

**ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
RDT – Recurso de Desenvolvimento Tecnológico**

RELATÓRIO FINAL

**EXECUÇÃO DE TRECHO EXPERIMENTAL COM O USO DE REJEITOS E
RESÍDUOS DE MINERAÇÃO**

Via 040

28/07/2020

SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO	4
2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS.....	12
2.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	12
2.1.1. Rejeito e Estéril de Minério de Ferro.....	12
2.1.2. Agregados Pétreos	13
2.1.3. Canga de Minério.....	13
2.2. MÉTODO DE ENSAIO	14
2.2.1. Definição das Misturas	14
2.2.2. Ensaio Laboratoriais.....	14
2.2.2.1. Caracterização Geotécnica	15
2.2.2.2. Classificação dos Solos	15
2.2.2.3. Compactação e CBR	16
2.2.2.4. Módulo de Resiliência.....	18
2.2.2.5. Caracterização Ambiental	19
2.2.2.6. Caracterização Química	19
2.3. EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL.....	19
2.3.1. Ensaio de Campo.....	20
2.3.1.1. Densidade <i>in situ</i> pelo Método Frasco de Areia	20
2.3.1.2. Teor de Umidade.....	21
2.3.1.3. DCP (Cone de Penetração Dinâmica).....	22
2.3.1.4. Deflexão Utilizando Viga Benkelman	23
2.3.1.5. Macrotextura do Pavimento	23
2.3.1.6. Microtextura do Pavimento.....	24
2.3.1.7. Teor de Betume e Granulometria do Revestimento	25
3. ETAPAS.....	27
3.1. PRÉ-EXECUÇÃO.....	27
3.2. ETAPA DE EXECUÇÃO	42
3.2.1. Dimensionamento do Pavimento	42
3.2.2. Execução e Controle do Trecho Experimental Instrumentado	48
3.2.3. Controle Tecnológico de Execução	67
3.3. COLETA DE DADOS	74

4. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS	88
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

Título: Execução de Trecho Experimental com o uso de Rejeitos e Resíduos de Mineração.

Resumo: Em atenção aos objetivos deste trabalho foram realizadas investigações em laboratório das características físicas, químicas, mineralógicas, ambientais e mecânicas de estéreis e rejeitos da mineração, provenientes do decapeamento de mina e beneficiamento de minério de ferro, respectivamente. Visando entender o comportamento destes resíduos como materiais de pavimentação, foi executado um trecho experimental na BR 040, especificamente no km 574+400 sentido norte, com extensão de 100 metros, onde estes resíduos foram misturados ao solo, para compor as camadas de sub-base e base do pavimento flexível. Portanto, objetivou-se aplicar resíduos de mineração como insumos para composição de pavimentos, visando a redução do volume destes que, atualmente são dispostos em pilhas e barragens. É sabido que o grande volume de resíduo gerado traz diversos tipos de riscos inclusive social e ambiental, especialmente na região do chamado Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Assim, diversas composições (misturas de resíduos e solos) foram ensaiadas em laboratório, possibilitando constatar-se que o rejeito e estéril, sem adições de outros materiais, não se enquadravam nos parâmetros estabelecidos pelas normas vigentes para a sua aplicação em pavimentação. No contexto apresentado, misturas destes resíduos com solos e brita foram propostos verificando-se que as composições que obtiveram os melhores resultados foram aquelas constituídas em massa de 35% rejeito + 15% estéril + 50% de canga de minério denominada M4 e 35% rejeito + 20% brita 1 + 45% brita 0 (M7), as quais foram empregadas na execução das camadas de sub-base e base, nessa ordem. Para a execução do trecho experimental, foi executada uma caixa no pavimento existente, com 3,20 de largura, 62 cm de profundidade e 100 m de comprimento a qual foi preenchida com as misturas desenvolvidas com a pesquisa de laboratório, permitindo a sua compatibilização com pavimento existente ao longo trecho experimental. Salienta-se que antecedente a execução do trecho foi realizado o dimensionamento do pavimento utilizando as características das misturas citadas, contudo, mesmo que os resultados tenham sido favoráveis, optou-se por empregar no revestimento asfáltico uma geogrelha, devido à alta variabilidade do tráfego desta região e o desconhecimento do comportamento destas misturas em condições reais de campo. Para garantir a qualidade técnica do comportamento levantado em laboratório nas

condições de campo, foi realizado um rigoroso controle tecnológico de cada camada executada, inclusive do revestimento asfáltico. O programa experimental *in situ* envolveu os seguintes ensaios: densidade *in situ* pelo método frasco de areia, umidade natural com o uso do equipamento *speedy*, DCP e medida de deflexão com uso da viga Benkelman. Para o revestimento asfáltico foram realizados os ensaios de macrotextura e microtextura, e em laboratório determinou-se, através da massa asfáltica coletada em campo, a granulometria e o teor de betume presente no CBUQ. Após conclusão do trecho, foram realizadas coletas de dados referentes ao comportamento estrutural do pavimento em termos de tensão, deflexões, módulo de elasticidade e análises da sua qualidade com os ensaios de LWD, FWD e avaliação da condição de superfície do pavimento. Concluiu-se que sobre condições de campo, as misturas, por não estarem confinadas como ocorre no caso de material compactado em cilindro no laboratório, e em função das características geotécnicas, variáveis, dos resíduos, estes apresentam um comportamento com estabilidade bem inferior àquelas propostas em projeto, com base nos resultados de laboratório.

Palavras chaves: resíduos, mineração, pavimentação e trecho experimental.

Justificativas para o desenvolvimento do projeto: Estes estudos visam o aproveitamento de resíduos oriundos da mineração em camadas estruturais de pavimentos asfálticos rodoviários. Para isso, foi projetado e executado com acompanhamento técnico, um trecho experimental ao longo de 100 metros da BR-040, cuja concessão está vinculada à Via 040. Ressalta-se que a rodovia BR-040 corta boa parte do chamado Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais – QF, região que constitui uma das maiores províncias minerais do mundo, com enormes reservas de minérios de ferro, exploradas por grandes conglomerados industriais e inúmeras minerações de pequeno e médio porte, gerando enormes quantidades de resíduos que exigem, assim, projetos alternativos e específicos para a sua disposição ou destino final.

A geração de grandes volumes de resíduos oriundos do processo de extração mineral constitui uma das grandes preocupações ambientais do setor. Em geral, os rejeitos da mineração são comumente armazenados em pilhas ou em barragens de contenção, soluções que demandam grande disponibilidade de área e recursos para implantação e manutenção das estruturas, além de grande potencial impactante ao meio ambiente.

Além da escassez de recursos naturais, a própria exploração de jazidas minerais para a produção de agregados naturais visando aplicação em pavimentos é responsável por significativos impactos ambientais. O destino, pelo menos de parte dos rejeitos de mineração, visando a aplicação em obras de pavimentos constitui uma alternativa sustentável, por abranger não somente a redução de áreas para sua disposição, mas também reduzir a necessidade da utilização dos agregados naturais.

Objetivo geral: O objetivo deste trabalho é prover o estudo da viabilidade técnica de utilização de rejeitos de minério de ferro em camadas estruturais de pavimentos asfálticos rodoviários, por meio da execução de um trecho experimental na BR-040, cuja concessão está vinculada à Via040, localizado na região de Itabirito, devendo o trecho experimental ser monitorado, ao longo de um determinado período para permitir o entendimento do comportamento destes resíduos.

Objetivos Específicos: Estudar, em condições de laboratório, as características químicas, físicas, mineralógicas e mecânicas de rejeito e estéril produzido pela mineração de ferro; execução de um trecho experimental, com comprimento de 100 m, ao longo da BR-040; execução de um monitoramento inicial do trecho experimental executado para avaliar o comportamento das camadas construídas com os resíduos, por meio da determinação do módulo de elasticidade médio do pavimento com uso do LWD e bacias deflectométricas com o uso do FWD, além de análise objetiva. Para tanto busca-se:

- Avançar na investigação do uso de resíduos de mineração como materiais alternativos para serem empregados nas camadas do pavimento, tendo em vista a pouca disponibilidade de áreas de empréstimo em Minas Gerais que possui de licenciamento ambiental para exploração;
- Efetuar a caracterização geotécnica, mineralógica e química dos resíduos provenientes da lavra e beneficiamento do minério de ferro: rejeito e estéril;
- Avaliar o comportamento mecânico dos materiais individualmente e em composições, efetuando os ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia – CBR;

- Definir o local onde será executado o trecho experimental, além de realizar a compatibilização do pavimento existente com o novo a ser executado;
- Executar o trecho experimental aplicando técnicas construtivas de acordo com as normas vigentes, além de o controle tecnológico na execução das camadas;
- Constatar a segurança do pavimento em relação a derrapagem e hidroplanagem, realizando medições de micro e macro textura da superfície;
- Analisar a evolução da capacidade estrutural dos pavimentos, por meio de medições periódicas de deflexões e de levantamentos de bacias deflectométricas com a realização dos ensaios de FWD e LWD;
- Executar uma análise objetiva sobre a superfície do pavimento, visando caracterizar o Índice de Gravidade Global, para estabelecer conclusões a respeito da qualidade do pavimento.
- Consolidar a Rede de Pesquisas Aplicadas à Pavimentação no âmbito da Geotecnia de Pavimentos; e
- Gerar publicações para divulgação dos resultados após a conclusão da pesquisa e devido entendimento do comportamento dos resíduos nas camadas do pavimento.

Organização do trabalho: Este trabalho encontra-se dividido em três grandes etapas: i) Estudos em condições de laboratório dos insumos; ii) Aplicação dos insumos em trecho experimental subsidiado por um rigoroso controle tecnológico de execução e iii) Avaliação das condições estruturais do pavimento ao longo do tempo. Estas etapas podem ser detalhadas conforme a seguir:

Estudos em condições de laboratório dos insumos: Foram utilizados quatro tipos de materiais, sendo eles: rejeito de minério de ferro, estéril de mineração, agregados pétreos (brita 0 e brita 1) e canga de minério. Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, compactação, expansão, *California Bearing Ratio* (CBR), equivalente de areia e triaxial de cargas repetidas. Para o rejeito e estéril, foram executados os ensaios de caracterização química e mineralógica, por meio de difração de raio X e ensaio de qualidade ambiental (solubilização e lixiviação).

Aplicação dos insumos em trecho experimental: Com base nos resultados dos ensaios de laboratório, concebeu-se uma proposta para o pavimento composto por regularização do subleito, sub-base, base e revestimento flexível em CBUQ o qual foi acompanhado tecnicamente e cujo controle tecnológico executivo se deu pelos seguintes ensaios nas camadas granulares do pavimento: densidade *in situ* pelo método frasco de areia, DCP (Cone de Penetração Dinâmica), umidade pelo método do *speedy*, deflexão pelo método da viga Benkelman, e no revestimento macro e micro textura. Na Figura 1.1 é apresentado um fluxograma das atividades desenvolvidas nesta etapa.

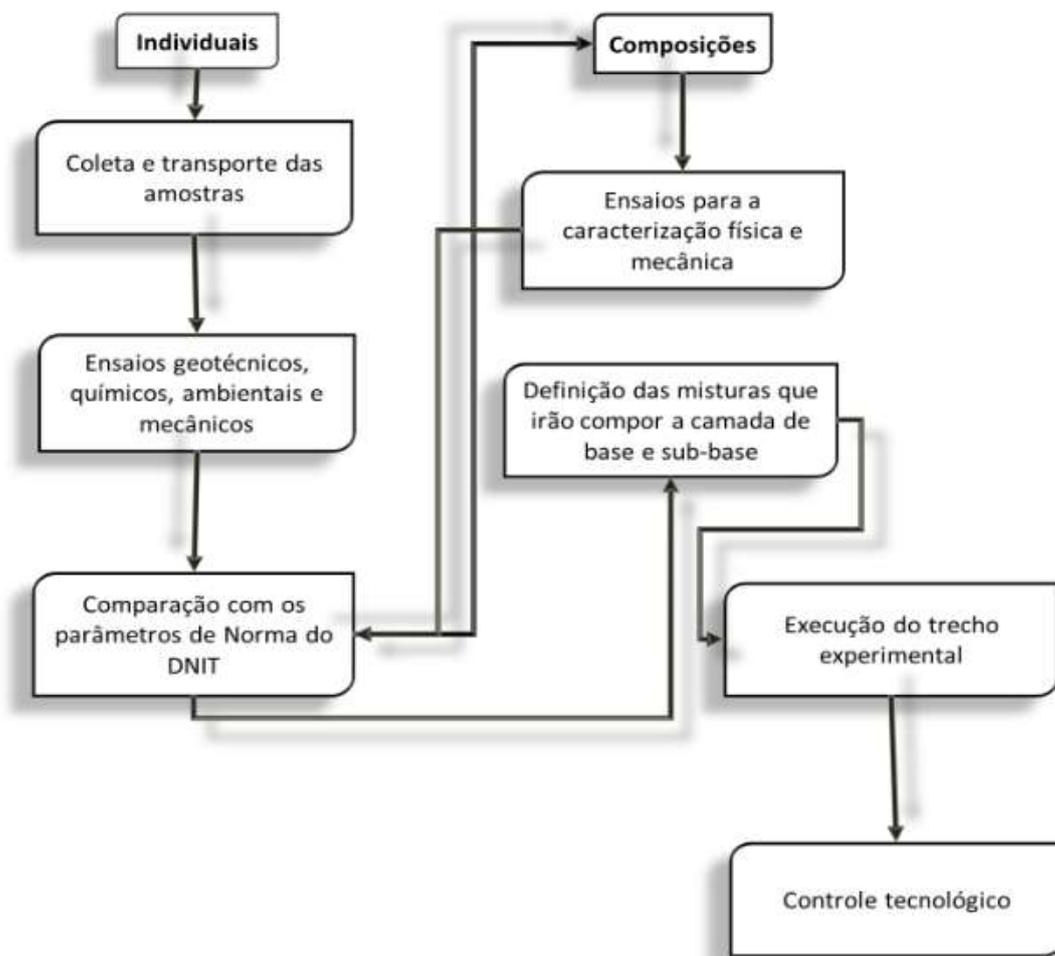


Figura 1.1 - Fluxograma da Pesquisa até a execução do trecho experimental.

Avaliação das condições estruturais do pavimento ao longo do tempo: Para entender como o pavimento se comporta mediante as solicitações de tráfego e, conseqüentemente, avaliar o potencial mecânico dos rejeitos como insumos na pavimentação, foram realizados ensaios de *Light Weight Deflectometer* (LWD) e

Falling Weight Deflectometer (FWD) em diferentes períodos do tempo e condições climáticas, permitindo analisar o módulo de elasticidade médio do pavimento e suas respectivas deflexões também fora executado análise objetiva da superfície do pavimento para aferir condições de severidade do pavimento.

Período de desenvolvimento do projeto: 11/06/2018 a 04/07/2020.

Cronograma de execução:

ATIVIDADE	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Estudos em condições de laboratório dos insumos:	ANO: 2018											
Conhecimento das metodologias dos ensaios						x						
Coleta de amostras							x			x		
Triagem e secagem de amostras							x			x		
Composição das misturas								x		x		
Calibração dos densímetros							x					
Calibração dos Picnômetros							x					
Calibração das Provetas							x					
Ensaio de Granulometria								x	x			
Limites de Consistência										x	x	
Massa esp. dos grãos									x	x	x	
Classificação MCT								x	x			
Equivalente de areia									x			
Compactação e CBR										x	x	
Preenchimento e organização de planilhas												x
	ANO: 2019											
Ensaio químicos	x	X	x	x								
DRX		X	x									
Solubilização			x	x								
Lixiviação				x	x							
Aplicação dos insumos em trecho experimental:												
Aquisição de sensores	x											
Calibração dos sensores			x									
Aquisição de insumos				x								
Execução do trecho experimental					x							
Controle tecnológico da execução					x							
Avaliação das condições estruturais do pavimento ao longo do tempo:												
Aquisição Serviço do serviço de Sinalização e FWD										x	x	x
	ANO: 2020											
Estudo com LWD, FWD e análise Objetiva	x	x	x	x	x	x	x					

Local de execução: Os ensaios geotécnicos foram realizados nos laboratórios da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), NUGEO, Ouro Preto/MG e Laboratório de Pavimentação da Concessionária Via 040, localizado em Nova Lima/MG. Os ensaios químicos e mineralógicos foram realizados na Merieux NutriSciences, unidade localizada em Belo Horizonte/MG e no Laboratório de Física da Universidade Federal de Viçosa/MG.

O trecho experimental foi executado em uma das faixas de rolamento da BR-040, Norte entre os km 300/MG a km 400/MG sob concessão da Via 040 – Invepar. O trecho é mostrado na Figura 1.2.



Figura 1.2 – Local de realização das obras do Trecho Experimental.

Equipe executora:

A seguir lista-se os nomes dos professores, alunos de graduação e mestrado e profissionais da concessionária que foram capacitados bem como o nome das respectivas instituições vinculadas.

Eleonardo Lucas Pereira – NUGEO/UFOP (Coordenador geral);

Lucas Deleon Ferreira – NUGEO/UFOP (Membro);

Romero César Gomes – NUGEO/UFOP (Membro);

Tales Moreira de Oliveira – UFSJ/MG (Coordenador das atividades de campo);
Diego Milli – Via040 (concessionária Via 040 - Invepar);
Aline Ferreira Andalicio – NUGEO/UFOP (Aluna de mestrado: Bolsista RDT);
Bruno Oliveira Silva – (Aluno de mestrado: Bolsista RDT);
Ana Luíza Silva Santos Félix – (Aluna de graduação da UFOP: Bolsista RDT);
Iara Santana de Azevedo – (Aluna de graduação da UFOP: Bolsista RDT);
Karina Marques Maciel Silva – (Aluna de graduação da UFOP: Bolsista RDT);
Letícia Alves Arantes – (Aluna de graduação da UFOP: Bolsista RDT);
Anderson Gonçalves de Azevedo – (Aluno de graduação da UFOP: Bolsista RDT);
André Gonçalves de Azevedo – (Aluno de graduação da UFOP: Bolsista RDT);
Gustavo Pereira Viana – (Aluno de graduação da UFOP: Bolsista RDT);
Lucas Moreira Araújo – (Aluno de graduação da UFOP: Bolsista RDT);
Túlio Pena da Silva – (Aluno de graduação da UFSJ: Bolsista RDT); e
Matheus Vidigal Pinto – (Aluno de graduação da UFSJ: Voluntário).

2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

2.1. MATERIAIS UTILIZADOS

2.1.1. Rejeito e Estéril de Minério de Ferro

Os resíduos estudados são provenientes da empresa Ferro + Mineração, do grupo J. Mendes, localizada nos municípios de Congonhas e Ouro Preto, estado de Minas Gerais. Tal empresa tem como foco a extração, beneficiamento e comercialização de minério de ferro. Os resíduos foram obtidos de forma amostral, conforme Figura 2.1.



Figura 2.1 – Coleta de estéril e rejeito proveniente da extração de minério de ferro.

Tais amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e enviadas ao laboratório da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e ao laboratório de pavimentação da Concessionária Via 040.

Ensaio preliminares constataram que tais resíduos não apresentam características propícias para emprego nas camadas do pavimento flexível. Diante disso, tornaram-se necessários a incorporação de outros materiais, provenientes da mesma região, objetivando o enquadramento destes aos requisitos de norma para a sua aplicação. Assim, foram coletados agregados pétreos e canga de minério, também estudados.

2.1.2. Agregados Pétreos

Os agregados pétreos, especificamente brita 0 e brita 1, foram provenientes da Pedreira Irmãos Machado, situada em Ouro Preto/MG. A Figura 2.2 ilustra estes materiais.



Figura 2.2 - Britas graduadas.

2.1.3. Canga de Minério

Este material foi obtido por meio da abertura de janelas de inspeção, ao longo do trecho escolhido para construção da pista experimental, objetivando aproveitar o material já presente na pista e diminuindo o volume de bota-fora, conforme pode ser visualizado na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Janela de inspeção – Coleta de material do subleito.

2.2. MÉTODO DE ENSAIO

A seguir estão descritas as metodologias e técnicas empregadas no desenvolvimento dos ensaios de caracterização geotécnica, física, química e mecânica dos materiais utilizados, bem como das técnicas e controles construtivos aplicados na execução do trecho experimental.

2.2.1. Definição das Misturas

Inicialmente foram verificadas as características individuais dos materiais (rejeito, estéril, agregados pétreos e canga de minério). A partir destas, foram proporcionadas diferentes composições variando as porcentagens dos materiais para atendimento as prescrições normativas quanto a sua aplicação nas camadas de base e sub-base com objetivo ainda de inserir a maior quantidade possível de rejeito nas misturas propostas.

Assim, foram realizadas as composições demonstradas na

Tabela 2.1 abaixo.

Tabela 2.1 - Misturas realizadas com o emprego de rejeito e estéril

DESCRIÇÃO	IDENTIFICAÇÃO
80% Estéril+20% Rejeito	M1
70% Estéril+30% Rejeito	M2
60% Estéril+40% Rejeito	M3
35% Rejeito + 15% Estéril + 50% Canga de Minério	M4
15% Estéril+25% Brita1+35% Brita0+ 25% Pó de pedra	M5
15% Rejeito+25% Brita1+35% Brita0+ 25% Pó de pedra	M6
35% Rejeito+ 20% Brita1 + 45% Brita0	M7

A definição das misturas potenciais de aplicação se basearam, no atendimento as normas em relação a granulometria e estabilidade medida no ensaio de CBR além da expansão.

2.2.2. Ensaio Laboratoriais

Os ensaios foram realizados em conformidade com as prescrições descritas pelas normas DNIT e da ABNT, com o intuito de verificar as características dos materiais.

2.2.2.1. Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica dos materiais empregados neste trabalho foi realizada nos laboratórios da Via 040 e NUGEO/UFOP. Cujas caracterizações foram desenvolvidas aplicando os procedimentos descritos nas normas ABNT, conforme destacado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Normas utilizadas para caracterização física dos materiais

NORMA	DESCRIÇÃO
NBR 6457/2016	Amostra de Solos - Preparação de Compactação e Caracterização
NBR 6457/2016	Teor de Umidade Natural
DNER-ME 093/94	Determinação da densidade real dos Solos
NBR 7181/2016	Solo - Análise Granulométrica.
NBR 6459/2016	Solo - Determinação do Limite de Liquidez;
NBR 7180/2016	Solo - Determinação do Limite de Plasticidade;

Fonte: Dados da pesquisa.

Ainda, o mosaico da Figura 2.4 faz uma ilustração geral destes ensaios.



Figura 2.4 – Vista dos ensaios de caracterização dos materiais.

2.2.2.2. Classificação dos Solos

Sequencialmente, após o desenvolvimento dos ensaios de caracterização geotécnica realizou-se a classificação destes materiais segundo a metodologia da antiga HRB (*Highway Research Board*), hoje TRB (*Transportation Research Board*). Também foram desenvolvidos os ensaios de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão relativas a metodologias para classificação do solo MCT, proposta por Nogami e Villibor. Para tanto, seguindo orientações normativas do DNIT, trabalhou-se com as normas DNER-ME 258/1994 - Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV e DNER-ME 256/1994 - Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão, com o objetivo de regulamentar a execução dos ensaios.

Os ensaios foram executados no laboratório de solos da UFOP, conforme ilustrado na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Ensaio de compactação Mini-MCV.

2.2.2.3. Compactação e CBR

Os ensaios de compactação foram executados para as misturas e os diferentes tipos de materiais estudados, de acordo com os procedimentos da norma NBR 7182 (ABNT, 1986) e DNER-ME 162/1994. As energias de compactação empregadas foram normal, intermediária e modificada, a depender em qual camada o material/composição estava sendo previsto para uso. Para a camada de base empregou-se energia modificada, para camada de sub-base energia intermediária e subleito a energia normal.

As curvas de compactação referentes às misturas para a camada de base e do solo, proveniente do subleito, foram executadas no laboratório de pavimentação e solos da Via 040. Os demais ensaios foram realizados nos laboratórios da UFOP.

Concomitante à realização das curvas de compactação, foram realizados os ensaios de expansão e CBR, isto é para cada ponto compactado para a curva de compactação foi realizado a determinação do ISC (Índice de Suporte Califórnia) e sua expansão, aproveitando o mesmo corpo de prova da curva de compactação, conforme ilustrações a seguir, representadas nas Figuras 2.6 e 2.7, ou seja foi realizado o CBR 5 pontos.



Figura 2.6 - Ensaio de compactação para determinação dos parâmetros ótimos da compactação.



Figura 2.7 - Ensaio de Expansão e CBR

Conforme mencionado anteriormente os cinco corpos de prova executados no ensaio de compactação, para cada material/mistura, foram levados a um tanque de imersão, onde ficaram por aproximadamente 4 dias (96 horas). Durante esse período foram realizadas leituras de expansão a cada 24 horas. Após cada corpo de prova foi retirado da imersão e levado a prensa para determinação do CBR, conforme ilustrado na Figura 2.7. Importante ressaltar que todas as metodologias adotadas neste ensaio foram de acordo com a Norma NBR 9895/2016 e DNIT 172/2016-ME.

2.2.2.4. Módulo de Resiliência

A norma DNIT 134/2010 – ME descreve os procedimentos adotados para determinação do Módulo de Resiliência (MR) dos solos, sendo obtido através da relação entre a tensão desvio aplicada sistematicamente no corpo de prova e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente, conforme demonstrado na Equação 2.1

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

MR – Módulo Resiliente, em kPa;

σ_d - tensão desviadora aplicada repetidamente, em kPa;

ϵ_r - deformação específica vertical resiliente

O ensaio foi realizado pela empresa Pattrol, sediada em Belo Horizonte, MG. Deve-se destacar que o ensaio de MR foi realizado somente para os resíduos de mineração e para as misturas escolhidas (M4 e M7) para emprego no trecho experimental. A Figura 2.8 ilustra o momento anterior e posterior a execução do ensaio para a mistura M7, composta por rejeito, brita 0 e brita 1.



Figura 2.8 - Ensaio de Módulo de resiliência na composição M7.

2.2.2.5. Caracterização Ambiental

Os materiais objetos desta pesquisa foram submetidos a ensaios químicos, realizados pela Merieux NutriSciences, observando os requisitos das normas vigentes, sendo elas:

- NBR 10.004/2004 – Classificação de Resíduos Sólidos;
- NBR 10.005/2004 – Lixiviação de Resíduos Sólidos;
- NBR 10.006/2004 – Solubilização de Resíduos Sólidos.

2.2.2.6. Caracterização Química

Para a caracterização química dos rejeitos e estéreis de mineração e determinação dos elementos químicos e minerais que os compõe, foi utilizado o Espectrômetro de Fluorescência cujos ensaios foram executados no Laboratório da Merieux NutriSciences, nas amostras de resíduos, permitindo uma análise qualitativa da composição química destes. Enquanto a determinação mineralógica se deu através do ensaio de Difração de Raio-X (DRX). Os ensaios de DRX das amostras de rejeito e estéreis foram executadas no Laboratório do Departamento de Física da UFV (Universidade Federal de Viçosa), utilizando o equipamento D8-Discover.

2.3. EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

A execução do trecho experimental foi realizada conforme as normativas constantes Tabela 2.3 a seguir.

Tabela 2.3 - Normas utilizadas para execução do trecho experimental

Atividade	Norma	Observação
Abertura da caixa	-	100 m de extensão x 3,5 m de largura x 0,62 m de profundidade
Regularização do subleito	DNIT 137/2010 – ES	-
Execução da sub-base	DNIT 137/2010 – ES	Misturas da composição M4 e M7 realizadas em Usina de solos
Execução da base	DNIT 141/2010-ES	
Imprimação	DNIT 144/2014-ES	Emulsão utilizada: CM-30
Pintura de ligação	DNIT 145/2012	Realizada após imprimação e entre as duas camadas de revestimento
Revestimento asfáltico	DNIT 031/2006 – ES	CBUQ utilizado: CAP 30/45 Faixa B
Geogrelha	Especificações do fabricante	Modelo: Haltelit C40/17 - Huesker

Salienta-se que foram necessários sete dias para a completa execução do trecho experimental.

2.3.1. Ensaios de Campo

2.3.1.1. Densidade *in situ* pelo Método Frasco de Areia

Este ensaio é normatizado pela DNER-ME 092/1994, o qual possibilita a obtenção da massa específica aparente *in situ* de solos provenientes do subleito e das demais camadas do pavimento. Importante ressaltar que, correlacionando este valor com a massa específica ótima de laboratório obtém-se o Grau de Compactação (GC) da camada ensaiada.

Desta forma, após a compactação de cada camada, foram realizados ensaios a fim de constatar se o $GC \geq 100\%$ para aceitação do serviço. A Figura 2.9 ilustra o procedimento na execução do trecho experimental.



Figura 2.9 - Ensaio de densidade *in situ* pelo método frasco de areia na camada de base

2.3.1.2. Teor de Umidade

A determinação da umidade em campo foi realizada com metodologia denominada “*Speedy*”, a qual trabalha com medida de pressão em uma câmara por gás desprendido por reação de carbureto com água livre presente no solo. Todas as metodologias adotadas foram de acordo com a norma DNER – ME 052/1994. A Figura 2.10 ilustra o processo de determinação.



Figura 2.10 - Determinação da Umidade pelo método do *Speedy*.

2.3.1.3. DCP (Cone de Penetração Dinâmica)

Outra etapa da campanha experimental foi à execução do ensaio DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) em cada camada granular do pavimento. Desta forma, este ensaio teve por objetivo determinar o CBR *in situ* através da aplicação das correlações elaboradas pela ASTM 6951M-18.

As equações devem ser utilizadas em função da classificação dos solos, utilizando a metodologia SUCS ou HRB. A Equação 2.2 pode ser utilizada para qualquer tipo de solo, exceto para materiais tipo CL. A Equação 2.3 é indicada para solos tipo CL. Por sua vez, solos classificados como CH recomenda-se utilizar a Equação 2.4.

$$CBR(\%) = \frac{292}{DN^{1,12}} \quad \text{Equação 2.2}$$

$$CBR(\%) = \frac{1}{(0,017019 \times DN)^2} \quad \text{Equação 2.3}$$

$$CBR(\%) = \frac{1}{0,002871 \times DN} \quad (3) \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde:

DN: Penetração acumulada, em mm, dividido pelo número de golpes.

Para isso, foram anotados os valores de quantidade de golpes e penetração em milímetros em cada ensaio realizado. A Figura 2.11 demonstra a execução do ensaio na pista em estudo.



Figura 2.11 - Ensaio de DCP no subleito.

2.3.1.4. Deflexão Utilizando Viga Benkelman

A viga Benkelman é utilizada para determinação de deflexões do pavimento sob condições de carregamento. Para execução do ensaio foi empregado a norma DNER-ME-24/1994 e DNER-ME 133/2010. A execução deste ensaio é demonstrada na Figura 2.12, a seguir.



Figura 2.12 – Ensaio de deflexão no subleito

2.3.1.5. Macrotextura do Pavimento

De acordo com Bernucci et.al. (2010) um dos aspectos que devem ser avaliados quanto à segurança dos pavimentos rodoviários é o atrito pneu-pavimento, sobretudo em dias chuvosos, que envolve a mensuração da resistência a derrapagem.

Nesse contexto, o ensaio de mancha de areia tem por finalidade avaliar a macrotextura do pavimento, ou seja, define o tipo de superfície do revestimento asfáltico quanto à

capacidade de drenabilidade da água contida entre o pneu e o pavimento, além de determinar a distância média entre os agregados aflorados na superfície do pavimento (DNIT 2006).

Os procedimentos adotados na execução desse ensaio foram de acordo com a norma ASTM E 965-96. Na Figura 2.13 é demonstrado o ensaio executado na pista experimental.



Figura 2.13 - Ensaio de mancha de areia realizado na pista experimental

2.3.1.6. Microtextura do Pavimento

Para avaliação da microtextura do pavimento, o Manual de Restauração do DNIT (2006) determina a utilização do equipamento Pêndulo Britânico, e adoção dos procedimentos da norma ASTM E 303-93. Assim, esse ensaio permite avaliar a redução de energia cinética em função do atrito da base de borracha com a o pavimento molhado.

Na Figura 2.14 é apresentado o ensaio executado no revestimento asfáltico do trecho experimental.



Figura 2.14 - Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental

2.3.1.7. Teor de Betume e Granulometria do Revestimento

Para determinação do teor de betume e granulometria da massa asfáltica aplicada em pista, foi realizada a coleta de aproximadamente 2000 g de amostra. Esse material foi acondicionado em uma caixa de papelão e enviado ao laboratório de pavimentação e solos da via 040. Posteriormente, o material foi levado à estufa com temperatura variando de 105 a 110 ° C, a fim de melhorar a trabalhabilidade da mistura. Em seguida foi quarteado (Figura 2.15), inserido em duas “Gaiolas de aço” e pesado.



Figura 2.15 - Quarteamento da amostra

Estas foram inseridas dentro do Forno NCAT a uma temperatura variando de 500 a 600°C. Este forno tem por objetivo realizar a queima somente do betume, restando

apenas os agregados. O ensaio durou cerca de aproximadamente 1 hora e 20 minutos. Retirou-se o conjunto da estufa e esperou por alguns minutos até que amostra estivesse totalmente fria (Figura 2.16).



Figura 2.16 - Amostra depois do processo de extração de betume

3. ETAPAS

3.1. PRÉ-EXECUÇÃO

Os estudos associados à etapa de “Pré-execução”, tiveram como objetivo estudar a viabilidade técnica de utilização de rejeitos e estéreis de minério de ferro em infraestrutura de pavimentos, ou seja, nas camadas de sub-base e base. Esta etapa ocorreu em laboratório e foi realizada com rejeitos disponibilizados pela empresa Ferro + Mineração, resultantes do processo de beneficiamento do minério de ferro para obtenção de ferro concentrado.

Estes resíduos por si só não atenderam aos parâmetros mínimos e foram propostas diferentes misturas conforme apresentado na metodologia (item 2.2.1). A Tabela 3.1, com dados anteriormente apresentados, mostra porcentagens de cada material aplicado e estudado. Os estudos de laboratório se deram em relação a geotecnia de pavimentação, química ambiental e mineralogia cujos resultados serão apresentados na sequência.

Tabela 3.1 - Misturas realizadas com o emprego de rejeito e estéril

DESCRIÇÃO	IDENTIFICAÇÃO
80% Estéril+20% Rejeito	M1
70% Estéril+30% Rejeito	M2
60% Estéril+40% Rejeito	M3
35% Rejeito + 15% Estéril + 50% Canga de Minério	M4
15% Estéril+25% Brita1+35% Brita0+ 25% Pó de pedra	M5
15% Rejeito+25% Brita1+35% Brita0+ 25% Pó de pedra	M6
35% Rejeito+ 20% Brita1 + 45% Brita0	M7

Na Tabela 3.2 são apresentados os ensaios de massa específica dos grãos para as amostras em estudo. Verifica-se que o rejeito e estéril apresentaram uma massa específica elevada, tendo em vista a presença de óxido de ferro em maior proporção nestes materiais.

Tabela 3.2 - Resultado de massa específica

Material	Massa específica (g/cm³)
Estéril	2,978
Rejeito	2,783
M1	2,897
M2	2,867
M3	2,835

Em relação a granulometria destes materiais verifica-se que o estéril apresenta uma granulometria com predominância argilo – siltosa com aproximadamente 74% dos grãos passante na peneira de 0,075 mm, sendo verificado uma presença de 45% de argila, 25% de areia, 21% de silte e 9% de pedregulho.

A curva granulométrica obtida para o rejeito indica nenhuma porcentagem de agregado graúdo e em maior proporção o Silte com 57% e a areia com 37%.

Além disso para todas as composições procedeu-se a determinação da distribuição granulométrica. Cujo resultado é apresentado na Figura 3.1.

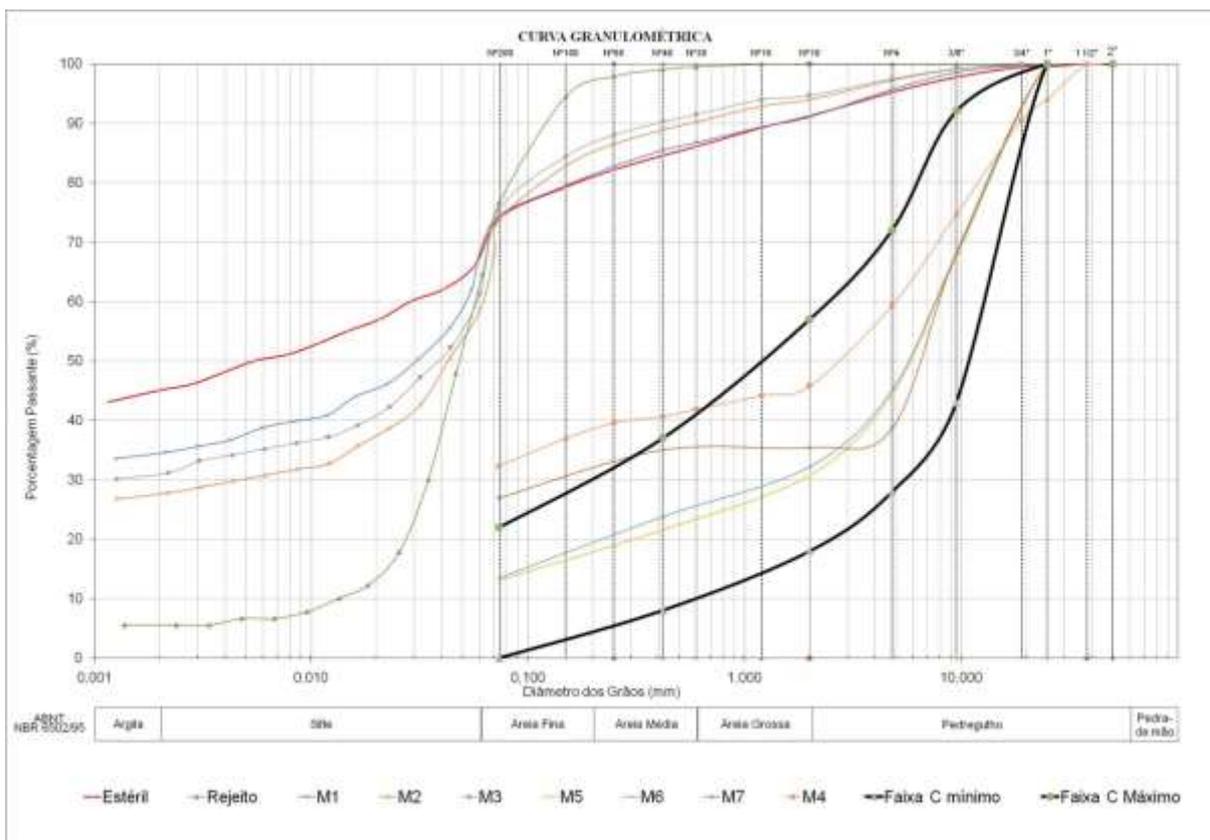


Figura 3.1 - Curvas granulométricas dos materiais estudados

Em relação ao estado de consistência para os insumos e misturas, a seguir são apresentados os resultados da Tabela , os resultados de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade.

Tabela 3.3 - Resultados de Limites de Atteberg

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Estéril	58	39	19
Rejeito	NL	NP	-
M1	35	26	9
M2	NL	NP	-
M3	NL	NP	-
M4	NL	NP	-
M5	NL	NP	-
M6	NL	NP	-
M7	NL	NP	-

Verifica-se que o estéril tem uma elevada plasticidade, devido a presença de argila em maior porcentagem. Por sua vez, o rejeito não apresenta LL e LP, em função da sua constituição silto-arenosa, confirmada no ensaio de granulometria.

Os agregados (Brita 0 e Brita 1), foram levados aos ensaios de Abrasão Los Angeles conforme demonstrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Resultados do Ensaio de Abrasão Los Angeles

Amostra	Peso inicial(g)	Peso final (g)	Abrasão Los Angeles (%)
Brita 0	5000	3875	23
Brita 1	5000	3830	23

Os resultados obtidos têm relação direta ao desempenho destes na composição das misturas, visto que, quanto menor abrasão, maior será a estabilidade destes quanto aos desgastes ao longo da vida útil do pavimento. Logo, os resultados denotam viabilidade técnica para o emprego destes agregados, brita 0 e brita 1 na construção do trecho experimental, especificamente na camada e base.

Com os resultados da caracterização geotécnica foi possível realizar a classificação destes segundo a TRB, cujos resultados constam na Tabela 3.5:

Tabela 3.5 - Classificação TRB

Material	IG	Classificação TRB
Estéril	15	A-7-5
Rejeito	8	A-4
M1	8	A-4
M2	8	A-4
M3	8	A-4
M4	0	A-2-4
M5	0	A-1-b
M6	0	A-1-b
M7	0	A-1-b/A-2-4

Observa-se que o estéril foi classificado em A-7-5, que corresponde a um solo argiloso de comportamento previsto, para emprego em pavimentação, de fraco a pobre. O rejeito e as composições M1, M2 e M3 classificaram-se como A-4, tendo também um comportamento de fraco a pobre.

Contudo, as misturas M4 a M7 apresentaram uma previsibilidade de comportamento de excelente a bom, variando de pedra britada a areia siltosa.

Para as camadas de base e sub-base do pavimento é necessário que o Índice de Grupo seja igual a zero, desta forma, somente as misturas M4, M5, M6 e M7 se enquadram nesse parâmetro.

Tendo em vista o caráter laterítico dos materiais e misturas estudados e, por isso existir a possibilidade da classificação TRB não refletir de fato o seu comportamento como material de pavimentação, apresenta-se a seguir os resultados para as propostas de Nogami e Villibor (1995), em relação a classificação MCT.

A Tabela 3.6 apresenta os parâmetros obtidos da parte fina dos materiais ensaiados. Destaca-se que o coeficiente c' , correlaciona-se com a argilosidade do solo, enquanto o coeficiente e' , representa o caráter laterítico do solo.

Tabela 3.6 - Resultados dos ensaios de MCT

Amostra	c'	PI	d'	e'	Índice MCT
Estéril	1,94	0,35	60,97	0,88	LG'
M1	1,33	0	57,42	0,7	LA'G'
M2	1,25	0,18	48,24	0,84	LA'G'
M3	0,77	60	33,47	1,06	LA'

A parte fina do estéril é classificada em LG', designado como solo argiloso laterítico. Já a composição M1 e M2 são classificadas em LA'G' solo areno-argiloso laterítico e a mistura M3 em LA' areia laterítica, segundo atualizações propostas a classificação original de Nogami e Villibor.

Visando o emprego e o entendimento do comportamento geotécnico dos resíduos e misturas em termos dos parâmetros de compactação inicialmente, realizou-se para as amostras de resíduos de mineração, compactações aplicando as energias normal, intermediária e modificada. Na Tabela 3.7 é apresentado um resumo dos resultados obtidos e na Figura 3.2 e 3.3 as curvas de compactação obtidas para cada resíduo de mineração.

Tabela 3.7 - Resultados dos ensaios de compactação dos resíduos de mineração

Amostra	Energia	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	Umidade ótima (%)
Estéril	Normal	1,621	26,85
	Intermediária	1,658	25,2
	Modificada	1,731	23,7
Rejeito	Normal	1,843	14,66
	Intermediária	1,883	13,9
	Modificada	1,913	12,2

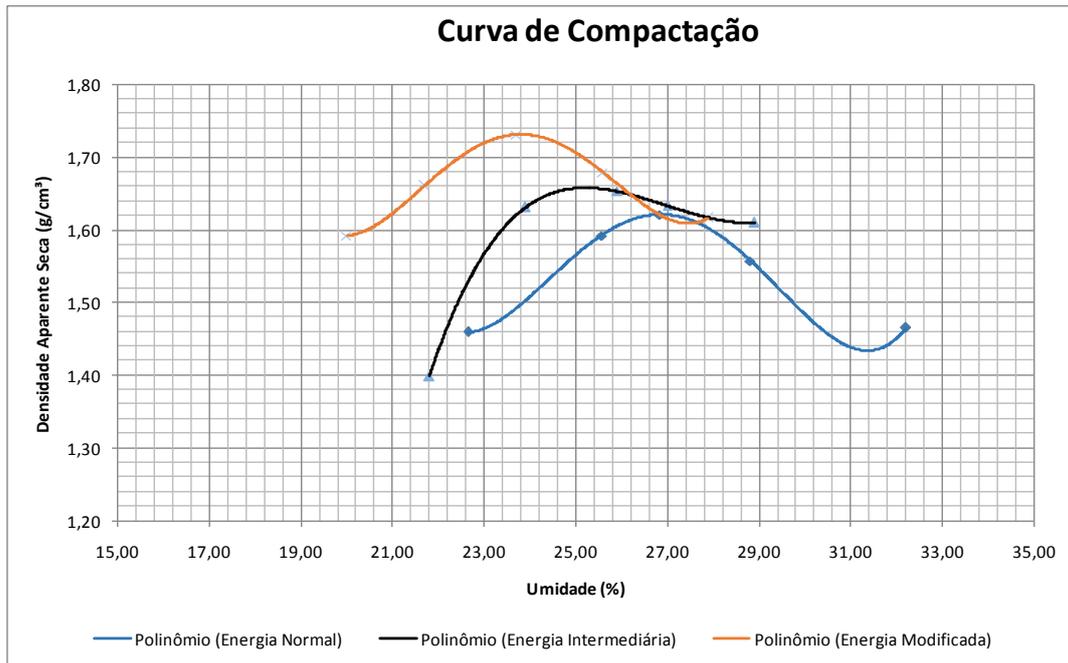


Figura 3.2 - Curvas de compactação – Estéril

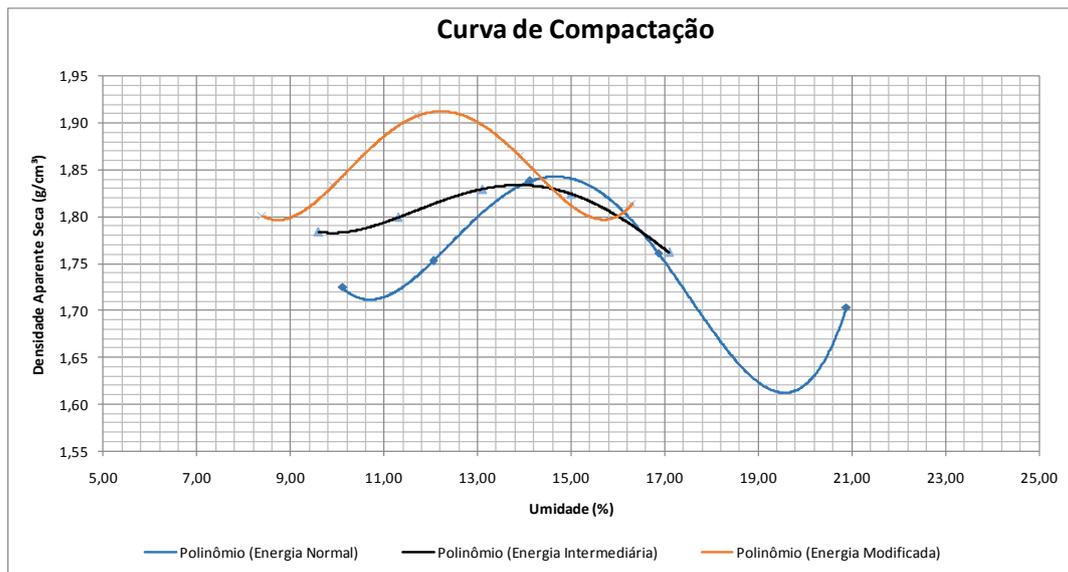


Figura 3.3 - Curvas de compactação – Rejeito

Na Tabela 3.8 são apresentados os resumos dos resultados para determinação da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima para as misturas e material do subleito.

É importante destacar que foram coletadas duas amostras em campo da canga de minério, material proveniente do subleito. Diante disso, foram realizados ensaios de compactação para cada amostra a fim de obter valores medianos de densidade e umidade.

Tabela 3.8 - Resultados dos ensaios de compactação - Composições

Amostra	Energia	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)	Umidade ótima (%)
M1- 80%L-20%R	Intermediário	1,804	21,3
	Modificada	1,819	20,5
M2 - 70% E-30%R	Intermediário	1,855	19,9
	Modificada	1,908	18,7
M3 - 60% E-40%R	Intermediário	1,894	18,4
	Modificada	1,94	16,8
M4 - 30%R-15%E-50%Canga de minério	Intermediário	2,379	9,55
M5 - 15% E-25%B1-35%B0-25%Pó	Modificada	2,076	12,8
M6 - 15% R-25%B1-35%B0-25%Pó	Modificada	2,165	6,2
M7 - 35%R+20%B1+45%B0	Modificada	2,220	6,08
Canga de minério 1 – Subleito	Normal	2,816	7,7
Canga de minério 2 – Subleito	Normal	2,808	9,9

Constatou-se que o aumento da energia de compactação e da porcentagem de rejeito nas misturas M1, M2 e M3 ocasionou uma diminuição da umidade e aumento da densidade devido aumento do caráter granular dado ao material. Para a mistura M4, foi realizado somente o ensaio aplicando a energia intermediária, devido a quantidade de material

disponível e sua aplicação final, que era a sub-base. Para as misturas M5, M6 e M7 foi aplicada somente a energia modificada, pois o intuito dessas misturas era o emprego na camada de base.

Na Figura 3.4 são apresentados os gráficos de compactação, aplicando a energia intermediária, para as composições M1, M2, M3 e M4. Na Figura 3.5 são apresentados os gráficos de compactação, neste caso aplicando a energia modificada, para as composições.

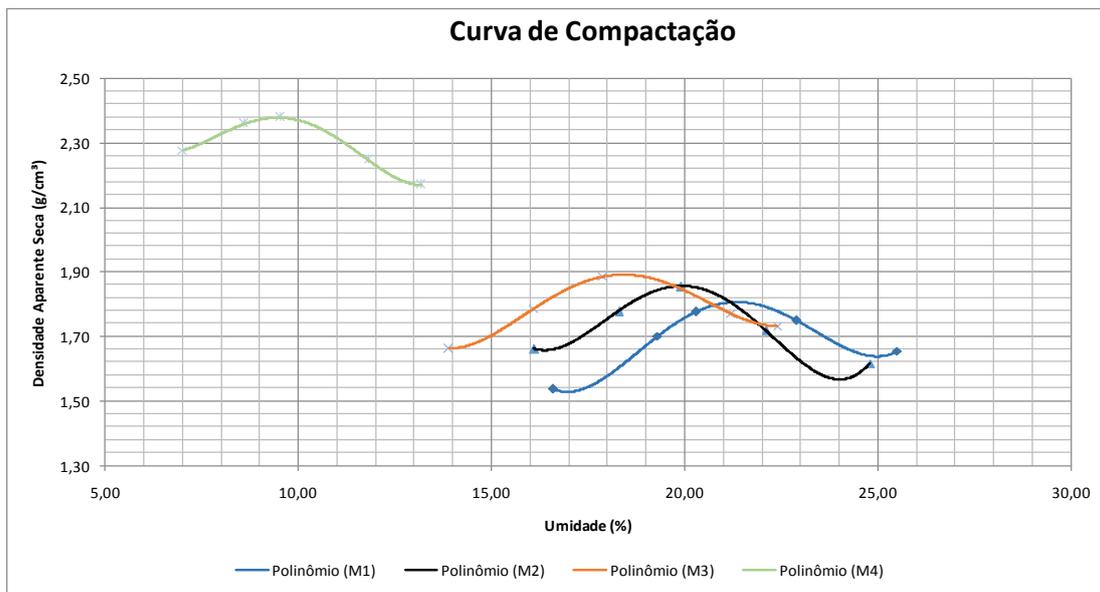


Figura 3.4 - Energia Intermediária – Misturas

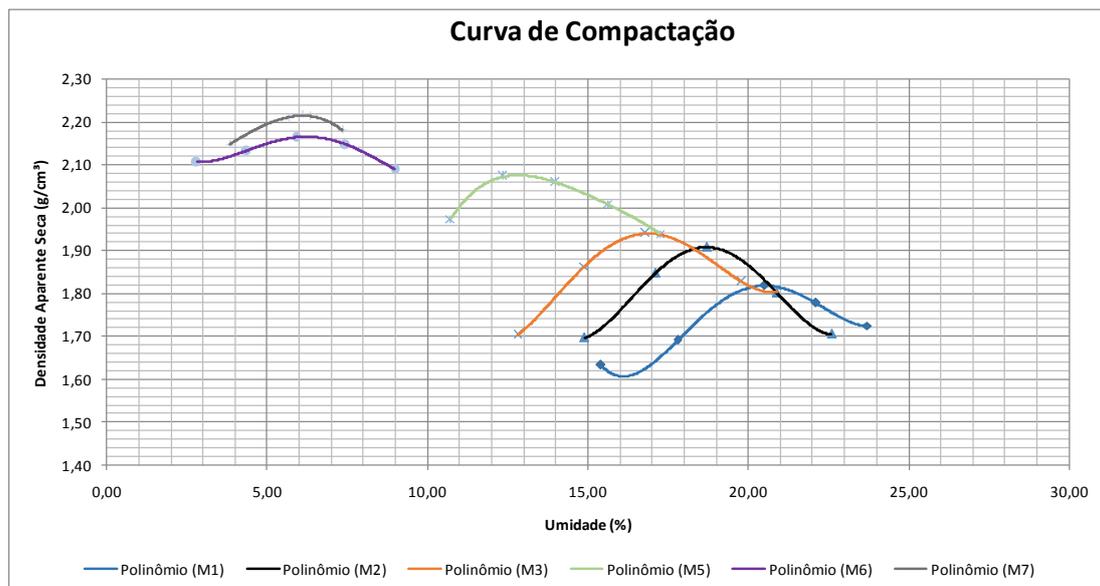


Figura 3.5 - Curvas de compactação - Energia Modificada

Na sequência a Tabela 3.9 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de CBR, para os resíduos estudados.

Tabela 3.9 - Resultados dos ensaios de CBR e Expansão - Resíduos

Amostra	Energia	Expansão (%)	CBR (%)
Estéril	Normal	0	27,1
	Intermediária	0	29,3
	Modificada	0,05	32,1
Rejeito	Normal	0,15	23
	Intermediária	0,38	17,5
	Modificada	0,38	26,4

Observa-se que com o aumento da energia de compactação há um aumento do índice de suporte Califórnia (ISC) ou CBR. Percebe-se que em todas as energias o estéril apresenta um CBR acima daquele estipulado para a camada de sub-base. Contudo os resultados não atendem os requisitos para aplicação em camada de base, conforme demonstrado nas Figura 3.6 e 3.7.

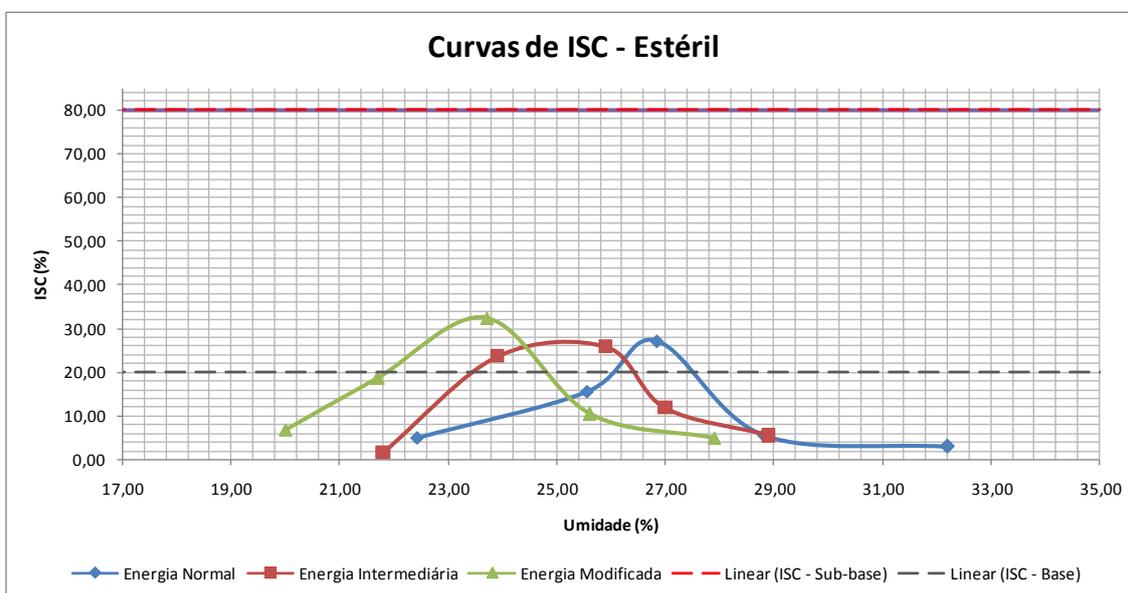


Figura 3.6 - Curvas de ISC – Estéril

Os estudos de compactação utilizando o rejeito é apresentado na Figura 3.7.

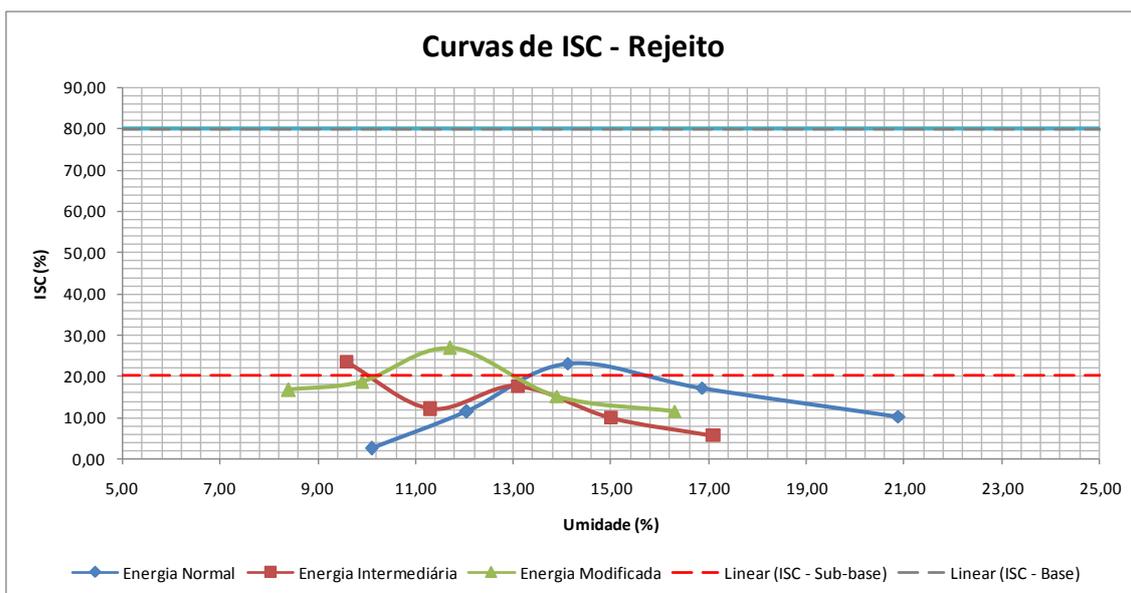


Figura 3.7 - Curvas de ISC - Rejeito

Ainda, na Tabela 3.10 são apresentados o resumo dos resultados de CBR e expansão para as misturas e o material de subleito também estudado.

Tabela 3.10 - Resultados de expansão e CBR - Composições

Amostra	Energia	Expansão (%)	CBR (%)
M1	Intermediário	0,04	30
	Modificada	0,02	31,3
M2	Intermediário	0,04	33
	Modificada	0,04	37,6
M3	Intermediário	0,03	23,4
	Modificada	0,03	56,3
M4	Intermediário	0,4	34
M5	Modificada	0	118
M6	Modificada	0	128
M7	Modificada	0	219,8
Canga de minério 1 - Subleito	Normal	0	43
Canga de minério 2 - Subleito	Normal	0	39

Verifica-se que os resultados de CBR e expansão obtidos em função da umidade ótima e densidade máxima seca para as misturas M1, M2 e M4 foram satisfatórios para o uso na sub-base, exceto a mistura M3 que apresentou resultados incoerentes. As misturas M5, M6 e M7 também apresentaram resultados acima daqueles estipulados para a camada de base.

Em função dos resultados dos ensaios realizados, escolheu-se duas misturas, uma para a base e outra para a sub-base, a fim de compor o trecho experimental. Desta forma, na Tabela 3.11 são demonstrados quais os materiais atendem as prescrições normativas para aplicação nas camadas citadas.

Tabela 3.11 - Escolha das misturas para camada de sub-base

Material	Parâmetros da camada de Sub-base		
	IG	CBR	Expansão
Estéril		x	x
Rejeito			x
M1 - 80%L-20%R		x	x
M2 - 70%L-30%R		x	x
M3 - 60%L-40%R			x
M4 - 30%R-15%E-50%Canga de minério	x	x	x
M5 - 15% E-25%B1-35%B0-25%Pó	x	x	x
M6 - 15% R-25%B1-35%B0-25%Pó	x	x	x
M7 - 35%R+20%B1+45%B0	x	x	x

Buscando aplicar as misturas com maior quantidade de resíduos optou-se pelas misturas M4 e M7, para aplicação no trecho experimental.

Com a finalidade de constatar o comportamento resiliente das misturas definidas para aplicação no trecho experimental, foi realizado o ensaio triaxial dinâmico de cargas repetidas para determinação dos Módulos de Resiliência (MR).

Na compactação dos corpos de prova para uso no referido ensaio foram utilizados os parâmetros ótimos de compactação definidos anteriormente e trabalhando-se com os seguintes modelos:

- i) $MR = K1 \cdot \sigma_d^{K2}$
- ii) $MR = K1 \cdot \sigma_3^{K2}$

O coeficiente de determinação R^2 foi utilizado como critério para indicar o ajuste da linha de tendência como reprodução da variação do MR com o estado de tensão aplicado.

Na Tabela 3.12 são exibidos os coeficientes de determinação (R^2) e os parâmetros de regressão (K1 e K2) obtidos em função das equações acima.

Tabela 3.12 - Resultados dos ensaios de MR

Material	Modelo	Parâmetros do modelo		
		$k1$	$k2$	R^2
M7 - 35%R+20%B1+45%B0	MR = K1. σ^d k2	602,24	0,6738	0,9027
M7 - 35%R+20%B1+45%B0	MR = K1. σ^3 k2	1200,3	0,7739	0,7924

As Figura 3.8 e 3.9 demonstram as oscilações do MR, locado no eixo das ordenadas, em função da tensão desvio e confinante, dispostos no eixo das abscissas para a mistura M7.

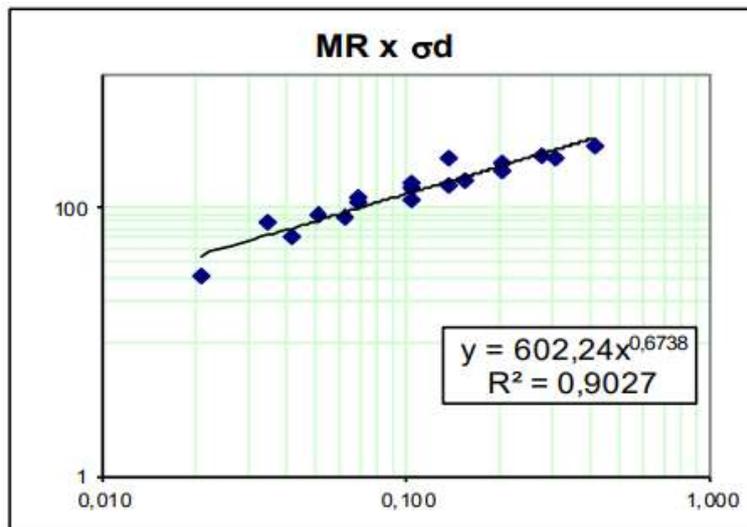


Figura 3.8 - Gráfico MR x σ^d

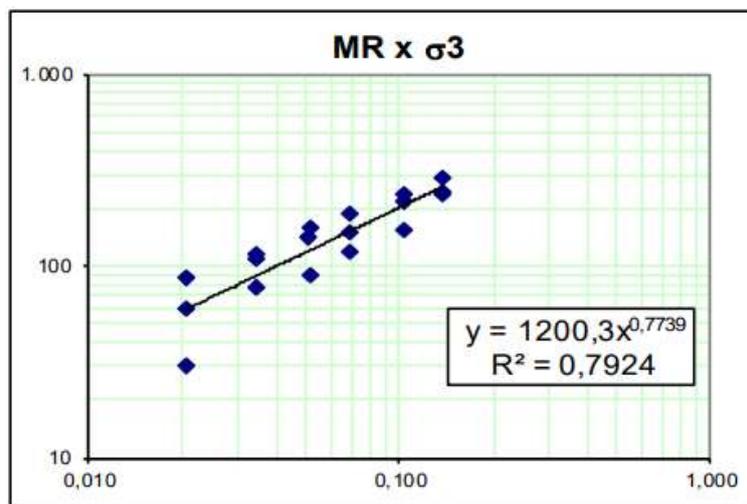


Figura 3.9 - Gráfico MR x σ^3

Na Tabela 3.13 estão apresentados os Módulos de Resiliência para as seguintes situações: menor tensão desvio, tensão média e maior tensão desvio obtidos no ensaio

Tabela 3.13 - Resumo dos Módulos de Resiliência

Material	MR ($\sigma_d = 0,021$)	MR médio	MR ($\sigma_d = 0,412$)
M7 - 35%R+20%B1+45%B0	30 MPa	150 MPa	292 MPa

Verifica-se que os valores obtidos foram muito baixos, pois a mistura M7 é composta por 65% de agregados pétreos, ou seja, materiais de boa qualidade e resistentes e por tanto esperava-se valores muitos superiores aos encontrados para o MR, acredita-se que o rejeito acaba realizando uma redução do imbricamento entre os agregados e favorecendo a ocorrência de maiores deformações.

Assim conclui-se que a adição de rejeito a mistura, que é um material silto-arenoso, pode ter influenciado consideravelmente o resultado, diminuindo o atrito entre os grãos e aumentando as deformações. De acordo com a especificação DER/SP (2006), materiais granulares a serem empregados na base, devem ter um MR variando entre 100 e 500 MPa, o que foi constatado nos resultados obtidos no ensaio (BALBO, 2007).

Visando a possibilidade do uso dos resíduos de mineração nas camadas do pavimento flexível, foi necessário realizar ensaios ambientais a fim de verificar sua toxicidade. Desta forma serão apresentados os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização na Tabela 3.14 e Tabela 3.15, respectivamente.

Tabela 3.14 – Resultados dos ensaios de Lixiviação

ELEMENTOS QUÍMICOS	CONCENTRAÇÃO MÉDIA (mg/L)		VALOR MÁXIMO PERMITIDO NBR 10.004/2004 (mg/L)
	Rejeito	Estéril	
Alumínio	<0,01	<0,01	1,0
Bário	1,96	2,29	70
Cádmio	<0,001	<0,001	0,5
Chumbo	<0,01	<0,01	1,0
Cromo	<0,01	<0,01	5,0
Fluoreto	<0,1	<0,1	150
Mercúrio	<0,00008	<0,00008	0,1
Prata	<0,01	<0,01	5,0
Selênio	<0,008	<0,008	1,0

Tabela 3.15 - Resultados dos ensaios de solubilização

ELEMENTOS QUÍMICOS	CONCENTRAÇÃO MÉDIA (mg/L)		VALOR MÁXIMOPERMITIDO NBR 10.004/2004 (mg/L)
	Rejeito	Estéril	
Alumínio	0,166	0,250	0,2
Arsênio	<0,01	<0,01	0,01
Bário	0,407	0,503	0,7
Cádmio	<0,001	<0,001	0,005
Chumbo	<0,01	<0,01	0,01
Cobre	<0,005	<0,005	2
Cromo	<0,01	<0,01	0,05
Ferro	0,179	0,367	0,3
Manganês	<0,01	<0,01	0,1
Prata	<0,01	<0,01	0,05
Selênio	<0,008	<0,008	0,01
Sódio	4,86	5,50	200
Zinco	0,112	0,223	5

De acordo com os resultados obtidos, o rejeito foi classificado como resíduo inerte classe II B, ou seja, este material mantém suas características durante o processo de decomposição, não havendo riscos de contaminação do meio ambiente. Em relação ao ensaio de lixiviação, o mesmo foi considerado como não tóxico por apresentar contaminantes em concentrações inferiores aos valores determinados pelas normas.

O estéril, por sua vez, apresentou concentração de alumínio e ferro acima do valor máximo permitido pela NBR 10.004/2004, sendo classificado como Resíduo não inerte Classe II A, ou seja, não são perigosos, entretanto, em contato com a água podem apresentar solubilidade em água. Ademais, esse resíduo também foi classificado como não tóxico, por meio do ensaio de lixiviação.

Logo, verifica-se que os dois materiais não apresentam riscos a saúde humana e ao meio ambiente.

Também, foram realizados ensaios químicos de análise quantitativa dos resíduos. Na Tabela 3.16 são apresentados os resultados obtidos para as amostras de rejeito e estéril de mineração.

Tabela 3.16 - Resultados da análise química quantitativa

PARÂMETROS	RESULTADOS ANALÍTICOS (mg/kg)	
	Estéril	Rejeito
Óxido de Silício (SiO ₂)	2600	727
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	270000	74200
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	90400	1240
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	872	173
Óxido de Cálcio (CaO)	168	88,1
Óxido de Manganês	153	54,3
Óxido de Potássio (K ₂ O)	705	-

Em ambos os resíduos se verifica uma elevada concentração de óxido de ferro, fato que justifica o elevado peso específico dos materiais estudados, que é 2,978 g/cm³, para o estéril, e 2,783 g/cm³, para o rejeito.

Ainda com o ensaio de difração de raios X realizado, verificou-se na amostra de rejeito presença em maior quantidade de partículas de Quartzo (Q), dos argilominerais Hematita (H) e Alumina (Al). O difratograma de Raio X é exibido na Figura 3.10.

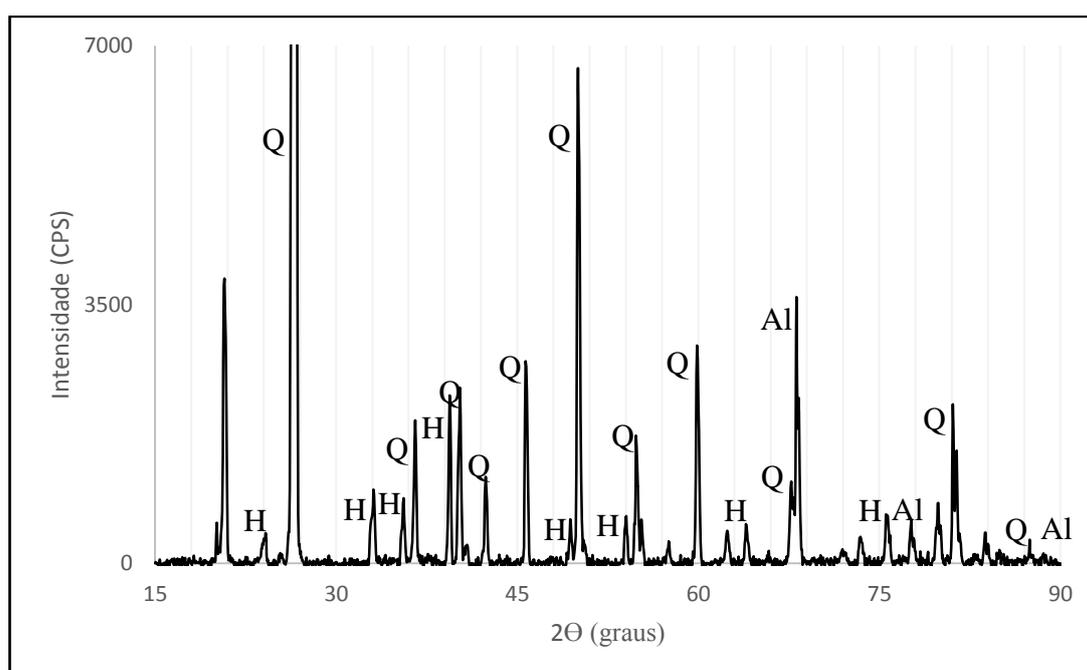


Figura 3.10 - Resultados do ensaio de DRX

3.2. ETAPA DE EXECUÇÃO

3.2.1. Dimensionamento do Pavimento

Inicialmente visando a execução do trecho experimental, foi desenvolvido um projeto do pavimento, buscou-se então dimensionar as espessuras das suas camadas constitutivas que foi desenvolvido visando à concepção da superestrutura com base na natureza e origem dos materiais previamente estudados em laboratório e visando possibilitar o emprego dos rejeitos e resíduos da mineração conforme objetivos propostos por este trabalho visando ainda simultaneamente e em seu conjunto a:

- resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- melhorar as condições de segurança quanto à comodidade e segurança;
- resistir aos esforços horizontais que nelas atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

O projeto foi elaborado com base nas seguintes definições/considerações:

- estimativa do parâmetro de tráfego utilizado nos métodos de dimensionamento (Número "N" de repetições do eixo simples padrão de rodas duplas de 8,2 t);
- previsão/definição da capacidade de suporte mínima dos materiais que deverão constituir a camada de fundação (subleito), tendo em vista a realização dos estudos geotécnicos baseados na caracterização geotécnica (granulometria por peneiramento, limite de liquidez e limite de plasticidade) e nos ensaios mecânicos (compactação e ISC), que também foram aplicados nos estudos com os materiais constituintes das misturas (blend), compostas por solos, rejeitos, resíduos e agregados.

O dimensionamento do pavimento flexível foi efetuado seguindo-se a orientação geral do "Método da Resiliência", do "Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis do DNER" (1996) e com avaliação da estrutura no MEDINA.

O Número "N" de repetições do eixo simples padrão de rodas duplas de 8,2 t foi estimado para o 10º ano de vida útil do pavimento como sendo igual a $N = 1,18 \times 10^7$, valor este estudado e praticado pela VIA 040.

Com base na resposta dos ensaios mecânicos realizados sobre o material do subleito e das misturas propostas chegou-se aos seguintes valores de projeto:

- Subleito = 40% CBR – (Solo Hematítico)
- Sub-Base = 30% CBR – (Blend – 35% R + 15% L + 50% SB)
- Base = 219,8% CBR – (Blend - 35%R + 20%B1 + 45%B0)

Para o dimensionamento do pavimento segundo o "Método da Resiliência" os materiais constituintes do subleito foram classificados de acordo com os parâmetros de resiliência do método, considerando-os como solos tipo I, onde:

$CBR > 10\%$ e $\%silte < 35\%$ - Classificação pela Resiliência como tipo 1

A equação que relaciona o número cumulativo de repetições (N) da deflexão (D), que provoca a ruptura por fadiga da camada betuminosa de concreto asfáltico, segundo Preussler, Pinto & Medina é representada por:

$$\log Dp = 3,148 - 0,188 * \log N$$

Para as solicitações de tráfego previstas tem-se:

$$\log Dp = 3,148 - 0,188 * \log (1,18 \times 10^7)$$

$$Dp = 65,84 \text{ (0,01 mm)}$$

Os valores dos coeficientes de equivalência estrutural para os materiais das camadas do pavimento, em relação à camada de base granular tomada com $K = 1,00$ são os seguintes:

- Revestimento (CBUQ): $K_r = 2,00$;
- Camadas granulares (base e sub-base): K_b e $K_{sb} = 1,00$.

O "Método da Resiliência" considera o "Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis" - DNER (1966) para o cálculo da espessura total do pavimento (Ht) em termos de camada granular com coeficiente de equivalência estrutural $K = 1,00$, de forma a proteger o subleito quanto ao aparecimento de deformações permanentes excessivas; tal espessura, em função do parâmetro de tráfego N e do CBR do subleito, é expressa por:

$$H_t = 77,67 * N^{0,0482} * 0,0482 * CBR^{-0,598}$$

Para as solicitações de tráfego previstas e CBR do subleito considerado tem-se:

$$H_t = 77,67 * (1,18 \times 10^7)^{0,0482} * 20^{-0,598}$$

$$H_t = 29 \text{ cm}$$

Deve ser observado que o valor máximo de entrada na fórmula para cálculo da altura de material granular para proteção do subleito, ou seja referente ao CBR da camada imediatamente acima é igual a 20%.

A espessura mínima do revestimento betuminoso segundo o "Método da Resiliência" é expressa por:

$$H_{CB} = -5,737 + \frac{807,961}{D_p} + 0,972 * I_1 + 4,101 * I_2 \quad (\text{Solo tipo 1 } I_1 = I_2 = 0)$$

Assim: $H_{CB} \cong 6,54 \text{ cm}$; adotado 10 cm (concreto betuminoso)

Ressalta-se que a espessura mínima de revestimento betuminoso recomendada pelo "Método do DNER" - 1996 é de 10 cm para o valor N de projeto.

Segundo o "Método da Resiliência" o valor estrutural (VE) da camada betuminosa (HCB) é estabelecido em função do tipo de subleito e do tráfego futuro, sendo:

SOLO TIPO	VALOR ESTRUTURAL - V _E		
	$N \leq 10^5$	$10^5 < N < 10^7$	$N \geq 10^7$
I	4,0	3,4	2,8
II	3,0	3,0	2,8
III	3,0	3,0	2,0

Conceitualmente, o valor estrutural da camada betuminosa depende da qualidade da mistura betuminosa e da constituição da estrutura do pavimento como um todo assim segundo o tipo de Subleito (solo tipo 1) o V_E adotado será igual a 2,8.

A espessura da camada granular (H_{CG}) é determinada a partir da equação:

$$H_{CB} * V_E + H_{CG} = H_t$$

A espessura da camada granular é limitada a no máximo 35,0cm para a utilização de materiais não coesivos, com base nos estudos de resiliência dos solos e de estruturas de pavimentos desenvolvidos nos últimos anos. Além disso tem-se limitado a espessura mínima de camada granular como sendo igual a 15 cm. Tendo em vista a necessidade de se construir a camada de sub-base e base e adotando-se o valor mínimo tem-se:

$$H_{CG} = 15 + 15 = 30 \text{ cm}$$

Assim, verifica-se que:

$$H_{CB} * V_E + H_{CG} = H_t$$

$$10 * 2,8 + 30 \geq 29$$

$$58 \geq 29 \text{ (ok)}$$

Considerando o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis" - DNER (1966), e também com base no que já fora exposto, a seguir apresenta-se o dimensionamento das estruturas do pavimento em função tráfego e do resultado do CBRproj, ambos já apresentados e cujos os valores estão resumidos a seguir.

- CBRproj = **20%**;
- **N = 1,18x 10⁷**, solicitações do eixo simples padrão.

Materiais Adotados:

- Revestimento: Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ), na espessura 10 cm e coeficiente estrutural KR = 2,0;
- Base: blend estabilizada granulometricamente com inclusão de rejeito, já apresentado, com CBR ≥ 80% e expansão ≤ 0,5% e coeficiente estrutural KB = 1,0;
- Sub-base: blend estabilizada granulometricamente com inclusão de rejeito e resíduo, com CBR ≥ 30% e expansão ≤ 1,0% e coeficiente estrutural KS = 1,0.

Adotando-se o valor do suporte $CBR = 20\%$ (definido pelo método de dimensionamento) para a camada de sub-base, obtém-se na equação de dimensionamento H_t , o valor $H_{20} = 29,0$ cm e com a utilização da inequação (I) obtém-se a espessura mínima para a camada de base:

$$R \times KR + B \times KB \geq H_{20} \quad (I)$$

$$10 \times 2,0 + B \times 1,0 \geq 29,0 \text{ cm}$$

$$20 + B \geq 29,0 \text{ cm}$$

$$B \geq 9,0 \text{ cm, adotar } \mathbf{B = 15,0 \text{ cm}}$$

Adotando-se o valor de suporte CBR médio (estatístico) para o subleito da ordem de 20% , valor máximo recomendado para utilização do método obtém-se na equação, o valor de $H_m = 29$ cm. Fixando-se a espessura mínima (B) para a camada de base granular em $15,0$ cm (inequação I) e através da resolução da inequação (II), determina-se a espessura mínima para a camada de sub-base.

$$R \times KR + B \times KB + h_{20} \times KS \geq H_m \quad (II)$$

$$10 \times 2,0 + 15,0 \times 1,0 + h_{20} \times 1,0 \geq 29,0 \text{ cm}$$

$$20,0 + 15,0 + h_{20} \geq 29,0 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 15,0 \text{ cm (valor mínimo recomendado), adotar } \mathbf{h_{20} = 15,0 \text{ cm}}$$

Assim, o pavimento apresentara estrutura composta de revestimento, base e sub-base com as seguintes espessuras em (cm), segundo a determinação pelo método do DNER:

- revestimento = $10,0$ cm;
- base = $15,0$ cm;
- sub-base = $15,0$ cm.

Porém, como o pavimento foi construído a partir do subleito do pavimento pré-existente, onde foi construído o trecho experimental e, como foi necessário realizar abertura de uma caixa para essa construção, as espessuras adotadas para as camadas do pavimento do trecho experimental foram significativamente superior aquelas

dimensionadas para que se pudesse alcançar o nível do revestimento asfáltico do pavimento já existente BR-040. A seguir, apresenta-se um resumo do pavimento.

INTERESSADO: VIA 040 LOCAL: km 300 ao km 400 (norte) da BR-040

TIPO DE TRÁFEGO: pesado; SUBLEITO: CBR_p = 20,0% ENERGIA: variável com a camada ESPESSURA TOTAL: 62,0 cm

ESTRUTURA DO PAVIMENTO	
Espessura (cm)	Camada
12	Concreto Betuminoso Usinado a Quente – Faixa “B”
	Imprimadura Impermeabilizante
30,0	Base - Blend – Mistura estabilizada granulometricamente com 35% de rejeito de minério de ferro, 20% de brita 01 e 45% de brita 0 c/ CBR min = 80%, compactado na energia Modificada.
20,0	Blend – Mistura estabilizada granulometricamente com 35% de rejeito de minério de ferro, 15% de estéril (laterita) e 50% (material reaproveitado do bota-fora) CBR min = 30%, compactado na energia intermediária.
15,0	Regularização do Subleito a 100% do Proctor Normal.

Além do dimensionamento empírico anteriormente apresentado, foi analisado no software MEDINA, a proposta acima para verificar o seu comportamento estrutural, obtendo-se com os parâmetros de entrada as respostas a seguir apresentadas.

Parâmetros de entrada:

$$N = 1,18 \times 10^7$$

Camada 1 (revestimento) – Concreto Asfáltico – Classe 1 – 12 cm – 5764 MPa – Coeficiente de POISSON 0,30.

Camada 2 (Base) – Material Granular – 35% rejeito + 20% B1 + 45% B0 – 30 cm – 312 MPa – Coeficiente de POISSON 0,35

Camada 3 (Sub-Base) – Solo Fino, Siltoso ou Argiloso – 70% estéril + 30% rejeito – 20 cm – 192 MPa – Coeficiente de POISSON 0,35

Camada Subleito – Subleito – Canga de minério – 0 cm – 392 MPa – Coeficiente de POISSON 0,35

Resposta do software:

Nível de confiabilidade da análise: 85%

Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 19,3%

Afundamento de Trilha de Roda: 3,2mm

Entretanto por ser considerado trecho com alta variabilidade de tráfego, e se tratando a faixa escolhida para execução do trecho experimental, aquela preferencial para os veículos comerciais, adotou-se com premissa de projeto a instalação de geogrelha, com a finalidade de retardar e minimizar o aparecimento de trincas fadiga e reflexão de trinca das camadas granulares por fadiga ao revestimento. Para tanto, por meio de uma parceria, a empresa Huesker forneceu (gratuitamente) a geogrelha, sem custos, sendo do tipo Haltelit C40/17, inserida no meio da camada de revestimento asfáltico.

3.2.2. Execução e Controle do Trecho Experimental Instrumentado

A seguir, faz-se uma breve descrição das atividades realizadas durante a execução do trecho experimental e sequencialmente um conjunto de imagens ilustra o processo construtivo.

Local da obra: O trecho experimental foi executado em uma das faixas de rolamento da BR-040, Norte entre os km 300/MG a km 400/MG sob concessão da Via 040 – Invepar (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Local das Obras

Período e Turno de Trabalho: O período de execução das obras foi de 6 dias úteis, em turno único, com horário de trabalho de 7:00 e 16:20 com intervalo de 1:00 para almoço, de segunda a sexta-feira e sábado de 7:00 às 11:00.

Fornecimento de Material: Compreendeu como parte integrante do serviço o fornecimento de diversos insumos de acordo com as especificações de projeto:

- Emulsões asfálticas;
- Agregados;
- Consumíveis.

Utilizou-se CBUQ faixa B convencional do DNIT com CAP 30/45.

As pedreiras e jazidas de solo foram indicadas pela Via 040, devido a estudos prévios dos materiais.

O rejeito e material estéril previamente estudado para mistura do material de base e sub-base, foram fornecidos pela mineradora Ferro +, por meio de doação, ficando a cargo da empresa executora a responsabilidade de carga e transporte até a usina de solos para mistura e umidificação.

Plano Básico de Execução: As obras foram executadas sob a responsabilidade técnica de profissional habilitado, acompanhadas da respectiva Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) e segmentada nas seguintes etapas:

1. Mobilização;
2. Planejamento;
3. Sinalização e organização das frentes de trabalho;
4. Serviços preliminares;
5. Terraplanagem (corte e bota fora);
6. Regularização de Subleito;
7. Execução de Sub-base e Base;
8. Imprimação;
9. Pintura de Ligação;
10. Execução de Capa de Rolamento;
11. Micro revesti mento;
12. Desmobilização.

Todo o escopo foi executado tomando-se como referência as normas técnicas do DNIT.

Sinalização de obra: A sinalização permaneceu por todo o período de execução das obras, para organização diária da circulação de equipamentos, veículos e pessoas. Todo o processo de sinalização foi liderado por um técnico de segurança e mantendo sistema de cones, conões iluminados e iluminação de segurança e/ou trabalho no período

noturno, sinalizadores e sinaleiros para garantia das condições mínimas de segurança e trafegabilidade na via para realização dos trabalhos diários e segurança do tráfego noturno.

Terraplenagem: A terraplenagem mecânica considerada, correspondeu a escavação de 62 cm de uma das faixas de rolamento da pista na BR-040, entre os quilômetros 300 e 400, norte, que consistiu no fressamento do revestimento e retirada das camadas de base e sub-base existentes até o encontro da camada de subleito, para possibilitar posterior execução das camadas de sub-base e base, conforme misturas pré-estabelecidas para construção do trecho experimental. O material obtido na terraplenagem foi direcionado a uma área de bota-fora, localizado a 300 metros do eixo da construção.

Os serviços de escavação, carga, transporte, descarga se iniciaram tão logo mobilizados os equipamentos e pessoal.

Regularização e reforço do Subleito: Ao atingir o greide de terraplenagem do projeto, foi realizado uma escarificação até a profundidade de 0,20m, ajuste de umidade, homogeneização e imediata compactação. Para esta etapa, foram utilizados motoniveladora com escarificador, caminhão pipa, rolo compactador autopropulsor e trator de pneus com grade de discos.

Camadas de Sub Base e Base: As camadas de sub-base e base foram executadas com as melhores misturas encontradas na fase de pesquisa laboratorial e mediante a aplicação de estéril e rejeito da mineração, fornecidos pela mineradora Ferro +, inclusive possibilitando o aproveitamento de parte do material de bota-fora obtido na fase de terraplenagem. O rejeito e estéril utilizados nas camadas de base e sub-base foram transportados da mineradora para usina de solos da Locpav, em Vespasiano.

Na usina de Vespasiano os materiais foram processados conforme os percentuais definidos. Para sub-base fez a composição percentual em massa de rejeito e estéril sua mistura íntima adicionando uma pequena quantidade de água a mais do que aquela que levaria o material a sua umidade ótima, para posterior adição do material de bota fora na pista, possibilitando desta forma se atingir a umidade ótima de projeto mais facilmente na pista quando da adição, então, do material de bota-fora. Já o material de base saiu da

usina já na umidade ótima para aplicação, inclusive processado com brita 0 e 1, conforme o projeto da mistura.

Na pista, estes materiais foram trabalhados com motoniveladora, trator com grade de disco e rolo compactador. Depois de espalhado, os materiais foram previamente homogeneizados e compactados, de modo a obter-se o grau de compactação mínimo de 100% conforme definições de projeto.

Após compactação da camada de base realizou-se sobre esta, uma imprimação corresponde à aplicação de uma película de material betuminoso sobre esta camada devidamente limpa através de vassoura mecânica tracionada por trator de pneus, visando à penetração do imprimante a devida impermeabilização da base.

Esta imprimação foi executada com asfalto diluído CM-30. O material betuminoso foi adquirido da Petrobrás e armazenado em tanque apropriado e com sistema de aquecimento.

O material já aquecido, de acordo com sua especificação, em função da relação temperatura-viscosidade, foi distribuído na pista, nas quantidades de projeto, por meio de caminhão distribuidor de betume, capacidade de 5.000 / 6.000 litros, equipado com sistema de aquecimento, bomba de pressão regulável, barra e bicos de distribuição para aspersão. Foram tomados cuidados especiais na aplicação do produto, procedendo à verificação dos bicos da barra espargidora, com antecedência, para não apresentar falhas na descarga, dentro das normas preconizadas pelo fabricante do equipamento de distribuição. A taxa de aplicação adotada foi em torno de 1,0 l/m² de acordo com a especificação do DNIT 144/2010-ES.

Revestimento – Capa de Rolamento :A camada de revestimento foi construída com Concreto Betuminoso Usinado a Quente. (CBUQ) Faixa B Convencional com CAP-30/45, de acordo com as definições do projeto executivo. O ligante betuminoso usado foi o CAP-30/45.

O CBUQ foi aplicado na pista devidamente varrida, isenta de impurezas em 2 camadas de 6 cm, totalizando uma espessura total final de revestimento igual 12 cm.

Com a pista devidamente preparada para receber a massa, que foi obtida através de usinagem a quente, em usina apropriada e transportada à obra em caminhões

basculantes, procedeu-se com a aplicação da massa na pista através do uso de vibro-acabadora, que possui dispositivo de espalhamento e compactação do material. A seguir, foi realizado o serviço de compactação a rolo de pneus e rolo compactador liso tipo vibratório.

Especial atenção foi dada à execução das juntas (longitudinais e transversais), a fim de que a pista se apresentasse homogênea, sem defeitos de emendas e, portanto, mais segura. A massa foi aplicada em duas camadas de 5 cm para atingir a espessura total de 10 cm.

Após a primeira camada, foi realizado uma pintura de ligação e a disposição da Geogrelha. A seguir, é apresentado uma sequência de imagens que ilustra todo processo construtivo:





Terraplenagem: Controle das medidas de projeto



Terraplenagem: Controle das medidas de projeto



Terraplenagem: Escavação da camada de base e sub-base



Terraplenagem: Escavação da camada de base e sub-base





Regularização do Subleito: Escarificação



Regularização do Subleito: Pós Escarificação



Regularização do Subleito: Homogeneização



Regularização do Subleito: Controle de Umidade



Regularização do Subleito: Regularização do solo solto



Regularização do Subleito: Regularização do solo solto



Regularização do Subleito: Compactação



Regularização do Subleito: Compactação



Regularização do Subleito: Determinação da densidade "in situ"



Regularização do Subleito: Ensaio de Viga Benkelman



Sub-base: Regularização de material usinado (Rejeito + Laterita) umedecido



Sub-base: Lançamento do material de bota-fora extraído durante a fase de abertura de caixa



Sub-base: Regularização do material





Sub-Base: Abertura da janela para instalação do sensor pressão – Interface sub-base/subleito



Sub-base: Instalação do sensor de pressão – Interface sub-base/subleito



Base: Distribuição de material usinado – mistura de rejeito, brita 0 e brita 1 – (p/ camada – 1: 15 cm)



Base: Regularização – (p/ camada – 1: 15 cm)



Base: Controle de umidade – (p/ camada – 1: 15 cm)



Base: Distribuição de material usinado –
mistura de rejeito, brita 0 e brita 1 – (p/
camada – 2: 15 cm)

Base: compactação – (p/ camada – 1: 15 cm)



Base: Determinação da densidade "in situ"



Base: Ensaio de DCP



Base: Ensaio Viga Benkelman



Base: Camada finalizada, aparência antes do revestimento.



Base: Abertura da janela para o instalação da célula de pressão na interface da sub-base/base



Base: Instalação da célula de pressão na interface da sub-base/base



Imprimação: Imprimação realizada com a "caneta"



Imprimação: Cura da imprimação



Pintura de Ligação: Pintura de ligação realizada com a “caneta”



Salgamento: Lançamento de uma fina camada de massa asfáltica não regularizada apenas visando melhor aderência para os equipamentos



Salgamento: Lançamento de uma fina camada de massa asfáltica não regularizada apenas visando melhor aderência para os equipamentos



Revestimento: Controle de Temperatura do CBUQ



Revestimento: Lançamento do CBUQ



Revestimento: Compactação da primeira camada de CBUQ (6 cm)



Revestimento: Instalação de célula de pressão na interface Base/revestimento



Revestimento: Instalação de Geogrelha



Revestimento: Instalação de Geogrelha



Revestimento: Lançamento da segunda camada de CBUQ



Revestimento: Execução da Segunda camada de CBUQ



Revestimento: Compactação da segunda Camada de CBUQ



Revestimento: Ensaio de mancha de areia



Revestimento: Ensaio do Pêndulo Britânico



Revestimento: Ensaio Merlin



Revestimento: Extração do Corpo de Prova p/ controle de qualidade

3.2.3. Controle Tecnológico de Execução

Na Tabela 3.17 são apresentados os resultados de umidade *in situ* em comparação com a umidade ótima obtida em laboratório para as diferentes camadas do pavimento executadas, sendo este parâmetro utilizado para liberação ao serviço de compactação.

Tabela 3.17 - Comparação dos resultados de umidade campo x laboratório

SUBLEITO				
Local	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Umidade in situ(%)	7,3	6,1	6,1	7,0
Umidade ótima (%)	8,0			
Desvio de umidade (%)	-0,7	-1,9	-1,9	-1,0
SUB-BASE				
Local	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Umidade in situ(%)	9,6	9,0	9,6	9,2
Umidade ótima (%)	9,55			
Desvio de umidade (%)	0,05	-0,55	0,05	-0,35
BASE				
Local	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Umidade in situ(%)	5,1	6,1	6,7	6,1
Umidade ótima (%)	6,08			
Desvio de umidade (%)	-0,98	0,02	0,62	0,02

Nota-se que para o subleito, sub-base e base ocorreram desvios de umidade, variando em relação a ótima obtida em laboratório sempre dentro do intervalo admissível que é de $\pm 2\%$. Desta forma, os resultados foram aceitáveis.

As camadas compactadas foram submetidas ao ensaio de densidade “*in situ*” com finalidade de garantir a qualidade do processo de compactação das camadas e assim foi determinado o Grau de Compactação (GC) de cada camada granular do trecho experimental. A Tabela 3.18 exhibe estes resultados em comparação com os resultados de laboratório.

Tabela 3.18 - Resultados de densidade e GC

SUBLEITO				
Local	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Densidade in situ (g/cm³)	2,917	2,796	2,878	2,748
Densidade em laboratório (g/cm³)	2,812			
Grau de compactação (%)	104	99	102	98
SUB-BASE				
Local	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Densidade in situ (g/cm³)	2,432	-	-	2,454
Densidade em laboratório (g/cm³)	2,379			
Grau de compactação (%)	102	-	-	103
BASE				
Local	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Densidade in situ (g/cm³)	2,317	2,301	2,299	2,267
Densidade em laboratório (g/cm³)	2,220			
Grau de compactação (%)	104	104	104	102

Verificou-se que os resultados de Grau de Compactação para o subleito variaram entre 98 e 104% com um GC médio de 101%. Além disso, o GC médio obtido para a sub-base é de 102,5%. Para a base observa-se que os resultados de densidade foram muito próximos entre si, variando de 2,267 a 2,317 g/cm³ com um Grau de Compactação médio de 104%.

Além do controle de compactação realizado, foi executado o ensaio de DCP com intuito de determinar o CBR *in situ* das camadas de base e sub-base. De acordo com a Norma ASTM 6951M-18, as correlações são dependentes das características do solo, em função principalmente da textura e plasticidade deles. Assim e a seguir na Tabela 3.19 são apresentados os resultados obtidos para a camada de sub-base.

Tabela 3.19 - Resultados de CBR in situ - Sub-base

Correlação aplicada	CBR médio (%)
Generalizada	21,8

Observou-se que nas condições de campo os valores de CBR em média encontrado (21,8%) apresentaram-se inferior aquele obtido em laboratório (34%).

A Tabela 3.20 apresenta o CBR médio para a camada de base.

Tabela 3.20 - Resultados de CBR in situ - Base

Correlação aplicada	CBR médio (%)
Generalizada	37,0

Nota-se que o resultado obtido em campo se apresentou muito abaixo daquele constatado em laboratório inclusive abaixo do valor mínimo recomendado de 80%.

Já em relação as deflexões e, de acordo com a Norma DNER-PRO 011/79, para que não surjam trincas no revestimento betuminoso do pavimento, a deflexão máxima admissível deve ser obtida em função da Equação 3.1.

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

N: Número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 tf.

D_{adm}: Deflexão máxima admissível

Neste contexto a seguir é apresentado por meio das Tabelas 3.21 e 3.22, os valores de deflexão medidos por meio do ensaio de Viga Benkelman após e respectivamente a construção das camadas de subleito, subbase e base, tanto para a trilha de roda interna (TRI) quanto externa (TRE).

Tabela 3.21 – Deflexões medidas pelo ensaio de Viga Benkelman TRI

PROJETO:		Trecho Experimental		Nproj.= 1,18E+07													
TRECHO:		BR-040 / PISTA TESTE		EXTENSÃO: 0,100 km					dadm (x10 ² mm)= 58,26								
LOCALIZAÇÃO:		ITABIRITO - MINAS GERAIS		PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2													
	DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO		DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA INTERNA (TRI) (0.01 mm)							RAIO DE CURVATURA (m)	Fator Forma F1	Fator Forma F2	dcampo (x10 ² mm)	Qualidade Estrutural		
				D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120							
Subleito	0,000	574	+	400,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	500,0	-	-	2,1	Boa
	0,025	574	+	375,0	6,0	4,0	4,0	4,0	2,0	2,0	0,0	1000,0	1,0	1,0	5,1	Boa	
	0,050	574	+	350,0	4,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1000,0	-	-	2,4	Boa	
	0,075	574	+	325,0	8,0	6,0	6,0	4,0	4,0	4,0	0,0	1000,0	0,7	0,5	7,1	Boa	
Subbase	0,025	574	+	375,0	104,0	84,0	80,0	4,0	2,0	2,0	0,0	100,0	1,3	39,0	86,7	Regular	
	0,050	574	+	350,0	90,0	66,0	32,0	18,0	6,0	2,0	0,0	83,3	2,6	5,0	65,5	Má	
	0,075	574	+	325,0	168,0	108,0	64,0	26,0	16,0	2,0	0,0	33,3	2,4	3,9	117,9	Má	
Base	0,000	574	+	400,0	86,0	78,0	40,0	20,0	6,0	4,0	0,0	250,0	2,0	6,0	69,3	Regular	
	0,025	574	+	375,0	100,0	98,0	64,0	26,0	8,0	4,0	0,0	1000,0	1,4	7,5	86,8	Regular	
	0,050	574	+	350,0	14,0	6,0	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	250,0	7,0	-	8,6	Boa	
	0,075	574	+	325,0	58,0	24,0	14,0	8,0	6,0	4,0	0,0	58,8	3,7	1,7	36,3	Regular p/ Má	

Tabela 3.22 – Deflexões medidas pelo ensaio de Viga Benkelman TRE

PROJETO:		Trecho Experimental		Nproj.= 1,18E+07												
TRECHO:		BR-040 / PISTA TESTE		EXTENSÃO: 0,100 km					dadm (x10 ² mm)= 58,26							
LOCALIZAÇÃO:		ITABIRITO - MINAS GERAIS		PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2												
	DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO		DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA EXTERNA (TRE) (0.01 mm)							RAIO DE CURVATURA (m)	Fator Forma F1	Fator Forma F2	dcampo (x10 ² mm)	Qualidade Estrutural	
				D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120						
Subleito	0,000	574	+	400,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	500,0	-	-	2,1	Boa
	0,025	574	+	375,0	6,0	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	500,0	3,0	-	3,7	Boa
	0,050	574	+	350,0	12,0	10,0	8,0	6,0	4,0	2,0	0,0	1000,0	1,0	1,5	10,3	Boa
	0,075	574	+	325,0	22,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1000,0	-	-	16,3	Boa
Subbase	0,025	574	+	375,0	202,0	62,0	18,0	6,0	6,0	4,0	0,0	14,3	10,9	2,3	116,0	Má
	0,050	574	+	350,0	102,0	84,0	62,0	36,0	14,0	4,0	0,0	111,1	1,4	4,1	83,5	Regular
	0,075	574	+	325,0	108,0	68,0	48,0	22,0	14,0	10,0	0,0	50,0	2,0	2,7	77,2	Má
Base	0,000	574	+	400,0	12,0	10,0	8,0	4,0	2,0	0,0	0,0	1000,0	1,3	4,0	10,0	Boa
	0,025	574	+	375,0	6,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0,0	500,0	2,0	0,0	4,1	Boa
	0,050	574	+	350,0	14,0	12,0	-4,0	2,0	0,0	0,0	0,0	1000,0	-3,5	-	10,2	Boa
	0,075	574	+	325,0	80,0	44,0	36,0	12,0	8,0	2,0	0,0	55,6	2,0	4,3	55,2	Regular p/ Má

Desta forma, o valor arredondado de deflexão máxima admissível adotada para o trecho experimental é de 60×10^{-2} mm. Para o subleito a maior deflexão medida (D0) se deu na trilha de roda externa (TER), km 574 + 325 e atingiu o valor de 22×10^{-2} mm e por tanto abaixo do máximo valor admissível.

Para a camada de sub-base, as deflexões máximas (D0) obtidas para o bordo externo se deram entre os valores de 102×10^{-2} mm e 122×10^{-2} mm, enquanto que no bordo interno variou de 90×10^{-2} mm a 168×10^{-2} mm. Estes valores de deflexão apresentaram-se muito acima daquele recomendado segundo o valor admissível (Dadm), o que poderá acarretar em deformações acumuladas no pavimento que sejam capazes de gerar futuros trincamentos no revestimento asfáltico devido a deformabilidade excessiva.

Em relação as deflexões máximas obtidas para a camada de base, nota-se uma variação bastante heterogênea inclusive com valores tanto a abaixo da deflexão admissível, quanto acima. Há de se ressaltar que o comportamento da camada de base é dependente do comportamento obtido na camada de subbase, uma vez que a base é assentada sobre a subbase. Ainda ao analisar os valores de deflexão medidos nas distâncias de a 60, 90 e 120 cm, que tem relação direta com essa camada (Base) podemos verificar seus baixos valores e entender que este comportamento destoante é devido ao mal comportamento da camada de subbase.

Na verificação dos valores de raio de curvatura, evidenciamos essa conclusão, tendo em vista que a subbase apresenta valores abaixo de 100 ou quando acima muito próximo deste, enquanto que para base apenas para um ponto de referência quilométrico o valor medido, para este parâmetro se deu abaixo deste limite preconizado com referência de qualidade, na literatura, inclusive os valores de subleito encontram-se bastante acima deste limite, o que corrobora para a afirmação de que a camada de subbase é de qualidade ruim e interfere no comportamento da camada de base.

Diante do exposto levando-se em consideração a máxima deflexão que ocorre no ponto de referência de medida a 0 cm ou denominado de D0 e os valores de raio de curvatura, podemos concluir que a camada de subleito tem comportamento excelente, a subbase comportamento fraco a mal e a base de regular a bom.

Se olharmos o conjunto resposta dos ensaios de campo realizados, principalmente DCP e Viga Benkelman, pode-se sugerir que a mistura utilizada na camada de base, pode apresentar comportamento efetivo e excelente para aplicação em camada de subbase. Porém deve-se equalizar essa afirmação mediante uma análise de viabilidade econômica frente as demais alternativas encontradas hoje no mercado e m relação a região de estudo.

Também como forma de aferir a qualidade do pavimento executado foi realizado o ensaio de macrotextura como finalidade de inferir sobre a sua capacidade de drenabilidade. Na Tabela 3.23 são expressos os resultados obtidos em cinco pontos do revestimento asfáltico do trecho experimental. Nota-se que os resultados variaram de 0,55 mm a 0,93 mm, ou seja, a textura superficial classificada de média a grosseira.

Ainda se verifica que apenas km 574+400 não atendeu a determinação do DNIT, contudo, os demais resultados foram satisfatórios.

Tabela 3.23 - Resultados Mancha de Areia

km	Bordo	L1 (cm)	L2 (cm)	L3 (cm)	L4 (cm)	L5 (cm)	Diâmetro Médio (cm)	Altura média Hs (mm)	Textura Superficial
574+400	Eixo	23,5	25	24	24	23,5	24	0,55	Média
574+375	Esquerdo	20,5	22,3	22,2	21	20,4	21,28	0,70	Média
574+350	Interno	20,5	20,3	21,2	19,9	21,4	20,66	0,75	Média
574+325	Eixo	20,3	20,4	20,5	19	19	19,84	0,81	Grosseira ou aberta
574+300	Esquerdo	16,5	19,3	19,3	19	18,2	18,46	0,93	Grosseira ou aberta

Também foi avaliado a microtextura do pavimento, verificando a redução da energia cinética em função do atrito da base de borracha com a o pavimento molhado. Os resultados obtidos no trecho experimental são elucidados na Tabela 3.24, a seguir:

Tabela 3.24 - Resultados do Pêndulo Britânico

km	Bordo	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	Média (VRD)	Temp. (°C)	Classific.
574+400	Eixo	90	90	90	90	88	89,50	40	Muito rugosa
574+375	Esquerdo	110	110	100	99	99	102,00	40	Muito rugosa
574+350	Interno	80	80	85	85	85	83,75	37	Muito rugosa
574+325	Eixo	90	95	95	95	100	96,25	35	Muito rugosa
574+300	Esquerdo	95	90	95	90	90	91,25	35	Muito rugosa

De acordo com o Manual de restauração DNIT, o valor de VRD deve ser maior que 55 e Bernucci *et. al.* (2010) recomenda VRD acima de 47. Logo, observa-se que todos os resultados atenderam as especificações citadas, classificando esse revestimento como muito rugoso.

Por fim, em relação ao controle de qualidade, foram aferidas a partir das massas asfálticas coletadas em campo, o teor de betume e a granulometria do agregado utilizado. À vista disso, a partir da execução do ensaio no forno NCAT, que realiza a extração de betume, foi possível obter o resultado demonstrado na Tabela :

Tabela 3.25 - Resultados do ensaio de extração de betume

Peso inicial da amostra (g)	Peso final da amostra (g)	Teor de betume (%)
1671,3	1594,6	4,59

O teor de projeto especificado para a massa asfáltica foi de 4,60%, com desvio padrão $\pm 0,3\%$. Logo, o resultado obtido foi satisfatório.

Em relação à granulometria, a mesma deve estar entre os limites especificados em projeto, e, conforme a Figura 3.13, pode-se verificar que a massa atendeu as preconizações de projeto. Observa-se que a amostra atendeu aos limites estabelecidos tanto para as faixas mínimas e máximas de projeto quanto à determinação do DNIT.

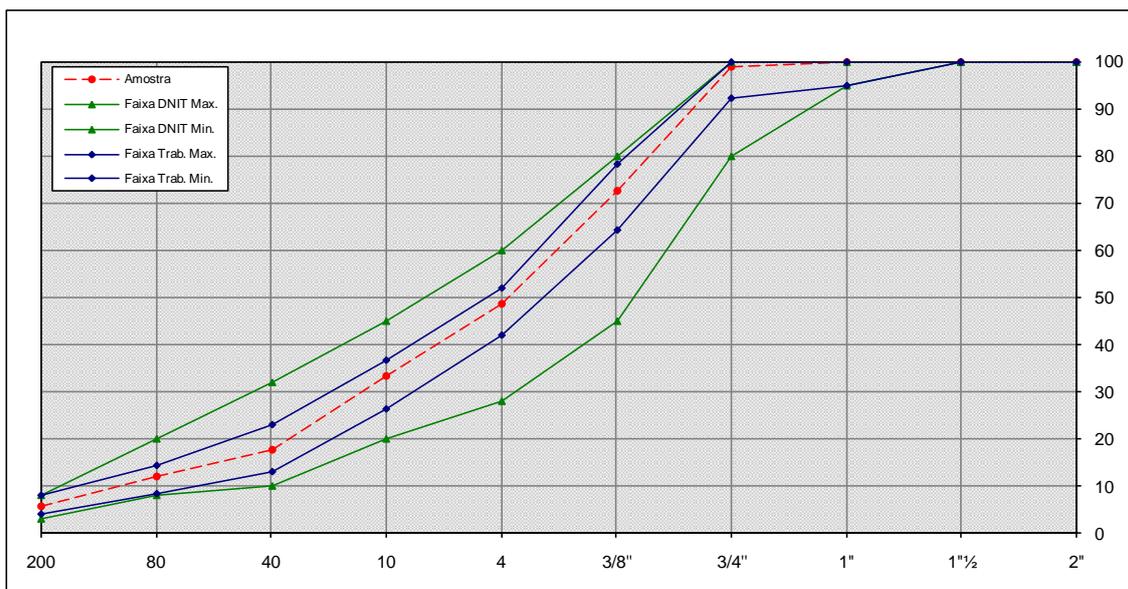


Figura 3.13 - Curva granulométrica do material

3.3. COLETA DE DADOS

As atividades previstas para a fase de coleta de dados, constituem um conjunto de ações que visam determinar informações de deformações, tensões, dados climáticos e avaliação funcional do pavimento, o que permitirá avaliar a qualidade e a durabilidade do pavimento construído com os resíduos e rejeitos da mineração.

É importante ressaltar que houve alteração de escopo do plano de trabalho para obtenção destas informações, conforme relatório parcial e ofício encaminhado a ANTT. As atividades na fase de coleta de dados, podem ser assim resumidas:

- a) Avaliação estrutural do pavimento com aplicação do ensaio LWD;
- b) Avaliação objetiva e subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis; e
- c) Determinação de bacias deflectométricas com aplicação do ensaio FWD.

As atividades exigem a criação de um sistema de controle de tráfego e sinalização de segurança específico, os quais são realizados por empresas qualificadas e certificadas para o serviço, devendo inclusive ser fiscalizada e vistoriada pela concessionária VIA-040, antes e durante a execução dos serviços.

Em relação ao levantamento das informações estruturais do pavimento por meio da técnica de LWD, foram executados ensaios conforme Figura 3.14 e programação apresentada no Quadro 3.1, apresentado abaixo, respectivamente.



Figura 3.14 - Execução do Levantamento LWD, na pista experimental.

Quadro 3.1 – Cronograma de leituras LWD

Calendário						
Janeiro 2020						
Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
-	-	-	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	-
Fevereiro 2020						
Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
-	-	-	-	-	-	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
Março 2020						
Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	-	-	-	-
Abril 2020						
Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
-	-	-	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	-	-
Maio 2020						
Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
-	-	-	-	-	1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31	-	-	-	-	-	-
Junho 2020						
Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
-	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	-	-	-	-

 Dias de execução do LWD

Os dados médios de deformação (Smed) e módulo de elasticidade (Ewd) obtidos pelo LWD, estão apresentados na Tabela 3.26. Deve-se ressaltar que os valores constantes foram obtidos de uma média de 10 pontos levantados ao longo do pavimento, lembrando que o trecho experimental possui 100 m e por tanto estes pontos de levantamento ficaram espaçados de 10 metros entre si.

Tabela 3.26 – Valores médios de módulo de elasticidade e deformação via LWD

Dia	Evd (MPa)			Smed (10-2mm)		
	Média	DP	CV	Média	DP	CV
04/11/2019	76,94	13,72	17,83	30,1	0,073	24,09
21/01/2020	69,97	18,16	25,95	35,3	0,239	67,70
25/01/2020	63,16	14,05	22,24	37,5	0,193	51,64
27/01/2020	76,00	21,42	28,18	31,7	0,153	48,37
31/01/2020	64,17	21,55	33,59	38,8	0,238	61,43
03/02/2020	78,89	30,35	38,47	31,3	0,104	33,22
07/02/2020	75,31	16,42	21,80	31,2	0,080	25,59
10/02/2020	55,83	25,65	45,94	51,9	0,579	111,64
14/02/2020	59,62	20,34	34,12	43,6	0,367	84,21
17/02/2020	60,11	16,51	27,46	42,1	0,370	87,92
20/02/2020	62,18	7,96	12,81	36,7	0,062	16,92
29/02/2020	59,76	15,18	25,40	40,8	0,263	64,38
03/03/2020	68,11	12,37	18,16	33,9	0,077	22,64
09/03/2020	65,85	21,64	32,86	36,9	0,139	37,61
18/05/2020	89,41	27,17	30,38	27,1	0,108	39,96
29/06/2020	102,89	20,30	19,73	22,7	0,049	21,54

Pode-se observar claramente que o módulo de elasticidade apresenta valores baixos sendo o menor valor encontrado igual a 55,83 MPa, possuindo um coeficiente de variação para este dia de avaliação igual a 45,94%. Ou seja, verifica-se que a superfície (estruturalmente), nos 100 metros avaliados, possui um comportamento heterogêneo. Ainda durante todo período de avaliação, verifica-se que a maior média para o trecho experimental, ainda em relação ao módulo de elasticidade, apresentou valor na ordem de 102,89 MPa, durante o período de estiagem, ou seja, período sem influência de infiltração nas camadas do pavimento, provenientes das águas das chuvas. Portanto, as camadas constituídas por rejeito são fortemente influenciadas pela variação da umidade interna das camadas do pavimento. No que se refere a média geral para os módulos obtidos nos diferentes períodos de medição, obteve-se módulo na ordem de 70,51 MPa. Isso quer dizer que em média o pavimento ofereceu as solicitações impostas pelo

tráfego rodoviário um valor relativamente baixo, o que está condicionado a levá-lo a experimentar maiores deformações e, conseqüentemente, atingir precocemente um estado de serventia abaixo do recomendado, com o surgimento de grandes deformações permanentes, e outras tantas patologias há que está sujeito o revestimento flexível.

Para fins de controle, fez-se a determinação do módulo e deformação 15 metros antes do ponto inicial do trecho experimental e 15 metros após o trecho experimental. O ponto anterior não sofreu nenhuma intervenção, enquanto o ponto posterior sofreu recapeamento, por meio de fressagem e enchimento de caixa. Estes pontos de controle apresentaram, respectivamente, módulo de elasticidade (Ewd) iguais a 72,7 MPa (antes) e 160,4 MPa (depois). Se compararmos estes valores, verifica-se que o trecho experimental se encontra estruturalmente com capacidade inferior ao pavimento que não sofreu intervenção com reconstrução, e muito defasado em relação ao que fora alvo de recapeamento.

Em relação às deflexões medidas com o LWD e, tomando como referência a deformação admissível de projeto, já apresentada e igual 60×10^{-2} mm, pode-se verificar que as deformações se encontram abaixo desta referência, mas que com pouco tempo de vida (menos de um ano) o trecho experimental apresentou como valor máximo medido ($51,90 \times 10^{-2}$ mm), levando a um consumo de 83,71% durante o seu primeiro período de chuvas. Isso pode impactar no consumo de fadiga ao longo do próximo ano, e fará com que estas deformações possam atingir valores acima do admissível na próxima estação chuvosa. A variação dos valores medidos também está muito alta, com coeficiente de variação chegando a 111,64%, ou seja, comportamento extremante heterogêneo para um curto segmento de 100 m de comprimento.

Visando realizar uma avaliação funcional da superfície do pavimento flexível construído (trecho experimental), realizou-se, no dia 18 de maio de 2020, trabalho de campo, onde foram levantados, por meio de medidas milimétricas e inspeção visual, os defeitos como trincas, fissuras, remendos, deformações permanentes, etc., conforme preconiza o procedimento 006/2003 (DNIT, 2003). Foram estabelecidas condições para aferir a degradação do pavimento com base nos cálculos de frequências absolutas e relativas das ocorrências inventariadas e fixação do Índice de Gravidade Global (IGG). As Figuras 3.15 e 3.16 ilustram o processo de medição realizado.



Figuras 3.15 – Medidas de deformações permanentes da trilha de roda.



Figuras 3.16 – Medidas de trincas, fissuras e remendos.

A seguir são apresentados na, Tabela 3.27, o resumo dos resultados obtidos, permitindo-se inferir sobre o IGG, que permite tecer conclusões a respeito das condições de serventia do pavimento.

Tabela 3.27 – Resultado da avaliação objetiva de superfície do pavimento flexível

Item	Natureza do Defeito	Frequência Absoluta	Frequência Absoluta Considerada	Frequência Relativa	Fator de Ponderação	Índice de Gravidade Individual	Observações
1	Trincas Isoladas FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR	0	0	0	0,2	0	
2	(FC - 2) J, TB	8	8	80	0,5	40	
3	(FC - 3) JE, TBE	1	1	10	0,8	8	
4	ALP, ATP, ALC, ATC	9		90	0,9	81	
5	O, P, E	0		0	1	0	
6	EX	0		0	0,5	0	
7	D	1		10	0,3	3	
8	R	1		10	0,6	6	
9	Média aritmética dos valores médios das flechas medidas em mm nas TRI e TER	11,85	6,15	90	$\frac{1A}{1} () \frac{1B}{x}$	40	
10	Média aritmética das Variâncias das Flechas Medidas em Ambas as trilhas	35,23	5,95	205,86	$\frac{2A}{2} () \frac{2B}{x}$	50	
Nº TOTAL DE ESTAÇÕES		n= 10	Σ IND. GRAVID. IND. =IGG			228	Péssimo

Conforme levantado na avaliação objetiva, o pavimento foi classificado como “péssimo”, indicando que tão precocemente (1 ano de vida) há a necessidade de se realizar intervenções para sua reconformação. Admite-se que a grande variação das deformações e resistência ao longo do período de análise, conforme apresentado pelos dados obtidos com o LWD, seja responsável pelo baixo índice de serventia instalado. O comportamento heterogêneo das camadas tem grande responsabilidade nas respostas das patologias ocorrentes. Apesar do pavimento ter sido alvo de rigoroso acompanhamento técnico durante seu processo executivo, e ter apresentado resultado satisfatório para os ensaios de controle realizados, o seu comportamento extremamente anisotrópico, heterogêneo (~provavelmente provocado pela variação do material recebido – frente de lavra) corrobora para que a camada de revestimento asfáltico ao longo do trecho seja solicitada de forma divergente fazendo surgir tão precocemente as patologias aferidas.

Finalizando, as campanhas de coleta de dados nos dias 18/05, 25/05, 26/06 e 29/06 de 2020, foram executadas as campanhas de ensaios envolvendo a aplicação do *Falling Weigh Deflectometer* (FWD), visando verificar as condições estruturais do pavimento. A Figura 3.17 a seguir ilustra a sequência de execução.



Figuras 3.17 – Processo de medição com o FWD

Com o intuito de se avaliar a evolução das deflexões reversíveis do pavimento asfáltico em períodos distintos, em ambas as trilhas de roda, realizou-se os trabalhos de campo anteriormente mostrados, levantando o segmento correspondente ao trecho experimental sobre o intervalo apresentado na Tabela 3.28.

Tabela 3.28: Intervalo quilométrico de estudo.

DEFLEXÕES LEVANTADAS PELO FWD – BR-040			
INICIO DE TRECHO	FINAL DE TRECHO	LADO	FAIXA
km 0	km 0,120	Esquerdo	2

Para a verificação das deflexões reversíveis do pavimento, promoveu-se levantamentos consoantes às diretrizes da norma ASTM D 4694 “*Standard Test Method for Deflections with A Falling-Weight-Type Impulse Load Device*”.

Para o efeito, julgou-se conveniente promover uma série de “batidas” em uma mesma faixa (faixa 2 lado esquerdo), na Trilha de Roda Interna (TRI) e na Trilha de Roda Externa (TRE), para obtenção dos valores deflectométricos. Os resultados obtidos são expressos com precisão de 0,01 mm (centésimos de milímetro). Para se realizar os ensaios de caracterização estrutural do pavimento, julgou-se importante garantir que os ensaios executados fossem capazes de aplicar uma pressão de contato da ordem de 5,6 kgf/cm².

Para efeito, e tendo em conta que um semieixo traseiro de um caminhão é composto por um par de rodas gêmeas, e que o FWD aplica carregamento único, a forma simulação das solicitações rodoviárias consistiu em se garantir a aplicação de uma carga de 4.100 kgf - soma das cargas correspondentes ao par de rodas gêmeas - no FWD, distribuída sobre uma placa circular de área compatível à aplicação da pressão de solicitação ($\sigma_c = 5,6 \text{ kgf/cm}^2$) ao pavimento.

Procurou-se adotar posicionamentos dos 7 geofones captadores das deflexões reversíveis do FWD, de forma a se obter maior grau de precisão nas linhas de influência a serem medidas. Tendo em conta as características de flexibilidade dos pavimentos asfálticos, foram adotados os posicionamentos recomendados pelo Programa SHRP; as posições são indicadas na Tabela 3.29 a seguir.

Tabela 3.29: Disposição e identificação dos Geofones.

DISPOSIÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DOS GEOFONES		
Geofone N ^o	Denominação da Deflexão Reversível	Distância em Relação ao Centro da Placa (cm)
1	D ₀	0
2	D ₂₀	20
3	D ₃₀	30
4	D ₄₅	45
5	D ₆₀	60
6	D ₉₀	90
7	D ₁₂₀	120

Para cada uma das datas anteriormente mencionadas e demais metodologias descritas, apresenta-se a seguir os resultados obtidos nos ensaios de campo FWD, por meio das Tabelas 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34, 3.35, 3.36 e 3.37, respectivamente, para Trilha de Roda Interna (TRI) e Trilha de Roda Externa (TRE) e períodos de dias crescentes.

Tabela 3.30 – Resultado dos ensaios de FWD, TRI em 18/05/2020.

PROJETO: FUNDAÇÃO GORCEIX						DATA DO LEVANTAMENTO: 18/05/2020							
TRECHO: BR-040 / PISTA TESTE						EXTENSÃO: 0,120 km							
LOCALIZAÇÃO: ITABIRITO - MINAS GERAIS						PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2							
DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO	PRESSÃO NOM. (kPa)	CARGA NOM. (kN)	TEMPERATURA (°C)		DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA INTERNA (TRI) (0.01 mm)							RAIO DE CURVATURA (m)
				Ar	Sup	D0	D20	D30	D45	D65	D90	D120	
0,000	0 + 0,0	638,0	45	18,0	25,0	41,9	26,6	17,2	8,4	5,0	2,6	2,0	130,7
0,020	1 + 0,0	615,0	43	18,0	25,0	38,7	26,9	19,8	12,2	8,2	3,7	2,2	169,5
0,040	2 + 0,0	642,0	45	18,0	25,0	45,2	30,6	21,1	11,9	7,4	3,3	2,1	137,0
0,060	3 + 0,0	617,0	44	18,0	25,0	44,2	30,2	21,2	12,5	7,8	3,5	2,2	142,9
0,080	4 + 0,0	650,0	46	18,0	25,0	39,0	26,6	19,2	11,8	7,9	4,1	2,9	161,3
0,100	5 + 0,0	638,0	45	18,0	25,0	39,0	27,1	19,8	12,9	8,9	4,9	3,9	168,1
0,120	6 + 0,0	642,0	45	18,0	25,0	40,1	28,2	21,2	14,0	10,2	5,6	3,8	168,1

Tabela 3.31 – Resultado dos ensaios de FWD, TRI em 25/05/2020.

PROJETO: FUNDAÇÃO GORCEIX						DATA DO LEVANTAMENTO: 25/05/2020							
TRECHO: BR-040 / PISTA TESTE						EXTENSÃO: 0,120 km							
LOCALIZAÇÃO: ITABIRITO - MINAS GERAIS						PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2							
DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO	PRESSÃO NOM. (kPa)	CARGA NOM. (kN)	TEMPERATURA (°C)		DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA INTERNA (TRI) (0.01 mm)							RAIO DE CURVATURA (m)
				Ar	Sup	D0	D20	D30	D45	D65	D90	D120	
0,000	0 + 0,0	608,0	43	14,0	20,0	40,5	27,3	18,1	8,9	5,6	2,9	2,2	151,5
0,020	1 + 0,0	624,0	44	14,0	20,0	35,8	27,3	21,0	13,7	9,2	4,1	2,4	235,3
0,040	2 + 0,0	622,0	44	14,0	20,0	41,8	30,2	21,7	12,7	7,8	3,5	2,0	172,4
0,060	3 + 0,0	624,0	44	14,0	20,0	43,8	31,3	21,6	12,8	8,2	3,5	2,2	160,0
0,080	4 + 0,0	641,0	45	14,0	20,0	40,1	27,8	20,4	12,4	8,4	4,2	3,0	162,6
0,100	5 + 0,0	646,0	46	14,0	20,0	40,7	29,3	21,5	13,9	9,7	5,5	4,3	175,4
0,120	6 + 0,0	623,0	44	14,0	20,0	39,0	29,3	22,3	15,1	10,4	6,0	3,9	206,2

Tabela 3.32 – Resultado dos ensaios de FWD, TRI em 26/06/2020.

PROJETO: FUNDAÇÃO GORCEIX				DATA DO LEVANTAMENTO: 26/06/2020									
TRECHO: BR-040 / PISTA TESTE				EXTENSÃO: 0,120 km									
LOCALIZAÇÃO: ITABIRITO - MINAS GERAIS				PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2									
DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO	PRESSÃO NOM. (kPa)	CARGA NOM. (kN)	TEMPERATURA (°C)		DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA INTERNA (TRI) (0.01 mm)							RAIO DE CURVATURA (m)
				Ar	Sup	D0	D20	D30	D45	D65	D90	D120	
0,000	0 + 0,0	588,0	42	19	26	38,1	20,0	11,6	6,8	3,1	2,0	1,5	110,5
0,020	1 + 0,0	595,0	42	19	26	32,5	23,1	15,3	10,0	5,0	2,5	1,3	212,8
0,040	2 + 0,0	588,0	42	19	25	37,2	24,0	15,5	9,3	4,7	2,6	1,6	151,5
0,060	3 + 0,0	583,0	41	19	25	37,2	24,1	15,8	9,7	4,4	2,2	1,2	152,7
0,080	4 + 0,0	592,0	42	19	25	32,5	21,0	14,1	9,4	4,9	3,0	2,0	173,9
0,100	5 + 0,0	585,0	41	19	25	37,3	25,2	17,3	11,6	7,0	4,7	3,2	165,3
0,120	6 + 0,0	596,0	42	19	25	33,0	23,5	17,4	12,3	7,5	4,6	2,7	210,5

Tabela 3.33 – Resultado dos ensaios de FWD, TRI em 29/06/2020.

PROJETO: FUNDAÇÃO GORCEIX				DATA DO LEVANTAMENTO: 29/06/2020									
TRECHO: BR-040 / PISTA TESTE				EXTENSÃO: 0,120 km									
LOCALIZAÇÃO: ITABIRITO - MINAS GERAIS				PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2									
DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO	PRESSÃO NOM. (kPa)	CARGA NOM. (kN)	TEMPERATURA (°C)		DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA INTERNA (TRI) (0.01 mm)							RAIO DE CURVATURA (m)
				Ar	Sup	D0	D20	D30	D45	D65	D90	D120	
0,000	0 + 0,0	725,0	51	21	14	40,1	26,1	16,4	9,3	4,7	2,6	1,8	142,9
0,020	1 + 0,0	659,0	47	21	15	30,3	23,3	17,6	12,1	6,9	3,5	1,8	285,7
0,040	2 + 0,0	710,0	50	21	15	42,7	29,5	20,9	13,2	6,5	3,3	1,9	151,5
0,060	3 + 0,0	680,0	48	21	15	43,1	30,4	21,7	13,7	7,1	3,4	1,9	157,5
0,080	4 + 0,0	675,0	48	21	15	33,6	24,8	17,6	11,9	6,6	3,8	2,5	227,3
0,100	5 + 0,0	699,0	49	21	15	36,8	26,5	18,9	12,5	7,7	5,0	3,4	194,2
0,120	6 + 0,0	684,0	48	21	15	34,9	26,4	20,2	14,3	9,1	5,6	3,2	235,3

Tabela 3.34 – Resultado dos ensaios de FWD, TRE em 18/05/2020.

PROJETO: FUNDAÇÃO GORCEIX				DATA DO LEVANTAMENTO: 18/05/2020									
TRECHO: BR-040 / PISTA TESTE				EXTENSÃO: 0,120 km									
LOCALIZAÇÃO: ITABIRITO - MINAS GERAIS				PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2									
DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO	PRESSÃO NOM. (kPa)	CARGA NOM. (kN)	TEMPERATURA (°C)		DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA EXTERNA (TRE) (0.01 mm)							RAIO DE CURVATURA (m)
				Ar	Sup	D0	D20	D30	D45	D65	D90	D120	
0,000	0 + 0,0	652,0	46	19,0	26,0	45,9	29,6	17,9	8,8	5,3	3,0	2,2	122,7
0,010	0 + 10,0	635,0	45	19,0	26,0	49,2	32,0	21,7	12,5	8,0	4,0	2,4	116,3
0,030	1 + 10,0	672,0	48	19,0	26,0	48,6	32,5	22,4	13,1	8,2	3,6	2,4	124,2
0,050	2 + 10,0	703,0	50	19,0	26,0	52,9	25,9	13,4	8,9	7,2	4,0	2,5	74,1
0,070	3 + 10,0	624,0	44	19,0	26,0	46,4	32,8	23,3	12,7	7,6	3,1	2,1	147,1
0,090	4 + 10,0	669,0	47	19,0	26,0	40,4	27,0	18,5	11,8	8,4	5,0	3,6	149,3
0,110	5 + 10,0	653,0	46	19,0	25,0	57,7	40,1	26,4	15,3	10,9	6,3	4,3	113,6
0,120	6 + 0,0	668,0	47	19,0	26,0	57,4	38,4	22,3	15,1	10,2	5,8	4,0	105,3

Tabela 3.35 – Resultado dos ensaios de FWD, TRE em 25/05/2020.

PROJETO: FUNDAÇÃO GORCEIX				DATA DO LEVANTAMENTO: 25/05/2020									
TRECHO: BR-040 / PISTA TESTE				EXTENSÃO: 0,120 km									
LOCALIZAÇÃO: ITABIRITO - MINAS GERAIS				PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2									
DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO	PRESSÃO NOM. (kPa)	CARGA NOM. (kN)	TEMPERATURA (°C)		DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA EXTERNA (TRE) (0.01 mm)							RAIO DE CURVATURA (m)
				Ar	Sup	D0	D20	D30	D45	D65	D90	D120	
0,000	0 + 0,0	661,0	47	15,0	21,0	48,6	31,9	20,3	10,1	5,9	3,0	2,3	119,8
0,010	0 + 10,0	668,0	47	15,0	20,0	56,4	39,0	26,9	15,1	9,0	4,4	2,9	114,9
0,030	1 + 10,0	654,0	46	15,0	20,0	50,2	34,7	24,7	13,9	8,4	3,5	2,4	129,0
0,050	2 + 10,0	608,0	43	14,0	20,0	52,3	37,2	24,4	14,0	8,4	3,8	2,7	132,5
0,070	3 + 10,0	625,0	44	14,0	19,0	51,0	36,9	25,3	14,2	7,8	3,2	2,2	141,8
0,090	4 + 10,0	616,0	44	14,0	20,0	41,7	28,9	20,6	12,6	8,4	4,2	3,1	156,3
0,110	5 + 10,0	642,0	45	14,0	20,0	57,3	40,5	27,3	16,2	11,0	6,0	3,9	119,0
0,120	6 + 0,0	664,0	47	14,0	20,0	56,7	36,5	26,4	16,1	11,2	6,1	3,8	99,0

Tabela 3.36 – Resultado dos ensaios de FWD, TRE em 26/06/2020.

PROJETO: FUNDAÇÃO GORCEIX				DATA DO LEVANTAMENTO: 26/06/2020											
TRECHO: BR-040 / PISTA TESTE				EXTENSÃO: 0,120 km											
LOCALIZAÇÃO: ITABIRITO - MINAS GERAIS				PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2											
DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO	PRESSÃO NOM. (kPa)	CARGA NOM. (kN)	TEMPERATURA (°C)		DEFLEXÕES DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA EXTERNA (TRE) (0,01 mm)						RAIO DE CURVATURA (m)			
				Ar	Sup	D20	D30	D45	D65	D90	D120				
0,000	0 + 0,0	587,0	41	18	25	37,2	21,7	14,0	7,0	3,2	2,1	1,3	129,0		
0,010	0 + 10,0	596,0	42	18	26	32,9	22,0	16,2	9,6	5,2	2,8	1,7	183,5		
0,031	1 + 11,0	585,0	41	18	25	38,9	27,1	19,2	11,6	6,0	2,9	1,6	169,5		
0,050	2 + 10,0	636,0	45	18	25	42,0	27,4	19,4	12,5	6,1	3,0	1,8	137,0		
0,070	3 + 10,0	573,0	41	19	25	43,5	29,0	18,2	11,2	4,8	2,3	1,3	137,9		
0,090	4 + 10,0	609,0	43	19	26	33,2	20,2	14,3	10,1	5,7	3,1	2,5	153,8		
0,110	5 + 10,0	579,0	41	19	26	49,5	35,8	21,5	14,5	8,1	4,8	3,1	146,0		
0,120	6 + 0,0	629,0	44	19	26	50,6	33,8	21,6	13,5	7,7	4,7	3,3	119,0		

Tabela 3.37 – Resultado dos ensaios de FWD, TRE em 29/06/2020.

PROJETO: FUNDAÇÃO GORCEIX				DATA DO LEVANTAMENTO: 29/06/2020											
TRECHO: BR-040 / PISTA TESTE				EXTENSÃO: 0,120 km											
LOCALIZAÇÃO: ITABIRITO - MINAS GERAIS				PISTA / LADO / FAIXA: DUPLA / ESQUERDO / FAIXA 2											
DISTÂNCIA (km)	ESTACA DE LEVANTAMENTO	PRESSÃO NOM. (kPa)	CARGA NOM. (kN)	TEMPERATURA (°C)		DEFLEXÕES DEFLEXÕES NA TRILHA DE RODA EXTERNA (TRE) (0,01 mm)						RAIO DE CURVATURA (m)			
				Ar	Sup	D0	D20	D30	D45	D65	D90		D120		
0,000	0 + 0,0	718,0	51	20	14	46,0	33,1	20,2	11,3	5,3	3,1	2,4	155,0		
0,010	0 + 10,0	738,0	52	20	14	38,7	27,5	19,2	11,6	6,6	3,7	2,2	178,6		
0,030	1 + 10,0	757,0	54	20	15	40,4	31,1	22,8	14,5	7,8	3,8	1,9	215,1		
0,050	2 + 10,0	756,0	53	20	15	43,5	34,1	25,0	15,5	8,1	4,0	2,0	212,8		
0,070	3 + 10,0	722,0	51	20	14	50,7	36,4	23,6	14,4	6,7	3,4	2,2	139,9		
0,090	4 + 10,0	738,0	52	21	15	35,1	25,2	18,6	11,9	7,1	4,3	2,8	202,0		
0,110	5 + 10,0	716,0	51	21	14	52,3	37,5	25,9	16,0	9,5	5,9	3,3	135,1		
0,120	6 + 0,0	718,0	51	21	14	54,1	36,1	24,8	15,2	9,1	5,9	3,5	111,1		

Com base na literatura, visando uma análise dos resultados apresentados acima e considerando o que preconiza atualmente o DNIT, para cálculo da deflexão máxima (D0), recomenda-se que seja aplicado uma correlação proposta por Duarte, Silva e Fabrício (1996), que leva em considerações as medidas de deflexões características obtidas via FWD (DFWD) e que, portanto, visa expressar qual seria o valor da deflexão em termos de Viga Benkelman (DB). Assim, tendo em vista que as deflexões anteriormente apresentadas são inferiores a 85×10^{-2} mm, usa-se a seguinte equação (correlação):

$$DB = 20,645 (DFWD - 19)^{0,351}$$

Diante do exposto os dados obtidos foram compilados e transformados para deflexões equivalentes da viga Benkelman (DB), cujos dados são apresentados a seguir, por meio das Tabelas 3.38 e 3.39, para as médias de D0 e do Raio de curvatura.

Tabela 3.38 – Resumo dos dados de deflexão (D0) em termos de Viga Benkelman (DB)

obtidos por FWD correlacionado, para as diferentes dadas de avaliação e seus respectivos valores de raio de curvatura, além da média geral destes valores, com seus respectivos valores estatísticos de desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

Trilha de roda externa (TRE).

DATA ==>>			18_05_TRE		25_05_TRE		26_06_TRE		29_06_TRE	
ESTACA DE LEVANTAMENTO			DEFLEXÕES (0.01 mm)	RAIO DE CURVATURA						
			D0	(m)						
	+	0,0	65,5	122,7	67,8	119,8	57,1	129,0	65,6	155,0
0	+	10,0	68,3	116,3	73,6	114,9	52,0	183,5	58,8	178,6
1	+	11,0	67,8	124,2	69,0	129,0	59,0	169,5	60,5	215,1
2	+	10,0	71,1	74,1	70,6	132,5	62,0	137,0	63,4	212,8
3	+	10,0	66,0	147,1	69,7	141,8	63,4	137,9	69,4	139,9
4	+	10,0	60,5	149,3	61,8	156,3	52,4	153,8	54,7	202,0
5	+	10,0	74,5	113,6	74,2	119,0	68,5	146,0	70,6	135,1
6	+	0,0	74,3	105,3	73,8	99,0	69,4	119,0	72,0	111,1

ESTACA DE LEVANTAMENTO			DEFLEXÕES (0.01 mm)			RAIO DE CURVATURA (m)		
			D0	DP	CV	R	DP	CV
	+	0,0	64,0	4,7	7,3	131,6	16,0	12,2
0	+	10,0	63,1	9,6	15,3	148,3	37,8	25,5
1	+	11,0	64,1	5,1	7,9	159,5	42,3	26,5
2	+	10,0	66,8	4,7	7,1	139,1	56,9	40,9
3	+	10,0	67,1	3,0	4,4	141,7	4,0	2,8
4	+	10,0	57,3	4,5	7,8	165,4	24,6	14,9
5	+	10,0	72,0	2,9	4,0	128,4	14,9	11,6
6	+	0,0	72,3	2,2	3,1	108,6	8,5	7,8

Tabela 3.39 – Resumo dos dados de deflexão (D0) em termos de Viga Benkelman (DB)

obtidos por FWD correlacionado, para as diferentes dadas de avaliação e seus respectivos valores de raio de curvatura, além da média geral destes valores, com seus respectivos valores estatísticos de desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

Trilha de roda interna (TRI).

DATA ==>>			18_05_TRI		25_05_TRI		26_06_TRI		29_06_TRI	
ESTACA DE LEVANTAMENTO			DEFLEXÕES (0.01 mm)	RAIO DE CURVATURA						
			D0	(m)						
	+	0,0	61,9	130,7	67,8	119,8	58,1	110,5	60,2	142,9
0	+	10,0	58,8	169,5	73,6	114,9	51,5	212,8	48,3	285,7
1	+	11,0	64,9	137,0	69,0	129,0	57,1	151,5	62,7	151,5
2	+	10,0	64,1	142,9	70,6	132,5	57,1	152,7	63,1	157,5
3	+	10,0	59,1	161,3	69,7	141,8	51,5	173,9	52,9	227,3
4	+	10,0	59,1	168,1	61,8	156,3	57,3	165,3	56,7	194,2
5	+	10,0	60,2	168,1	74,2	119,0	52,1	210,5	54,5	235,3

ESTACA DE LEVANTAMENTO			DEFLEXÕES (0.01 mm)			RAIO DE CURVATURA (m)		
			D0	DP	CV	R	DP	CV
	+	0,0	62,0	4,2	6,7	126,0	14,0	11,1
0	+	10,0	58,0	11,2	19,4	195,7	72,1	36,9
1	+	11,0	63,5	5,0	7,8	142,3	11,2	7,9
2	+	10,0	63,7	5,5	8,7	146,4	11,1	7,6
3	+	10,0	58,3	8,3	14,2	176,1	36,6	20,8
4	+	10,0	58,7	2,3	3,9	171,0	16,3	9,5
5	+	10,0	60,3	9,9	16,4	183,2	51,0	27,8

Em relação aos valores apresentados anteriormente, nas Tabelas 3.38 e 3.39, poucas são as deformações que não superaram a máxima admissível (60×10^{-2} mm). Para a grande maioria destes valores medidos, se apresentam próximos desta referência e, portanto, indicando a má qualidade da estrutura como um todo, inclusive em relação aos valores médios. Para os raios de curvatura da bacia de deflexão, verifica-se a inexistência de raio de curvatura abaixo de 100 m, que é o limite crítico. Porém, estes não são tão superiores a este limite mencionado. Diante deste contexto, e levando em consideração que o pavimento do trecho experimental é novo, afirma-se novamente que pavimento construído possui baixa capacidade estrutural. Verifica-se também em relação aos desvios padrão e coeficientes de variação levantados, o caráter variável de comportamento, tendo em vista os valores divergentes nos pontos de coleta, bem como para as diferentes datas de levantamento num trecho de apenas 100 m, corroborando para a afirmação de que os materiais aplicados possuem comportamento extremamente anisotrópico, heterogêneo e variável em função das condições ambientais.

Os dados obtidos para o FWD foram tratados, obtendo-se a média geral para o trecho experimental, para cada uma das quatro avaliações realizadas (datas diferentes). De posse dos valores médios que representam o trecho, em cada período de medição, foi realizada a determinação dos parâmetros de AREA (AASHTO, 1993), Índice de Curvatura da Superfície (*SCI*), conforme apresentado pelos autores Horak (2008) e Kim (2002), BDI (Base Damage Index), designado no Brasil como Índice de Dano de Base e o Índice de Curvatura da Base (*BCI* - Base Curvature Index), cujas formulações são apresentadas na sequência.

$$AREA = 15 \times \left[1 + 2 \times \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \times \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0} \right]$$

$$SCI = D_0 - D_{30}$$

$$BDI = D_{30} - D_{60}$$

$$BCI = D_{60} - D_{90}$$

E sendo:

R: Raio de Curvatura

AREA: Área da bacia deflectométrica

SCI: Índice de Curvatura da Superfície

BDI: Índice de Dano de Base
 BCI: Índice da Curvatura da Base
 D₀: Deflexões às distâncias 0 cm;
 D₃₀: Deflexões às distâncias 30 cm;
 D₆₀: Deflexões às distâncias 60 cm; e
 D₉₀: Deflexões às distâncias 90 cm.

Estes parâmetros podem ser visualizados na Tabela 3.40, a seguir.

Tabela 3.40 – Parâmetros de análise do FWD

	D0	D20	D30	D45	D65	D90	D120	R	AREA	SCI	BDI	BCI
TRE	49,8	32,3	20,7	12,3	8,2	4,4	2,9	119,1	33,8	29,1	12,5	3,9
	51,8	35,7	24,5	14,0	8,8	4,3	2,9	126,5	35,5	27,3	15,7	4,5
	41,0	27,1	18,1	11,3	5,9	3,2	2,1	147,0	33,7	22,9	12,2	2,6
	45,1	32,6	22,5	13,8	7,5	4,3	2,5	168,7	36,4	22,6	15,0	3,3
TRI	41,2	28,0	19,9	12,0	7,9	4,0	2,7	153,9	36,7	21,2	12,0	4,0
	40,2	28,9	20,9	12,8	8,5	4,2	2,9	180,5	38,5	19,3	12,5	4,2
	35,4	23,0	15,3	9,9	5,2	3,1	1,9	168,2	33,7	20,1	10,1	2,1
	37,4	26,7	19,0	12,4	6,9	3,9	2,4	199,2	37,4	18,3	12,1	3,1

Observa-se que diferentemente do preconizado pelas formulações anteriormente apresentadas e em função das características dos levantamentos realizados, houve a necessidade de utilização do valor de D₆₅ substituindo o D₆₀ nas formulações.

Estes valores obtidos podem ser confrontados com os valores característicos apresentados nas Tabelas 3.41, 3.42 e 3.43, mais abaixo. Para facilitar as análises tomou-se a média geral de AREA, SCI, BDI e BCI, cujos valores são, respectivamente, 34,8; 25,5; 13,9 e 3,6, em relação a trilha de roda externa, e 36,6; 19,7; 11,7 e 3,3, para a trilha de roda interna. Ainda, tomando com referência o D₀ obtido por correlação (DB) anteriormente apresentado, tem-se, como médias gerais, respectivamente para a trilha de roda externa e a interna, os valores de $65,9 \times 10^{-2} \text{mm}$ e $60,6 \times 10^{-2} \text{mm}$.

Assim, sendo a AREA encontrada característica de um pavimento muito flexível, essa é avaliada considerando o D₀ que se encontra entre os limites de 50 e 75 ($\times 10^{-2} \text{mm}$). Já os parâmetros BDI e BCI são enquadrados para um comportamento rígido.

De modo geral, baseando tanto nos resultados da trilha de roda externa e interna (que tiveram comportamentos similares), verifica-se que o pavimento está próximo à fadiga, de acordo com os valores de D₀. A curvatura da deformação experimentada pela

superfície do revestimento já é considerada severa. Entretanto, a resposta da camada de base é de comportamento mais rígido e, portanto, seguro. Neste contexto, verifica-se que a mistura utilizada para a base apresenta característica com potencial para aplicação na camada de sub-base.

Tabela 3.41 – Faixas do parâmetro AREA.

Tipo de Pavimento	Parâmetro AREA (cm)
Pavimento Rígidos (CCP)	60-90
CBUQ espesso (> 12 cm)	55-75
CBUQ fino (<12 cm)	40-55
Pavimento Muito Flexível	18-40

Fonte: Lopes (2012)

Tabela 3.42 – Classificação do pavimento a partir dos índices deflectométricos.

Estado do Pavimento	D₀	SCI	BDI	BCI
Muito Rígido	< 30	< 8	< 5	< 4
Rígido	30 - 50	8 - 25	5 - 15	4 - 8
Flexível	50 - 75	25 - 50	15 - 20	8 - 10
Muito Flexível	> 75	> 50	> 20	> 10

Fonte: Horak (2008).

Tabela 3.43 – Classificação do pavimento a partir dos índices deflectométricos.

Estado do Pavimento	D₀	SCI	BDI	BCI
Seguro	< 50	< 20	< 10	< 5
Em alarme	50 - 75	20 - 40	10 - 20	5 - 10
Severo	> 75	> 40	> 20	> 10

Fonte: Horak (2008).

4. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS

O presente estudo objetivou analisar as etapas executivas e os resultados laboratoriais de um trecho experimental composto por resíduos de mineração, bem como o comportamento estrutural deste pavimento experimental mediante o seu uso. Para isso, foi proposto um amplo programa experimental, com realização de investigações

laboratoriais em misturas constituídas de rejeito e estéril de mineração. Além disso, foi indicada a execução de um trecho experimental (etapa de campo), empregando as misturas que obtiveram os melhores resultados laboratoriais, nas camadas de base e sub-base de um pavimento rodoviário. A etapa se justifica pelo fato de que apenas resultados laboratoriais não confirmam o real comportamento destes materiais em campo. Nessa perspectiva um programa experimental foi delineado, com o propósito de executar o controle tecnológico de cada camada em campo, além de um programa para coleta de dados que permitem avaliar o comportamento estrutural e de severidade.

Portanto, a motivação dessa pesquisa está ancorada na destinação final aos resíduos de mineração. Ressalta-se que, atualmente vem sendo um dos grandes desafios da indústria mineradora, devido ao grande volume de material gerado e geralmente depositado em barragens. Para mais, torna-se relevante a utilização deste material como elemento alternativo para pavimentação, tendo em vista a pouca disponibilidade de áreas de empréstimo em Minas Gerais que possuem licenciamento ambiental para exploração.

Nessa perspectiva, após a análise técnica realizada ao longo desse estudo, ressaltam-se as principais conclusões e sugestões futuras, relativas ao desempenho desses materiais em laboratório e em campo.

Resíduos de mineração:

O rejeito e o estéril de mineração apresentaram peso específico elevado, devido à presença de óxido de ferro em maior proporção, em ambos os materiais, sendo esses resíduos compostos principalmente por óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de Silício (SiO_2).

Em relação à caracterização mineralógica, o ensaio de difração de raios X, realizado na amostra de rejeito, indicou a presença em maior quantidade de partículas de Quartzo (Q), dos argilominerais Hematita (H) e Alumina (Al).

Na classificação ambiental o rejeito foi classificado como um resíduo inerte classe II B, ou seja, este material mantém suas características durante o processo de decomposição, não havendo riscos de contaminação associada ao meio ambiente. O estéril, por sua vez, apresentou concentração de alumínio e ferro acima do valor máximo permitido pela NBR 10.004/2004, sendo classificado como Resíduo não inerte Classe II A.

Em termos do desempenho geotécnico, estes materiais, apresentaram-se medíocres e não satisfazem os requisitos de norma para a sua aplicação sem que sejam misturados a outros insumos.

As misturas obtidas em laboratório apresentaram os parâmetros mínimos para a composição das camadas do pavimento. Porém, o seu comportamento em condições de campo destoa daquelas encontradas no laboratório e a heterogeneidade de respostas no campo, aliada à redução de competência verificada pelos ensaios de campo e controles efetuados pós-obra, permitem afirmar que estes materiais não devem ser empregados nas proporções idealizadas neste projeto em uma rodovia do porte da BR-040. Segundo Oliveira (2013), uma alternativa de aplicação destes materiais no trecho idealizado pode estar associada à estabilização com cimento. Talvez seja essa uma possível solução, desde que se tenha viabilidade técnica e econômica. Alterando-se a posição da mistura aplicada na base, para a sua aplicação em sub-base (ou seja, utilizar o material que foi aplicado na camada de base na camada de sub-base), resultados estruturais poderão ser mais eficientes.

Verificou-se que o material aplicado na camada de sub-base é o principal responsável pela má qualidade do pavimento, uma vez que esta camada é extremamente deformável e leva as camadas que estão acima da mesma a experimentar deformações maiores que aquelas caso esta camada fosse competente, portanto, reduzindo a resistência e aumentando a deformação das camadas posicionadas imediatamente acima.

Um dos fatores que contribuíram para a divergência dos resultados obtidos em campo e em laboratório está associado à variação da frente de lavra, muito comum na mineração. Percebeu-se relativa diferença entre os materiais ensaiados em laboratório e aqueles recebidos em campo, visto que o trecho foi construído meses depois. Isso justifica a viabilidade de um estudo relacionado à estabilização química.

Outra importante observação é que nos ensaios laboratoriais os materiais são compactados em cilindros de paredes relativamente rígidas. Portanto, confinando o material, no campo isto não é observado e tendo em vista a característica granulométrica dos resíduos, que tendem a se apresentar de forma mais uniforme do ponto de vista granulométrico, tem-se um efeito redutor do imbricamento dos grãos maiores. Isso permite ao material compactado experimentar maiores deformações no campo uma vez

que não estarão confinados, culminando em uma menor estabilidade e maior deformação, gerando baixa qualidade como material de pavimento.

Trecho Experimental:

O dimensionamento do trecho experimental foi realizado utilizando a atual metodologia brasileira – Método do DNIT. Desta forma constatou-se que 62 cm de pavimento são mais que suficientes para atender ao tráfego previsto para a região do trecho experimental, consoante aos resultados de laboratório. Mesmo que tais resultados inicialmente fossem satisfatórios, optou-se por empregar na estrutura do trecho experimental algum componente que diminuísse a reflexão de trincas no revestimento asfáltico. Definiu-se assim, visto a variabilidade do tráfego naquela região, principalmente devido às mineradoras no entorno e, também, em função do desconhecimento do comportamento mecânico destas misturas nas condições de campo. Assim, a Goegrelha Haltelic C40/70 foi à escolhida para atuar nessa situação.

Nota-se que, apesar dos resultados de laboratório e dimensionamento indicarem um comportamento aceitável para o pavimento, os ensaios de campo de Viga Benkelman e DCP indicaram baixo desempenho do pavimento.

A aplicação de materiais não convencionais, conforme constatado, indicam a necessidade de avanços em estudos. Além da variação da frente de lavra já relatada, dados laboratoriais podem indicar bons resultados, mas o fato de o material não se encontrar confinado em cilindro quando se mede estabilidade (CBR), pode levar a falsa impressão que projetos executados com estes materiais atingiriam as demandas de projeto, enquanto que, na realidade de campo, o seu comportamento apresenta resultados abaixo do recomendável. Acumula-se o fato de que campanhas convencionais de controle de qualidade podem não ser capazes de medirem essa incapacidade, levando a conclusões equivocadas de durabilidade e estabilidade.

Sugere-se com trabalho futuro a execução de uma pesquisa de campo e laboratório, por meio de ensaios destrutivos, obtidos de amostras indeformadas do pavimento, avaliar o comportamento do material que foi aplicado na camada de base como camada de sub-base.

Ainda, complementarmente à proposta de execução de ensaios destrutivos com amostras de corpos de prova indeformados obtidos do campo, sugere-se realizar um estudo de viabilidade econômica da mistura proposta a ser estudada, frente às alternativas regionais, para validar a mistura aplicada na camada de base como camada de sub-base.

Equipamentos adquiridos, bolsistas beneficiados e produtos gerados:

A realização deste trabalho necessitou o investimento com aquisição de insumos e demais elementos apresentados na tabela a seguir:

- Equipamentos adquiridos:

06 UNID CÉLULAS DE PRESSÃO 200X7MM, SAÍDA DE 2600Hz a 4000 Hz, 3MPa, COM CABOS DE 20M ;

01 UNID DATALOGGER COM, NO MÍNIMO 6 CANAIS PARA AQUISIÇÃO DE SINAL ELÉTRICO TIO CORDA VIBRANTE (CÉLULAS DE PRESSÃO).

- Serviços contratados:

SERVIÇOS TÉCNICOS ESPECIALIZADOS PARA PARAMETRIZAÇÃO, ADEQUAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DE DATALOGGER DE SEIS CANAIS PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS ELÉTRICOS DOS SENSORES DE PRESSÃO TIPO CORDA VIBRANTE PARA AS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO EM RODOVIA, INCLUINDO TODOS OS INSUMOS NECESSÁRIOS;

ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO DE RESÍDUOS REJEITO DE MINERAÇÃO E SOLO LATERÍTICO (NBR 10006/2004);

LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO COM FWD EM 4 ETAPAS.

- Bolsistas beneficiados:

Aline Ferreira Andalicio – NUGEO/UFOP (Aluna de mestrado: Bolsista RDT);

Ana Luíza Silva Santos Félix – (Aluna de graduação da UFOP: Bolsista RDT);

Anderson Gonçalves de Azevedo – (Aluno de graduação da UFOP: Bolsista RDT);

André Gonçalves de Azevedo – (Aluno de graduação da UFOP: Bolsista RDT);

Bruno Oliveira Silva – (Aluno de mestrado: Bolsista RDT);

Fernando Augusto Rodrigues Machado – (Aluno de graduação da UFOP: Bolsista RDT);

Gustavo Pereira Viana – (Aluno de graduação da UFOP: Bolsista RDT);

Iara Santana de Azevedo – (Aluna de graduação da UFOP: Bolsista RDT);

Karina Marques Maciel Silva – (Aluna de graduação da UFOP: Bolsista RDT);

Letícia Alves Arantes – (Aluna de graduação da UFOP: Bolsista RDT);

Lucas Moreira Araújo – (Aluno de graduação da UFOP: Bolsista RDT);

Túlio Pena da Silva – (Aluno de graduação da UFSJ: Bolsista RDT).

- Publicações geradas:

Artigo completo intitulado “ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS” já aprovado para ser publicado no Cobramseg 2020 – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, a ser realizado entre os dias 15 e 18 de Setembro de 2020, em Campinas – SP.

Dissertação de Mestrado em Geotecnia da aluna Aline Ferreira Andalicio – NUGEO/UFOP, com o título “PROPOSTA DE EXECUÇÃO PAVIMENTO FLEXÍVEL COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO – EXECUÇÃO E ANÁLISE DE UM TRECHO EXPERIMENTAL”, a ser defendida em setembro de 2020.

Artigo a ser submetido em periódico indexado com o conteúdo da Dissertação de Mestrado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:1984. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2017a.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2017.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo – Índice Suporte Califórnia – ISC.** Rio de Janeiro, 2017c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: 2004a. Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005. Lixiviação de Resíduos - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT –ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR 10006. Solubilização de Resíduos - Procedimento.**Rio de Janeiro, 2004.

ABPv – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. **Informativo técnico sobre avaliação da resistência a derrapagem através de aparelhagem portátil.** Boletim técnico, Rio de Janeiro, n. 18, 1999.

ALBERNAZ, C. A. V. **Método simplificado de retroanálise de Módulo de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 99 p. Rio de Janeiro, 1994.

ARRIVABENI, B. S.**Alternativas para estabilização granulométrica equímica de solo de estradas florestais.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2017. 62 p.

ARRUDA, J. P. A. **Análise da influência do teor de ferro no potencial de liquefação de um rejeito de mineração.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós graduação em Geotecnia na Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2019. 134p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **E303-93 - Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester.** 1993.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D3282 – 93 – Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.** 1993.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D6951M-18 - Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications.** 2018.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **E965 – 96 - Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique.** 1996.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projetos e Restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BASTOS, L. A. C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós graduação em Geotecnia na Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013. 112p.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros.** Petrobrás. Abeda. Rio de Janeiro, 2010. 501p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros.** 1ª Ed. Programa Asfalto nas Universidades. Petrobras Distribuidora S.A., 2008.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** 1. ed. Abeda. Rio de Janeiro, 2006.

BUHLER, A. **Estudo do efeito de grelhas de reforço na restauração de pavimentos.** Tese de Doutorado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São Jose dos Campos, 2007. 323 p.

CHAVES, A. P. **Bombeamento de polpa e classificação: Teoria e prática do tratamento de minérios.** Vol. 1. 4º Edição. 304 p. Oficina de textos, 2012.

CAMPANHA, Ângela. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal de Viçosa, MG, 2011.

CARMO, C. A. T. **Utilização de geogrelha Haltelit C na restauração do pavimento da MG 424.** Revista Estradas. 54-60 p. Novembro, 2014.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias - 2011: Relatório Gerencial.** Brasília, DF, 2011. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Relatorios/Boletim%20Pesquisa%20CNT%20de%20Rodovias%202011.pdf>>. Acesso em: 30 julho 2019.

COOK, D. J.; SPENCE, R. J. S. **Buildings materials developing countries.** [S.I.]Wiley, 1983.335p.

Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo - DER/SP. **Projeto de pavimentação**. (2006). Disponível em: <ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-P00-001_A.pdf>. Acesso em: 22 novembro. 2019.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de ensaio.DNER 024/1994 – Pavimento – Determinação das deflexões pela Viga Benkelman**. Brasília, 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de ensaio - DNER-ME 035/1998. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**.Brasília, 1998.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de ensaio. DNER-ME 162/1994 – Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas**. Brasília: DNER, 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Método de ensaio DNER-ME 256/1994 - Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão**. Brasília: DNER, 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de ensaio DNER-ME 258/1994 - Solos compactados em equipamento miniature - Mini-MCV**. Brasília: DNER, 1994.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010).**Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). **DNIT 031/2006. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). **DNIT 133/2010.Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010).**DNIT 134/2010. Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência** – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010).**DNIT 137/2010. Pavimentação – Regularização do subleito – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010).**DNIT 139/2010. Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). **DNIT 141/2010. Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2014). **DNIT 144/2014. Pavimentação – Imprimação com ligante asfáltico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2014.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2012). **DNIT 145/2012. Pavimentação – Pintura de ligação com ligante asfáltico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2012.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2016). **DNIT 172/2016. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2016.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral.** Brasília: DNPM, 2016.

FERNANDES, G.; GOMES, R. C.; RIBEIRO, L. F. M.; PALMEIRA, E.M.; PEREIRA, R. A. **Comportamento Geotécnico de misturas solo-resíduos de minério de ferro para utilização em pavimentos.** 35º PAPv, Rio de Janeiro, 2004: 110 – 120p.

FERREIRA, P. N. **Avaliação da macrot textura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002. 161p.

FERREIRA, R. M. **Dimensionamento de um pavimento experimental para o tráfego de caminhões fora-de-estrada em planta de mina.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós graduação em Geotecnia na Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.

FRANCO, F. A. C. D. P., **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2007.

FRIBER, M. A. **Estudo da viabilidade de utilização do agregado calcinado contendo resíduo de mineração na utilização em camadas de pavimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

GALHARDO, Daniel Corrêa. **Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de mineração de ferro em camadas de base e sub-base em pavimentos rodoviário.** Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.

GILCHRIST, A. J. T. **Control of reflection cracking in pavements by the installation of polymer geogrids.** First International Rilem Conference on Reflective Crackinh in Pavements, Liege, Belgium. 350 – 357p. 1989.

GUIMARÃES, A.C.R. **Um método mecanístico-empírico para previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos.** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ: Rio de Janeiro - RJ, 2009.

HUHNHOLZ, M. **Asphalt reinforcement in practice.** Proceedings of the Third International Rilem Conference , Maastricht, Netherlands. 456-463 p. 1996.

IGRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e manejo de rejeitos de mineração.** Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>. Acesso em: 19 de outubro de 2019.

INGLES, O. G. & METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice.** Butterworths, Sydney – Melbourne – Brisbane, 1972.

LUZ, A.B. e LINS, F.F., **Introdução ao Tratamento de Minérios - Tratamento de Minérios.** 2004. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-179-00.pdf>>. Acesso em: 16 de outubro. 2019.

MACHADO, C. C.; **Construção e conservação de estradas rurais e florestais.** Viçosa: UFV, 2013.

MARQUES, G.L.D.O. **Pavimentação – TRN032.** Faculdade de Engenharia – Departamento de Transportes e Geotecnia. Universidade Federal de Juiz de fora. 2006. 210 f. Notas de aula.

MATTOS, J. R. G.. **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis, de ampliação da rodovia BR-290/RS – A implantação da Rede Temática de Asfaltos no Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio grande Do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2014.

MATTOS, J. R. G. **Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009. 137p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Interciência, 3ª ed., 2015.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Apostila de estabilização de solos.** Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos.** COPPE/UFRJ, 1987.

MG.GOV.BR.**Rodovias.** 2014. Disponível em: <<https://www.mg.gov.br/conheca-minas/rodovias>>. Acesso em: 19 Janeiro 2019.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo - SP. Ed. Villibor, 1995. 213p.

OLIVEIRA T. M. (2013). **Caracterização de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com a adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.

PASQUET , A. **Campagne nationale de glissance 1967en France. In: Colloque international sur La glissance et La sécuritté de La circulation sur routes mouillées.** Anais, Berlim717 – 732 p. Berlim, 1968.

PEREIRA, E. L. **Estudo potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estatístico.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PEREIRA, K.L. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** Dissertação de mestrado, UFRN, Natal, RN, 2012. 125 p.

PESSOA, F. H. C. **Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário.** 151 p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

PINTO, S. S. S. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de misturas de diferentes tipos de rejeito para aplicação em pavimentos.** Dissertação(Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de Carauá e Sisal com reforço em matrizes de solo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil , Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de janeiro, 2008.

PINTO, S.; PREUSSLER,. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** Rio de Janeiro: Editora Copiarte. 2002. 259 p.

Portes, Andréa M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de Minério de ferro nas consistências polpa e torta.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2013.

PUCRS - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. **O novo método de Dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil – Um Workshop para todos sobre sua importância no contexto nacional.** Relatório final de pesquisa - CONCEPA/ANTT. Rio Grande do Sul, 2017. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/RelatorioFinal.pdf>>. Acesso em: 26 Janeiro 2019.

RODRIGUES, André Bruttos. **Riscos da disposição de rejeitos da mineração e técnicas alternativas de disposição.** Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas., Ouro Preto, 2017.

RODRIGUES FILHO, O. S. **Características da aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários: estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo / Congonhas.** 2006. 263p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

SANTOS, M.; LIMA, D.; BUENO, B., **Estabilização dos solos com cal e betume.** In: 6º Reunião de pavimentação urbana, Santos, Abril, 1995.

SARAIVA, S. L. C. **Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários.** Dissertação de Mestrado em

Geotecnia. Ouro Preto: Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2006. 123 p.

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

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibras submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, CPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 2000, 132 p.

VEYS, J. R. A. **Steel reinforcement for the prevention of cracking and rutting in asphalt overlays.** Proceedings of the Third International Rilem Conference , Maastricht, Netherlands, 1996. 402-411 p.

VIANA, João Paulo; Da Silva Ana Paula M.; Cavalcante, André Luís B. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas.** Relatório de pesquisa, IPEA. Brasília, 2012.