *International Journal of Production Economics*, [S. l.], v. 140, n. 1, p. 183-192, 2012.

HOOTON, R. D. The Reactivity and Hydration Products of Blast Furnace Slag. In: MALHOTRA, V. M. Supplementary Cementing Materials for Concrete. Canada centre for mineral and energy technology (CANMET), 1987. cap 4, p. 247 – 280.

HORTA, J. C. O. S., 1991. Rehabilitation and Upgrading Design of Earth and Gravel Roads Tropical Developing Countries. Transportation Research Record 1291, vol. 01, pages 215-223.

IAB. INSTITUTO AÇO BRASIL. Dados do setor 2016. 2017. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>>. Acesso em: 06 nov. 2017.

IBRAM. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Relatório Anual de Atividades – Junho de 2016 a Junho de 2017. 2017. Disponível em: <http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2017/08/WEB_REL_IBRAM_2017.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2018.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 2018. Normais Climatológicas do Brasil: João Monlevade – MG. Precipitação acumulada mensal e anual: 1981 – 2010. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas> Consulta em: 15. Jul. 2018.

GEIPOT, Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, 1981. Pesquisa sobre o Interrelacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias. Estudo sobre Custos dos Usuários, vol. 05. Relatório Final, Brasília.

HILÁRIO, R. Q. Uso de pavimento reciclado adicionado com cimento para uso como reforço de base para rodovias – estudo de caso: BR-120. 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro preto, Ouro Preto, 2016.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios de sustentabilidade. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011.

LANER, D.; CREST, M.; SCHARFF, H.; MORRIS, J. W. F.; BARLAZ, M. A. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, [S. l.], v. 32, p. 498-512, 2012.

LENG, Z.; PADHAN, R. K.; SREERAM, A. 2018. Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt. *Journal of Cleaner Production*, v. 180, p. 682 - 688, 2018.

MEDINA, J. 1997. *Mecânica dos Pavimentos*. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MINA DO ANDRADE. 2019. *Histórico Pluviométrico da Mina do Andrade*. Arquivo Próprio. ArcelorMittal. Bela Vista de Minas, Minas Gerais, 2019.

NIDUMOLU, R.; PRAHALAD, C. K.; RANGASWAMI, M. R. Why sustainability is now the key driver of innovation. *Engineering Management Journal*, [S. l.], v. 41, n. 2, p. 30-37, 2013.

NSA, 2009. *Production and Uses of Blast Furnace Slag in Japan*. Nippon Slag Association, Tokyo.

ODA, S. Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Transportes (Estradas e Aeroportos)) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

PAIGE-GREEN, P.; NETTERBERG, F., 1987. Requirements and Properties of Wearing Course Materials for Unpaved Roads in Relation to their Performance. *Transportation Research Record* 1106, vol. 01, pages 208-214.

PASSETO, M.; BALDO, N. 2010. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 181, Issues 1–3, 15 September 2010, Pages 938-948.

PEACEY, J.G., DAVENPORT, W.G., 1979. *The Iron Blast Furnace. Theory and Practice*. Pergamon Press, Oxford.

PEREIRA, S. S.; CURI, R. C. Modelos de gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos: a importância dos catadores de materiais recicláveis no processo de gestão ambiental. In: LIRA, W. S.; CÂNDIDO, G. A. Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa. Campina Grande: EDUEPB, 2013, pp. 149-172.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Resposta da cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25,n.1,p.201-209, 2001.

PRF. Polícia Rodoviária Federal, 2018. Balanço PRF 2017. Disponível em: <https://www.prf.gov.br/portal/sala-de-imprensa/releases-1/balanco-prf-2017/view>. Acesso em: 23 de setembro de 2018.

RESENDE, P. T. V.; SOUSA, P. R.; CESAR, R. V.; QUINTÃO, A.; FONSECA, F.; FRANCESCHINI, L. (2018). Custos Logísticos no Brasil. Fundação Dom Cabral. 2018. Disponível em: <https://www.fdc.org.br/conhecimento-site/nucleos-de-pesquisa-site/Materiais/pesquisa-custos-logisticos2017.pdf>. Acesso em: 23 de setembro de 2018.

RIVERSON, J. D. N.; SINHA, K. C.; SCHOLER, C. F.; ANDERSON, V. L. 1987. Evaluation of Subjective Rating of Unpaved Country Roads in Indiana. Transportation Research Record 1128, pages 53-61. USA, 1987.

RSMS. Road Surface Management System, 1991. Technology Transfer Center the Hampshire, Department of Civil Engineering, Durham, New Hampshire.

SANTANA FILHO J. N.; SILVA, S. N.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. 2017. Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers With Iron Ore Tailings From Tailings Dams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, p. 04017104-1-04017104-6, 2017.

SANTOS, A. R.; PASTORE, E. L.; AUGUSTO JUNIOR, F. F.; CUNHA, M. A. 1985. Estradas Vicinais de Terra. Manual Técnico para Conservação e Recuperação. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A. (IPT), 2ª edição, São Paulo: IPT, 1985, 129 p.

SANTOS, M. R.; TEIXEIRA, C. E.; KNISS, C. T. A. Avaliação de desempenho ambiental na valorização de resíduos sólidos de processos industriais. *Revista de Administração da UFSM*, Santa Maria, v. 7, p. 75-92, 2014.

SEEBODE, D.; JEANRENAUD, S.; BESSANT, J. Managing innovation for sustainability. *R&D Management*, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 195-206, 2012. SENÇO, W. Manual de técnicas de pavimentação. Vol. 1. 2ª ed. São Paulo: Pini, 2007, 761p.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. Vol. 2. 1ªed. São Paulo: Pini, 1997.

SHI, C., 2004. Steel slag-its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *J. Mater. Civ. Eng.* 16, 230e236.

SOUZA, M. L. Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. 1981. IPR/DNER. 3ª ed. Rio de Janeiro. 1981.

TONIETTO, A.; SILVA, J. J. M. C. Valoração de danos nos casos de mineração de ferro no Brasil. *Revista brasileira de criminalística*, v.1, n.1, pp. 31-38. 2011

TSAKIRIDIS, P.E., PAPANIMITRIOU, G.D., TSIVILIS, S., KORONEOS, C., 2008. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *J. Hazard. Mater.* 152, 805e811

TURNBULL, W.J., FOSTER, C.R. e AHLVIN, R.G., 1962, Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume. Proceedings, 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Michigan.





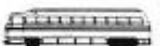











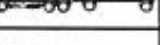
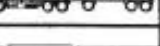
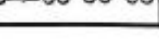
VENZON, J. S.; CHICATTO, J. A.; VEGINI, A. A., TAVARES, L. B. B. Resíduos sólidos industriais e seu potencial para a produção de compósitos – uma revisão de literatura. Disponível em: <http://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=3024>. Acesso em 23 de setembro de 2018.

WALKER, D., 1991. Evaluation and Rating of Gravel Roads. Transportation Research 1291, vol.02, pages 120-125.









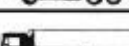
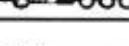








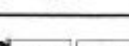
World Bank, 2012. What a waste: a global review of solid waste management Urban Development Series. USA.

World Steel Association. WSA, 2010. BFI Statistics 2010. World Steel Association, Brussel




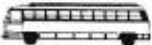
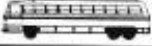










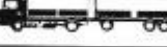
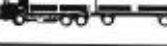
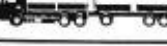

APÊNDICE A

CLASSE / TIPO		CONFIGURAÇÃO	F.V.	TIPOS DE EIXOS				F.V. (VEÍCULOS)
				1º	2º	3º	4º	
VEÍCULOS LEVES	CARROS DE PASSEIO		AASHTO					
			USACE					
	UTILITÁRIOS (PICK-UPS E FURGÕES)		AASHTO					
			USACE					
ÔNIBUS	ÔNIBUS ≅ 2C		AASHTO	0,0164	0,2635			0,280
			USACE	0,02	0,30			0,320
	TRIBUS		AASHTO					
			USACE					
VEÍCULOS COMERCIAIS	CAMINHÃO LEVE (608 e F4000)	2C LEVE 	AASHTO	0,0001	0,0023			0,002
			USACE	0,0002	0,004			0,0042
	CAMINHÕES MÉDIOS E PESADOS	2C 	AASHTO	0,0028	0,0457			0,049
			USACE	0,004	0,05			0,054
		3C 	AASHTO	0,0164	0,0725			0,089
			USACE	0,02	0,20			0,22
		4C 	AASHTO	0,0164	0,2182			0,235
			USACE	0,02	0,92			0,94
	CAMINHÕES COM SEMI-REBOQUE (CARRETAS)	2S1 	AASHTO	0,0164	0,2635	0,2635		0,543
			USACE	0,02	0,30	0,30		0,62
		2S2 	AASHTO	0,0164	0,2635	0,0725		0,352
			USACE	0,02	0,30	0,20		0,52
		2S3 	AASHTO	0,0164	0,2635	0,2182		0,498
			USACE	0,02	0,30	0,92		1,24
		3S2 	AASHTO	0,0164	0,0417	0,0725		0,131
			USACE	0,02	0,10	0,20		0,32
		3S3 	AASHTO	0,0164	0,0417	0,2182		0,276
			USACE	0,02	0,10	0,92		1,04
	CAMINHÕES COM REBOQUE (ROMEU E JULIETA)	2C2 	AASHTO	0,0164	0,2635	0,2635	0,2635	0,807
			USACE	0,02	0,30	0,30	0,30	0,92
		2C3 	AASHTO	0,0164	0,2635	0,2635	0,0417	0,585
			USACE	0,02	0,30	0,30	0,10	0,72
		3C2 	AASHTO	0,0164	0,0417	0,2635	0,2635	0,585
			USACE	0,02	0,10	0,30	0,30	0,72
		3C3 	AASHTO	0,0164	0,0417	0,2635	0,0417	0,363
			USACE	0,02	0,10	0,30	0,10	0,52
	"TREMINHÃO"	3C4 	AASHTO	0,0164	0,0417	0,0417	0,0417	0,142
			USACE	0,02	0,10	0,10	0,10	0,32

APÊNDICE B

CLASSE / TIPO		CONFIGURAÇÃO	F.V.	TIPOS DE EIXOS				F.V. (VEÍCULOS)
				1º	2º	3º	4º	
VEÍCULOS LEVES	CARROS DE PASSEIO		AASHTO					
		USACE						
	UTILITÁRIOS (PICK-UPS E FURGÕES)		AASHTO					
			USACE					
ÔNIBUS	ÔNIBUS ≅ 2C		AASHTO	0,057	0,691			0,748
		USACE	0,050	0,732			0,782	
	TRIBUS		AASHTO					
VEÍCULOS COMERCIAIS	CAMINHÃO LEVE (608 e F4000)	2C LEVE 	AASHTO	0,003	0,046			0,049
			USACE	0,004	0,050			0,054
	CAMINHÕES MÉDIOS E PESADOS	2C 	AASHTO	0,149	1,642			1,791
			USACE	0,100	7,000			7,100
		3C 	AASHTO	0,149	2,807			3,369
			USACE	0,100	7,000			17,438
		4C 	AASHTO	0,149	1,560			1,709
			USACE	0,100	7,800			7,900
	CAMINHÕES COM SEMI-REBOQUE (CARRETAS)	2S1 	AASHTO	0,149	2,394	2,394		4,937
			USACE	0,100	3,500	3,500		7,100
		2S2 	AASHTO	0,149	2,394	1,642		4,185
			USACE	0,100	3,500	7,000		10,600
		2S3 	AASHTO	0,149	2,394	1,560		4,103
			USACE	0,100	3,500	7,800		11,400
		3S2 	AASHTO	0,149	0,978	21,642		2,769
			USACE	0,100	4,000	7,000		11,100
		3S3 	AASHTO	0,149	0,978	1,560		2,687
			USACE	0,100	4,000	7,800		11,900
	CAMINHÕES COM REBOQUE (ROMEU E JULIETA)	2C2 	AASHTO	0,149	2,394	2,394	2,394	7,331
			USACE	0,100	3,500	3,500	3,500	10,600
2C3 		AASHTO	0,149	2,394	2,394	2,394	5,915	
		USACE	0,100	3,500	3,500	3,500	11,100	
3C2 		AASHTO	0,149	0,978	2,394	2,394	11,065	
		USACE	0,100	4,000	3,500	3,500	23,438	
3C3 		AASHTO	0,149	0,978	2,394	2,394	8,431	
		USACE	0,100	4,000	3,500	3,500	24,538	
"TREMINHÃO"	3C4 	AASHTO	0,149	0,978	0,978	0,978	3,083	
USACE	0,100	4,000	4,000	4,000	12,100			

APÊNDICE C

CLASSE / TIPO		CONFIGURAÇÃO	F.V.	TIPOS DE EIXOS				F.V. (VEÍCULOS)	
				1º	2º	3º	4º		
VEÍCULOS LEVES	CARROS DE PASSEIO			AASHTO					
				USACE					
	UTILITÁRIOS (PICK-UPS E FURGÕES)			AASHTO					
				USACE					
ÔNIBUS	ÔNIBUS ≅ 2C			AASHTO	0,327	2,394		2,721	
				USACE	0,300	3,500		3,800	
	TRIBUS			AASHTO					
				USACE					
VEÍCULOS COMERCIAIS	CAMINHÃO LEVE (608 e F4000)	2C LEVE		AASHTO	0,003	0,076		0,079	
				USACE	0,004	0,070		0,074	
	CAMINHÕES MÉDIOS E PESADOS	2C		AASHTO	0,562	4,379		4,941	
				USACE	0,438	7,300		7,738	
		3C		AASHTO	0,562	2,807		3,369	
				USACE	0,438	17,000		17,438	
		4C		AASHTO	0,562	2,696		3,268	
				USACE	0,438	16,500		16,938	
	CAMINHÕES COM SEMI-REBOQUE (CARRETAS)	2S1		AASHTO	0,562	4,379	4,379	9,320	
				USACE	0,438	7,300	7,300	15,038	
		2S2		AASHTO	0,562	4,379	2,807	7,748	
				USACE	0,438	7,300	17,000	24,738	
		2S3		AASHTO	0,562	4,379	2,696	7,637	
				USACE	0,438	7,300	16,500	24,238	
		3S2		AASHTO	0,562	1,745	2,807	5,114	
				USACE	0,438	8,400	17,000	25,838	
		3S3		AASHTO	0,562	1,745	2,696	5,003	
				USACE	0,438	8,400	16,500	25,338	
	CAMINHÕES COM REBOQUE (ROMEU E JULIETA)	2C2		AASHTO	0,562	4,379	4,379	4,379	13,699
				USACE	0,438	7,300	7,300	7,300	22,338
		2C3		AASHTO	0,562	4,379	4,379	1,745	11,065
				USACE	0,438	7,300	7,300	8,400	23,438
		3C2		AASHTO	0,562	1,745	4,379	4,379	11,065
				USACE	0,438	8,400	7,300	7,300	23,438
		3C3		AASHTO	0,562	1,745	4,379	1,745	8,431
				USACE	0,438	8,400	7,300	8,400	24,538
	"TREMINHÃO"	3C4		AASHTO	0,562	1,745	28	1,745	5,797
				USACE	0,438	8,400	8,400	8,400	25,638