



FÁBIO CÉSAR VILELA

**ADEQUAÇÃO GEOMÉTRICA DAS VIAS DA MINA DE CAPÃO XAVIER
VISANDO SEGURANÇA OPERACIONAL E GANHO DE PRODUTIVIDADE**

Nova Lima, MG

2021

FÁBIO CÉSAR VILELA

**ADEQUAÇÃO GEOMÉTRICA DAS VIAS DA MINA DE CAPÃO XAVIER
VISANDO SEGURANÇA OPERACIONAL E GANHO DE PRODUTIVIDADE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Lavra de Minas A Céu Aberto.

Área de Concentração: Lavra de Minas

Orientador: Vidal Félix Navarro Torres

Nova Lima, MG

2021

Título: Adequação geométrica das vias da mina de capão xavier visando segurança operacional e ganho de produtividade.

Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno () Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno – São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação(CIP)

V695a

Vilela, Fábio César

Adequação geométrica das vias da mina de capão xavier visando segurança operacional e ganho de produtividade. Fábio César Viela...[et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2021.

71 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2021.

Orientador: Vidal Félix Navarro Torres

1. Estrada de Minas. 2. Geometria. 3. Segurança. 4. Produtividade. I. Torres, Vidal Félix Navarro. II. Título.

CDD.23. ed. 622.23

Fábio César Vilela

**ADEQUAÇÃO GEOMÉTRICA DAS VIAS DA MINA DE CAPÃO XAVIER
VISANDO SEGURANÇA OPERACIONAL E GANHO DE PRODUTIVIDADE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Lavra de Minas a Céu Aberto].

Orientador: Prof. Vidal Félix Navarro Torres

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 24 de novembro de 2021 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Vidal Félix Navarro Torres
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV-Mi)

Eunírio Zanetti Fernandes
Membro externo

Carlos Roberto Campos Júnior
Membro interno – Vale

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/4E44-9A1F-1B2C-8075> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/4E44-9A1F-1B2C-8075> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 4E44-9A1F-1B2C-8075



Hash do Documento

F4BF248345470449FEA9411CDC054CCB8C5A302FCEA008E1F72B03EEB135CA0F

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 19/01/2022 é(são) :

- Carlos Roberto Campos Júnior (Signatário) - em 19/01/2022 15:48 UTC-03:00
Tipo: Assinatura Eletrônica
Identificação: Por email: carlos.campos.junior@vale.com

Evidências

Client Timestamp Wed Jan 19 2022 15:48:01 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -19.9684672 Longitude: -43.9702714 Accuracy: 12.544

IP 187.20.95.50

Hash Evidências:

5C80CA661EA11CB898F456407F8951EAEDB0E50676456FE2967EB738AA1D828E

- Eunirio Zanetti Fernandes (Signatário) - 211.472.210-49 em 19/01/2022 15:44 UTC-03:00
Tipo: Assinatura Eletrônica
Identificação: Por email: eunirio.zanetti@gmail.com

Evidências

Client Timestamp Wed Jan 19 2022 15:50:18 GMT-0300 (Brasilia Standard Time)

Geolocation Latitude: -20.1609839 Longitude: -43.9609921 Accuracy: 10.72700023651123

IP 187.20.214.139

Hash Evidências:

A55A1EB62D330391144A092BC8F078889190FC6DA5FDB0988CB886F7545E53F0

- Vidal Félix Navarro Torres (Signatário) - 275.950.565-00 em 19/01/2022 15:38 UTC-03:00
Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: vidal.torres@itv.org

Evidências

Client Timestamp Wed Jan 19 2022 15:38:26 GMT-0300 (GMT-03:00)

Geolocation Latitude: 38.6807995 Longitude: -9.1566962 Accuracy: 1644.5240191105331

IP 95.93.159.190

Hash Evidências:

56CBF36601B3896B7550C1E6A564F2D2EDFF54F3354409880477F3DF8039BB7D



RESUMO

Esse trabalho consiste na aplicação de metodologia estruturada para projeto de estradas não pavimentadas em operações de minas a céu aberto, envolvendo aspectos geométricos, estruturais e funcionais. Serão aplicadas técnicas e procedimentos que garantam, tanto a nível de projeto quanto de conservação de vias e acessos, potenciais ganhos em produtividade e eficiência operacional na frota de transporte, aumento de segurança operacional e redução da taxa de desgaste de pneus. A metodologia do estudo consiste na caracterização da situação atual da geometria da via e a produtividade dos caminhões, avaliar a influência de cada um dos parâmetros geométricos na segurança e na produtividade das vias de transporte que permitam uma maior segurança e produtividade no sistema de transporte da Mina de Capão Xavier.

Palavras-chave: Estradas de mina. Geometria. Segurança. Produtividade.

ABSTRACT

This work consists of the application of a structured methodology for the design of unpaved roads in open-pit mine operations, involving geometric, structural and functional aspects. Techniques and procedures will be applied that guarantee, both in terms of design and conservation of roads and accesses, potential gains in productivity and operational efficiency in the transport fleet, increase in operational safety and a reduction in the rate of tire wear. The study methodology consists of characterizing the current situation of the track geometry and the productivity of trucks, evaluating the influence of each of the geometric parameters on the safety and productivity of the transport lanes that allow greater safety and productivity in the transport system of the Capão Xavier Mine.

Keywords: Mining roads. Geometry. Safety. Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Levantamento das vias.....	14
Figura 2 - Distribuição de custos Mina nas diversas unidades operacionais.....	15
Figura 3 - Trecho inadequado.....	16
Figura 4 - Geometria proposta para adequação do trecho.....	17
Figura 5 - Tensões no Pavimento.....	20
Figura 6 - Estrada de Mina.....	21
Figura 7 - Sistema de camadas de um pavimento.....	22
Figura 8 - Espessuras das Camadas usualmente praticadas.....	22
Figura 9 - Largura de uma pista de rolamento.....	26
Figura 10 - Esquema de superelevação.....	27
Figura 11 - Condições limites de superelevação.....	28
Figura 12 - Grade em percentual.....	29
Figura 13 - Leira trapezoidal de dimensões adequada.....	29
Figura 14 - Composição de um pneu radial.....	30
Figura 15 - Diagnóstico – Trechos críticos (Largura dos trechos principais).....	34
Figura 16 - Diagnóstico – Trechos críticos (Grade dos trechos principais).....	35
Figura 17 - Velocidade versus raio de curvatura.....	36
Figura 18 - Diagnóstico – Trechos críticos (Raio de curvatura dos trechos principais).....	37
Figura 19 - Principais rotas em cores e acesso Britador primário e a pilha de estéril.....	41
Figura 20 - Divisão por trechos da rota Copasa (sentido mina britador).....	42
Figura 21 - Rota Copasa até o britador.....	43
Figura 22 - Representação das larguras da rota Copasa por faixa de cores.....	45
Figura 23 - Identificação de raios de curvatura críticos da rota Copasa, Acesso Sul e Mirante.....	46
Figura 24 - Divisão por trechos da rota Acesso Sul (sentido mina britador).....	47
Figura 25 - Representação das larguras da rota do Acesso Sul por faixa de cores.....	49
Figura 26 - Identificação de raios de curvatura críticos da rota Copasa, Acesso Sul e Mirante.....	49
Figura 27 - Divisão por trechos da rota Mirante.....	50
Figura 28 - Representação das larguras da rota da rota Mirante por faixa de cores.....	53
Figura 29 - Identificação de raios de curvatura críticos da rota Copasa, Acesso Sul e Mirante.....	53
Figura 30 - Critério de carregamento 10/10/20 para o caminhão 775G da Caterpillar.....	56
Figura 31 - Critério de carregamento 10/10/20 para o caminhão 777G da Caterpillar.....	56
Figura 32 - Raios de curvatura inadequados.....	58
Figura 33 - Larguras inadequadas.....	59
Figura 34 - Trechos com grade inadequado.....	61
Figura 35 - Trecho proposto para adequação geométrica (rampa do mirante).....	62
Figura 36 - Limite de restrição das cavidades naturais x Rampa da Copasa.....	65
Figura 37 - Adequação parcial na largura na rampa da Copasa.....	66
Figura 38 - Adequação parcial na largura e no grade na rampa do Mirante.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Litologias dos acessos principais	40
Tabela 2 - Ângulos operacionais	40
Tabela 3 - Distância dos trechos até o britador.....	42
Tabela 4 - Relação entre a inclinação e os trechos da rota Copasa	44
Tabela 5 - Largura média por trecho da rota Copasa	45
Tabela 6 - Relação entre a inclinação e os trechos da rota do Acesso Sul.....	47
Tabela 7 - Largura média por trecho da rota Acesso Sul	48
Tabela 8 - Relação entre a inclinação e os trechos da rota 3 – Mirante.....	51
Tabela 9 - Largura média por trecho da rota Mirante	52
Tabela 10 - Principais litologias e suas respectivas densidades na Mina de Capão Xavier.....	55
Tabela 11 - Proposta de adequação de raio de curvatura	58
Tabela 12 - Proposta de adequação de largura	59
Tabela 13 - Proposta de adequação dos trechos com grades inadequados	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAT - Caterpillar

CPX - Capão Xavier

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

NBR - Norma Brasileira

NR - Norma Regulamentadora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativas	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Gerais.....	17
2.2 Específicos	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Características das vias não pavimentadas	19
3.2 Tecnologia construtiva dos sistemas rodoviários	21
3.3 Estradas de mineração no contexto da engenharia de rodovia	23
3.3.1 Aspectos sobre a estrutura e pavimento das vias	24
3.3.2 Geometria das vias	25
3.4 Vida útil dos pneus.....	30
3.4.1 TKPH Caminhões de Mineração	31
4 METODOLOGIA	32
4.1 Aspectos metodológicos do estudo	32
4.1.1 Largura	32
4.1.2 Grade	34
4.1.3 Raio de curvatura	36
4.1.4 Modelo de produtividade de transporte relacionados com as vias.....	37
4.2 Estudo de caso na mina de capão xavier	39
4.2.1 Informações geológicas e geotécnicas	40
4.2.2 Caracterização geométrica das vias da Mina de Capão Xavier	41
4.2.3 Largura das vias do acesso Copasa	44
4.2.4 Raios de curvatura da rota Copasa	46
4.2.5 Largura da rota acesso sul.....	48
4.2.6 Raios de curvatura da rota sul.....	49
4.2.7 Largura da rota do Mirante	51
4.2.8 Raios de curvatura da rota do Mirante	53
4.2.9 Parâmetros e custos operacionais de transporte na Mina de Capão Xavier	54
4.3 Proposta de melhoria da produtividade de transporte pela influência dos parâmetros geométricos da via.....	57
4.3.1 Avaliação dos raios de curvatura e proposta de melhoria	58
4.3.2 Análise da largura das vias e propostas de melhoria.....	59

4.3.3	Influência do grade e propostas de melhoria	60
4.3.4	Ganho na produtividade do transporte	62
4.3.4.1	Produtividade de transporte na situação da operação atual	63
4.3.4.2	Produtividade de transporte com a proposta geométrica de melhoria.....	64
5	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	65
6	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIAS.....	70

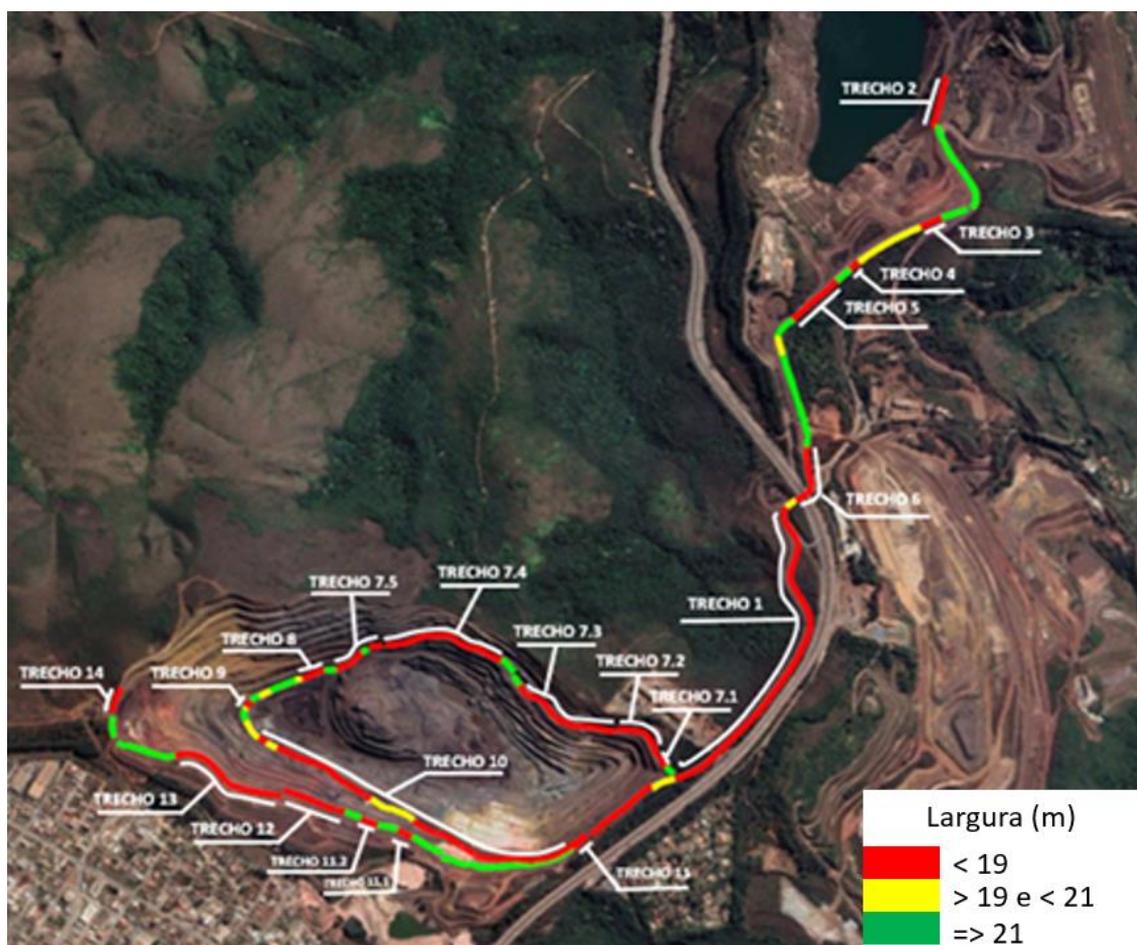
1 INTRODUÇÃO

As estradas são de vital importância para a atividade de lavra, tendo influência direta na produtividade da mina e conseqüentemente nos custos, pelo que, se faz necessária a adequação e manutenção. Essa pesquisa teve início nesta temática, onde a metodologia consistiu em um levantamento de todas as vias, seguida de uma pesquisa de campo, onde foi elaborado um diagnóstico da atual situação das vias, propiciando, finalmente, o desenvolvimento de propostas construtivas que minimizariam ou eliminariam os problemas existentes nas estradas estudadas.

A mina estudada foi Capão Xavier, localizada no município de Nova Lima.

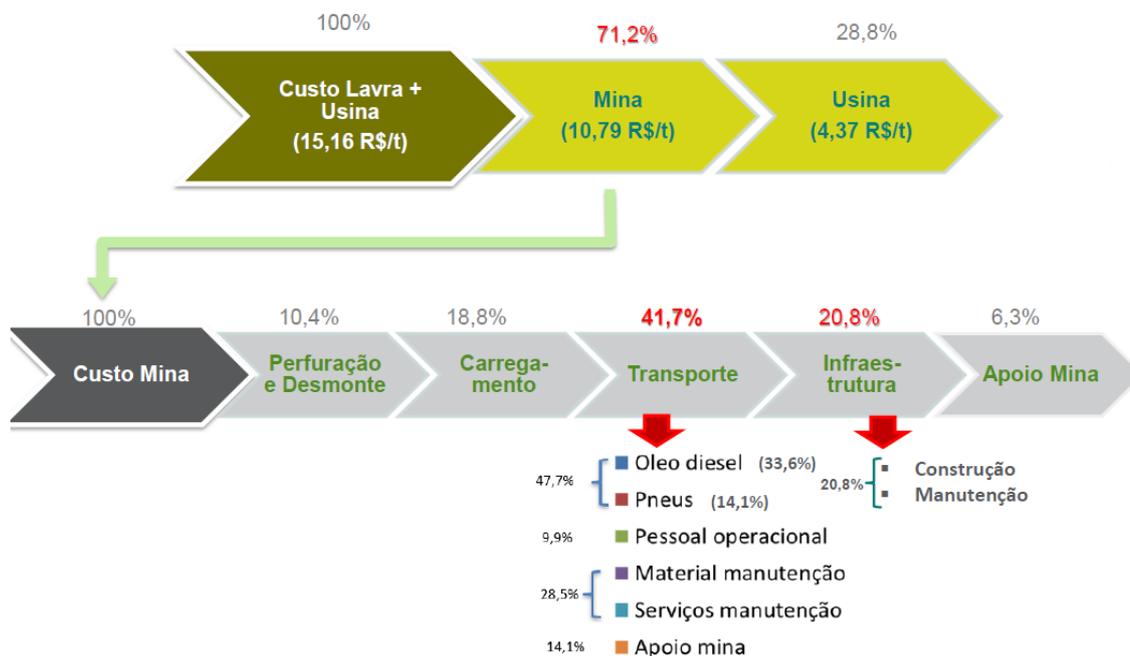
A partir desse trabalho, é possível adequar as estradas da mina de forma a proporcionar as condições adequadas de tráfego e que necessite de pouca manutenção, o que implica em segurança e diminuição dos custos.

Figura 1 - Levantamento das vias.



Fonte: Dados do autor.

Figura 2 - Distribuição de custos Mina nas diversas unidades operacionais.

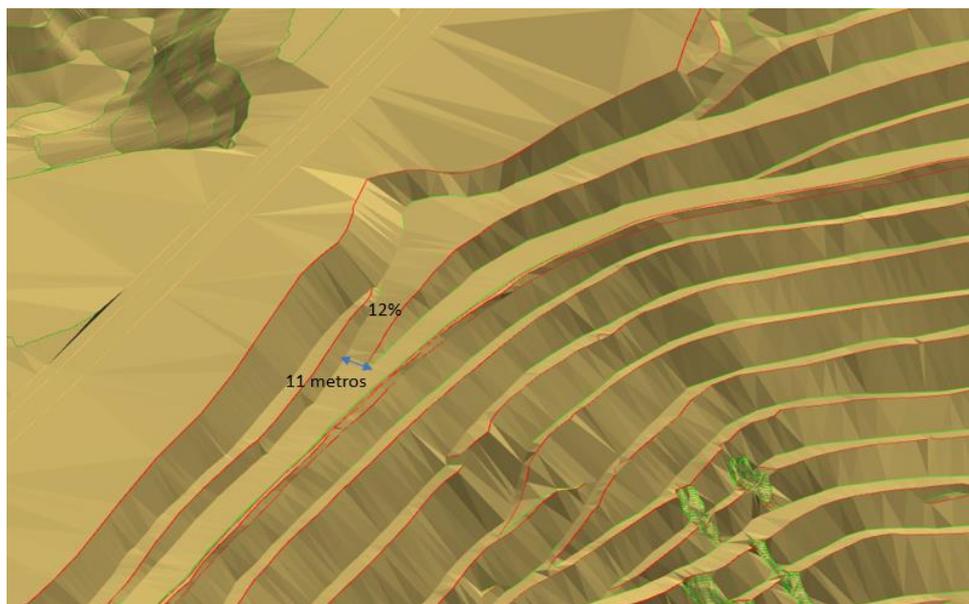


Fonte: Otimização de vias de transporte, apresentado pela equipe do ITV em 01/03/2021.

1.1 Justificativas

No cenário atual, as vias da Mina de Capão Xavier encontram-se, em alguns trechos, inadequadas para deslocamento com os equipamentos de transporte de grande porte, sendo eles os caminhões CAT-777, causando na maioria das vezes condições inseguras e perda de produtividade – figura 3.

Figura 3 - Trecho inadequado.



Fonte: Dados do autor.

Sabendo da grande importância que representam as vias adequadas, busca-se assimilar a necessidade de adequação da Mina de Capão Xavier, levando-se em conta as restrições acerca das interferências existentes.

Vislumbra-se uma contribuição significativa para a empresa em estudo, uma vez que serão realizados estudos e análises comparativas durante o processo de desenvolvimento da adequação. Mediante conhecimentos adquiridos ao longo do desenvolvimento, serão identificadas possíveis perdas no processo produtivo e, através de dados coletados e analisados, serão sugeridas ações que irão contribuir na segurança, minimização das perdas do processo produtivo e na redução da deterioração dos equipamentos.

2 OBJETIVOS

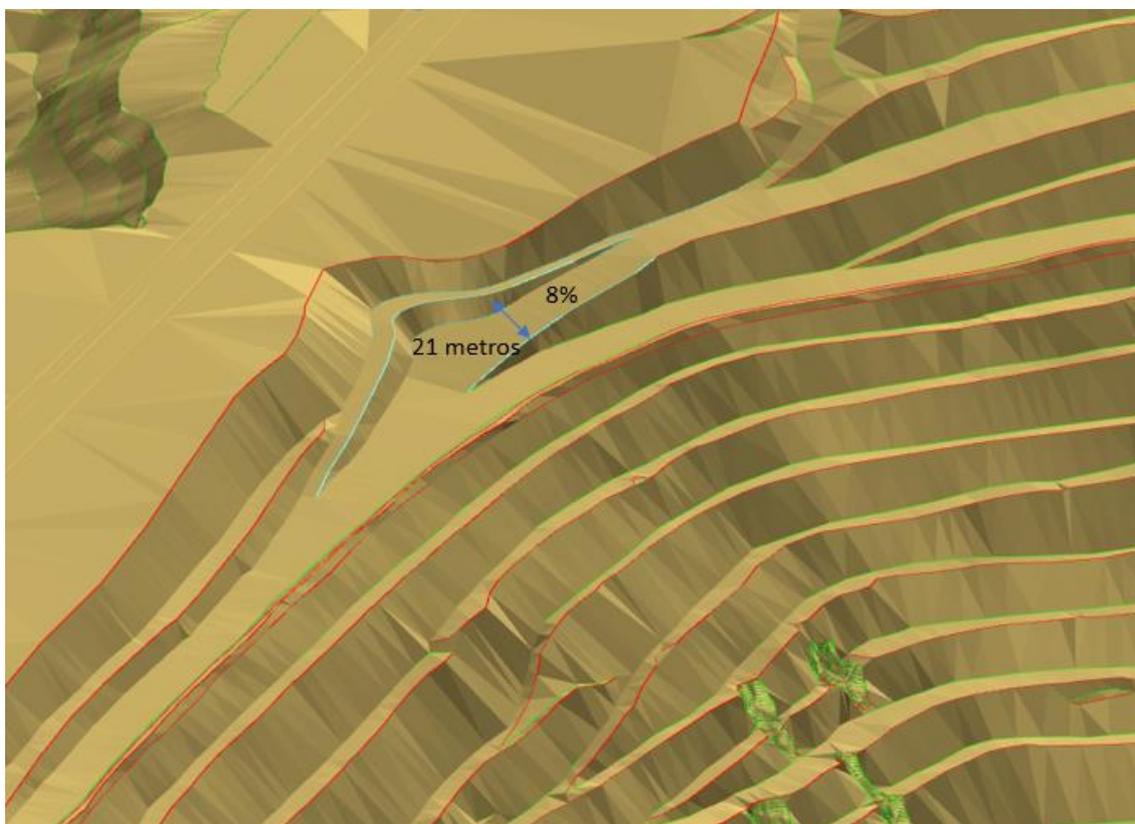
2.1 Gerais

Caracterizar a situação da geometria das vias de transporte da Mina de Capão Xavier, avaliar e buscar adequados parâmetros geométricos para aos tipos de caminhões utilizados e buscar alternativa de melhoria que permitam contribuir na maior segurança e produtividade na operação de transporte nesta mina.

A figura 4 representa a geometria proposta para adequação da via, ajustando a sua largura para 21 metros e grade de 8%, seguindo as premissas:

- elaboração do projeto para adequação do trecho;
- submeter projeto para avaliação geotécnica;
- dimensionar recurso;
- planejar adequação do trecho.

Figura 4 - Geometria proposta para adequação do trecho.



Fonte: Dados do autor.

2.2 Específicos

- Caracterizar a situação geométrica atual das vias, os caminhões e os respectivos parâmetros operacionais;
- avaliar a influência de cada um dos parâmetros geométricos na segurança e na produtividade, sendo os principais:
 - largura da via
 - grade
 - raio de curvatura
- buscar adequados parâmetros geométricos das vias de transporte que permitam uma maior segurança e produtividade no sistema de transporte da Mina de Capão Xavier.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão relacionadas as referências bibliográficas, conceitos e métodos de adequação de vias.

3.1 Características das vias não pavimentadas

As estradas, no contexto histórico do país foram abertas pelos colonizadores de forma imprópria, sendo construídas basicamente norteadas pela estrutura fundiária e pelas características do terreno, de modo a facilitar sua construção.

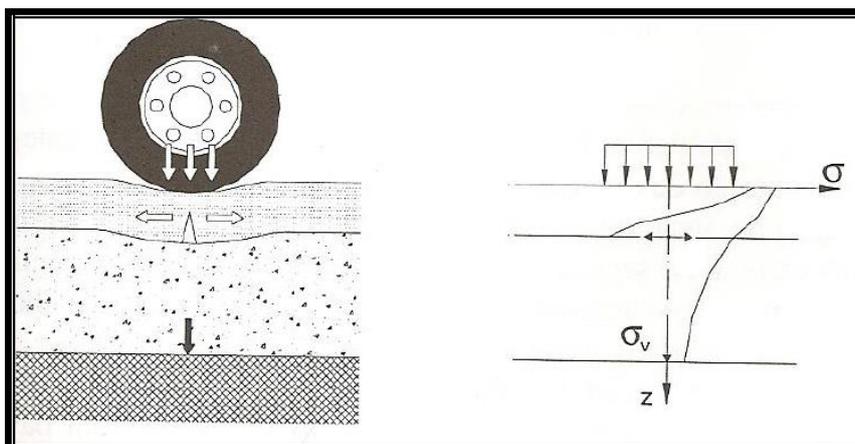
Nota-se que, apesar do expressivo avanço da engenharia rodoviária com aplicação de diversas tecnologias, ainda se utilizam metodologias empíricas na construção das vias não pavimentadas em especial as que compõem o conjunto de estradas de minas a céu aberto.

Entende-se como estrada não pavimentada, segundo a NBR 7207/82 da ABNT, emanada da antiga norma “Terminologia e Classificação de Pavimento”, TB-7, de 1953, revista em 1969 e em 1982, aquela que não se enquadra na seguinte cláusula: “O pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, economicamente e simultaneamente, em seu conjunto, a:

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

A Figura 5 a seguir mostra a distribuição em profundidade dos esforços aplicados por um pneu.

Figura 5 - Tensões no Pavimento.



Fonte: Medina, 2005.

As estradas não pavimentadas são estruturas constituídas pela terraplenagem ou o próprio relevo. Segundo Baesso e Gonçalves (2003), existem quatro categorias para a classificação de uma estrada não pavimentada:

- Categoria A: Estradas cuja superfície de rodagem é composta por agregados naturais, remanescentes de jazidas, desde que estes atendam a parâmetros relacionados à granulometria e ao tamanho.
- Categoria B: Estradas cuja superfície de rodagem é composta por agregados artificiais.
- Categoria C: Estradas cuja superfície de rodagem é constituída de materiais oriundos de jazidas de solos naturalmente estabilizados (saibros) ou com granulometria semelhante.
- Categoria D: Estradas cuja superfície é composta de materiais provenientes de seu próprio leito natural.

As estradas de mina, como mostrado na Figura 6, são consideradas estradas não pavimentadas, pois apesar de se enquadrarem nos dois primeiros tópicos do conceito da NBR 7207/82, elas não possuem resistência às forças de cisalhamento, ou seja, são desprovidas de material em seu revestimento que lhes ofereça resistência às forças horizontais. Levando em consideração os materiais que as constituem, elas se enquadram na categoria A, pois em sua construção são utilizados agregados naturais advindos da própria mina, reduzindo assim os custos.

Figura 6 - Estrada de Mina.



Fonte: Dados do autor.

As vias não pavimentadas são comumente encontradas nos acessos de zonas rurais, ligação intermunicipal, setor agropecuário e de mineração, correspondendo no Brasil a aproximadamente 90% de toda malha rodoviária (BAESSO & GONÇALVES 2003).

3.2 Tecnologia construtiva dos sistemas rodoviários

Com o passar do tempo, devido ao tráfego contínuo de veículos, ressaltando o que diz respeito à conservação da via, o desgaste normalmente induzirá, dentro de um período determinado, a uma rodovia que não oferecerá boas condições de tráfego, consumindo excessivamente os veículos que nela operam, aumentando assim o custo de rodagem.

Partindo deste princípio é que se deve ter um trabalho voltado para manutenção, recuperação e restauração das vias, com intuito de sempre executar estes serviços antes que a rodovia se deteriore a ponto de necessitar de um novo pavimento, com despesas mais elevadas.

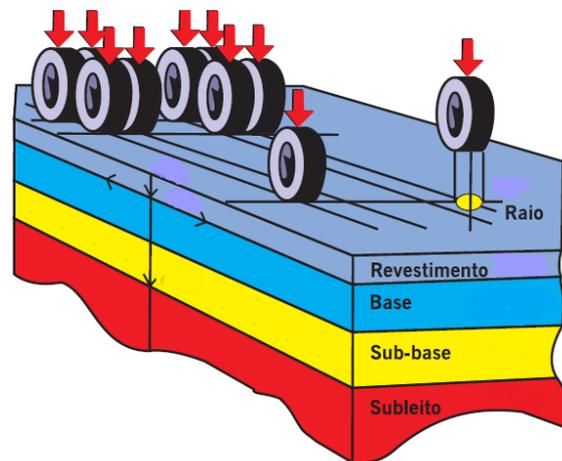
A tecnologia construtiva deverá levar em consideração diversas camadas, sendo que, para cada uma deverá ser utilizado uma metodologia específica.

Comumente as estradas são projetadas e constituídas de quatro camadas:

- Subleito
- Sub-base
- Base
- Revestimento

A disposição dessas camadas está indicada no esquema da Figura 7

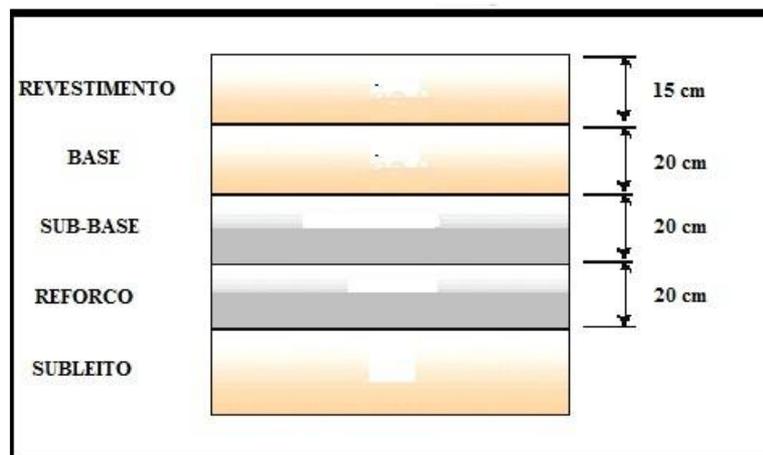
Figura 7 - Sistema de camadas de um pavimento.



Fonte: Bernuci, 2007.

O dimensionamento e construção dessas camadas são regidos pelo projeto estrutural, sendo mostrado na Figura 8 um exemplo desse dimensionamento.

Figura 8 - Espessuras das Camadas usualmente praticadas.



Fonte: Ferreira, 2007.

3.3 Estradas de mineração no contexto da engenharia de rodovia

A mineração divide-se em 04 fases: Pesquisa, Desenvolvimento, Lavra e Beneficiamento.

As atividades de mineração, propriamente ditas, são subdivididas nos processos de Lavra, correspondentes às operações diretas de extração do bem mineral (jazida) e nos processos de Beneficiamento, caracterizados pelas operações físicas e/ou químicas destinadas a modificar os bens minerais em termos de formas e/ou composição, visando adequá-los às aplicações industriais de interesse.

As vias de acesso em mineração são definidas a partir das necessidades do desenvolvimento mineiro dadas pelo planejamento e para sua implantação contam com as experiências de profissionais das atividades de lavra.

De uma forma geral, um dos principais objetivos das atividades de lavra, relativo às vias de acesso, tem sido os custos operacionais da frota de transporte. Assim, surgem como indicadores de gestão itens como consumo de óleo e pneus.

Desta forma, as estradas de minas ficam carentes de uma gestão de qualidade que possa produzir um impacto positivo, considerando-a como um ativo, a exemplo dos equipamentos de transporte.

Existem estudos muito desenvolvidos relacionados a estradas dentro da engenharia civil, como por exemplo, as estradas rodoviárias, tanto na sua concepção quanto na sua construção (DNIT, 2006).

Ainda que ocorram diferenças nas suas características primárias, é possível encontrar tecnologias de estradas rodoviárias que possam ser adaptadas à mineração, possibilitando um ganho considerável em termos de engenharia aplicada.

A atual percepção acerca das estradas de minas que são utilizadas para movimentação de minério, estéril e produtos, é que ainda não houve evolução tecnológica a ponto de se afirmar que se pratica uma engenharia satisfatória para a importância que o assunto tem no processo produtivo.

Devido à ação das intempéries, as estradas não pavimentadas apresentam sérios problemas em relação ao tráfego contínuo. Falhas de planejamento e/ou execução destas, além da falta de um gerenciamento adequado de manutenção, propiciam um aumento ainda maior de ocorrência de defeitos, acarretando diminuição da eficiência e trafegabilidade da via.

Fatores como drenagem e compactação das camadas constituintes das vias devem ser levados em consideração, pois se mal realizadas, ocasionam patologias que afetam diretamente a estrutura viária. Neste contexto se vê necessária à implementação de normas de construção a fim de minimizar ou até mesmo sanar estes problemas.

Segundo Ferreira (2007), nas vias de serviço que compreendem as principais estradas de acesso internos a empresas mineradoras, o estado de conservação é precário e apresentam técnicas de manutenção equivocadas, sistemas de drenagens deficientes e pouco ou quase nenhuma preocupação com a questão da deformação contínua do pavimento.

Os projetos de estradas de minas a céu aberto apresentam fatores governantes como:

- custo mínimo de transporte de minério e do estéril para fora da cava, abrangendo toda a vida útil da mina;
- diminuição do tráfego presente na mina de modo que propicie segurança aos usuários e facilite as operações;
- restrição às áreas de instabilidade de taludes, pois têm muita influência nos acessos de mina;
- longevidade da vida da estrada, implicando na redução dos custos de construção, operação e demanda de materiais de construção.

3.3.1 Aspectos sobre a estrutura e pavimento das vias

Com base no manual de estradas de mina da Vale, abaixo, os conceitos referentes ao projeto de camadas das vias.

- Revestimento

Promove tração, resistência à ação abrasiva do tráfego e ao cisalhamento, além de transmitir o carregamento do pneu para a base, selando-a contra a penetração de água superficial. O revestimento ideal para a construção de uma estrada de mina deve favorecer os seguintes aspectos:

- adequada trafegabilidade em condições climáticas variadas;
- diminuição de poeira excessiva no período seco;
- diminuição de piso escorregadio no período chuvoso;

- baixo custo e redução da necessidade de manutenção.

- Base

É uma camada de alta densidade e estabilidade. A sua função principal é distribuir as tensões criadas pelos pneus atuando na camada de revestimento, de tal forma que essas tensões não resultem em excessiva deformação da sub-base. Ela também protege a sub-base de mudanças de volume, expansão ou desagregação. Uma base estável é um dos fundamentos mais importantes no projeto de estradas. A projeção de um acesso sobre um material que não suporta adequadamente o peso do tráfego comprometerá severamente a mobilidade e o controle do veículo, assim como provocará a deterioração geral do acesso.

- Sub-Base

A sub-base, camada intermediária entre a base e o sub-leito, pode ou não existir. Ela é geralmente projetada sobre sub-leitos de solos extremamente incompetentes. Em geral é constituída por material granular. A sub-base promove drenagem e protege o sub-leito de contrações e expansões, aumenta o suporte estrutural e distribui o carregamento.

- Sub-leito

O sub-leito é a camada de fundação. Essa estrutura deve suportar todos os carregamentos aplicados nas camadas superiores. Essa camada pode ser constituída pelo próprio terreno natural (material in situ) ou por rocha ou solo compactados.

3.3.2 Geometria das vias

- Largura da pista de rolamento

A Norma Regulamentadora NR-22 do Ministério do Trabalho e Emprego, que trata dos requisitos de saúde e segurança ocupacional na mineração, define que a largura mínima das vias de trânsito em minas a céu aberto deve ser:

- duas vezes maior que a largura do maior veículo utilizado em pistas simples;
- três vezes maior que a largura do maior veículo utilizado em pistas duplas.

Ela sinaliza ainda que, quando o plano de lavra e a natureza das atividades realizadas não permitirem a observância desse item, deverão ser adotados procedimentos e sinalizações adicionais para garantir o tráfego com segurança.

Em termos operacionais, estradas muito estreitas são mais vulneráveis quanto às erosões durante os períodos chuvosos, podem reduzir drasticamente a vida dos pneus, pois forçam o equipamento a subir nas leiras, provocando desgastes laterais dos pneus, problemas de nivelamento e cortes. Esse problema ocorre frequentemente quando caminhões de maior porte são adicionados à frota existente em estradas projetadas para equipamentos menores.

Tannant (2001) definiu a largura mínima que uma estrada deve ter, em função da largura do equipamento de transporte e do número de vias, conforme equação (1).

$$L=(1,5*V+0,5)*X \quad (1)$$

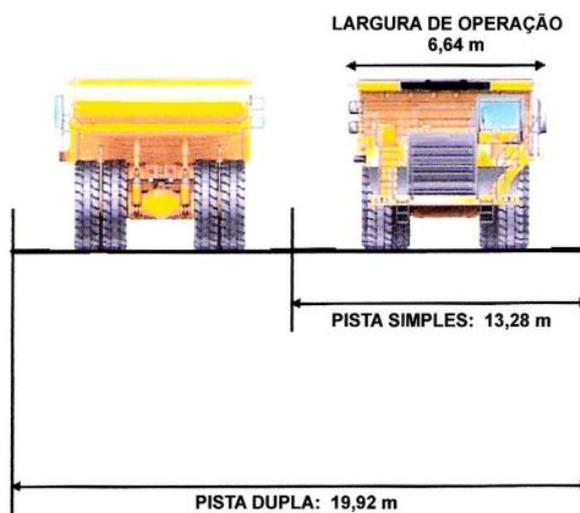
Onde:

L = largura da estrada (m)

V = número de vias

X = Largura do veículo (m)

Figura 9 - Largura de uma pista de rolamento.



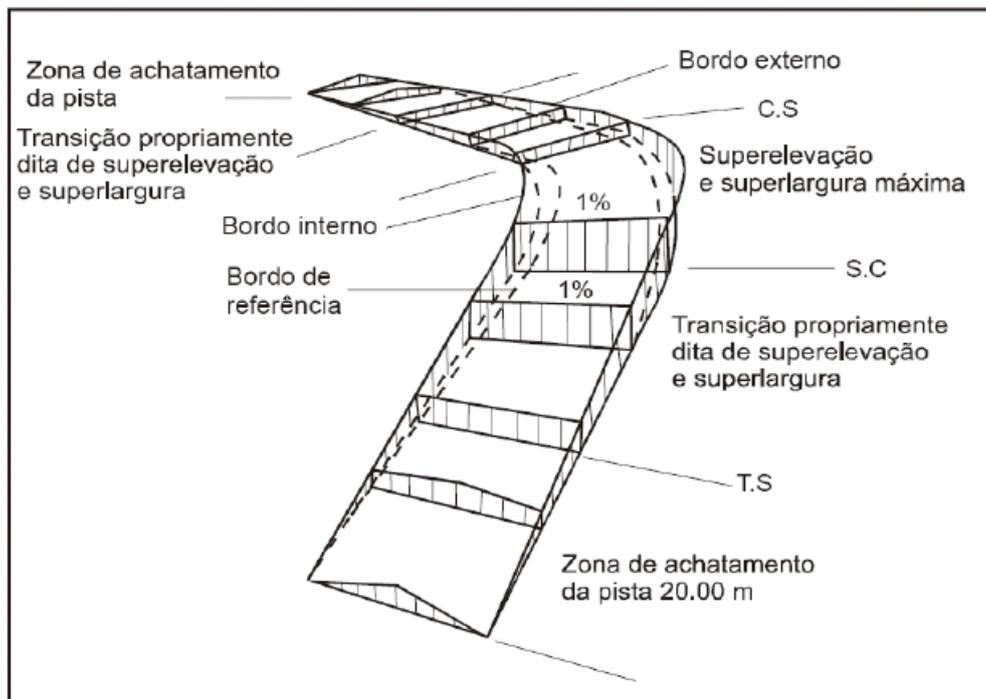
Fonte: Visser (2008).

- Superelevação

O Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes (DNIT) define superelevação como a inclinação transversal da pista nas curvas (Fig. 10), de modo a

compensar o efeito da força centrífuga sobre os veículos, assegurando ao tráfego condições de segurança e conforto (Brasil, 2006).

Figura 10 - Esquema de superelevação. Fonte: Manual DNIT (2006)



Fonte: Manual DNIT (2006).

O tráfego nas curvas pode gerar grandes esforços laterais nos pneus, contribuindo para a separação das lonas e elevado desgaste. A eliminação das forças se dá com a superelevação nas curvas, a qual depende do raio de curvatura e da velocidade (CATERPILLAR, 2010).

- Raio de curvatura

As curvas devem ser projetadas com o máximo de raio possível e mantendo-se suave (curvas pouco pronunciadas e evitando-se mudanças abruptas no raio), o que permite maior segurança e redução de congestionamento de tráfego. A projeção de curvas deve levar em consideração a performance dos caminhões. Curvas projetadas de tal forma a permitir velocidade constante, sem redução de marchas ao longo do trajeto, levam à performance otimizada dos caminhões, não provocando o aumento do tempo de ciclo, o que influencia diretamente os custos de transporte. A Equação 2 determina o raio de curvatura R (m) mínimo, considerando a superelevação aplicada, o coeficiente de atrito e a velocidade do veículo.

O cálculo do raio de curvatura mínimo R , pode ser mediante a equação (2):

$$R_{\min} = \frac{v_0^2}{127(e_{\max} + f_{\max})} \quad (2)$$

Onde:

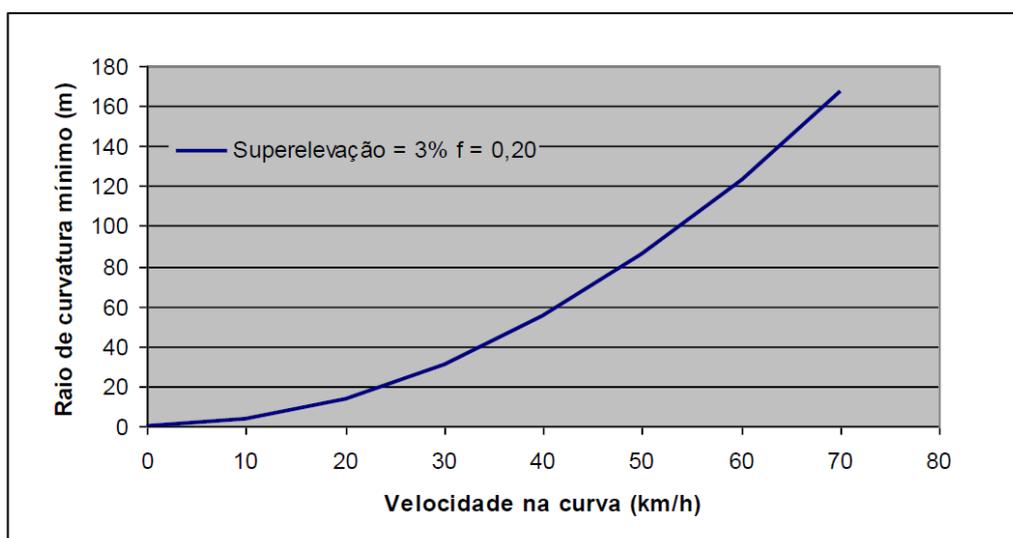
v_0^2 = velocidade do veículo (km/h)

e = superelevação aplicada (m/m de largura de estrada)

f_{\min} = coeficiente de atrito lateral entre os pneus e a superfície da estrada, normalmente considerado 0,3 (adimensional).

A Figura 11 mostra o raio de curvatura mínimo em função da velocidade do veículo na curva para coeficiente de atrito igual a 0,20 e superelevação igual a 3%.

Figura 11 - Condições limites de superelevação.

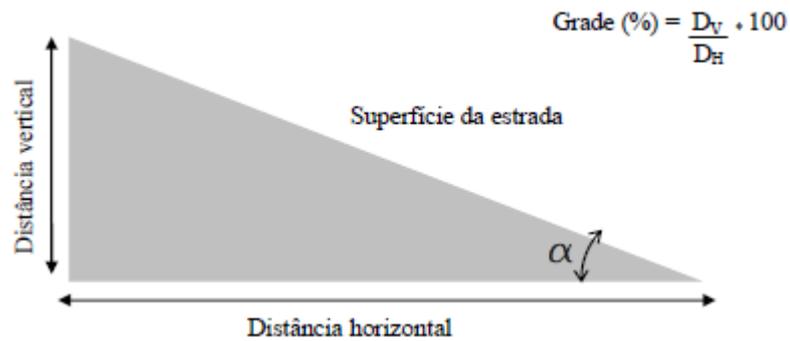


Fonte: Manual DNIT (2006).

- Grade

O grade de uma rampa, também chamado gradiente ou inclinação, é definido como a sua inclinação vertical em relação à horizontal, geralmente expressa em percentual (Fig. 12). O grade deve ser o mais regular e constante possível, evitando-se que mude em intervalos curtos. Grades irregulares provocam altos esforços no câmbio de transmissão e diminuição da velocidade dos equipamentos de transporte de grande porte.

Figura 12 - Grade em percentual



Fonte: Manual de estradas de Mina - Vale

- Leiras de segurança

Leiras de segurança são elementos geométricos imprescindíveis que auxiliam no aumento da segurança de trafegabilidade de equipamentos na mina. De acordo com a Norma Regulamentadora NR-22, as leiras devem ser construídas com altura mínima correspondente à metade do diâmetro do maior pneu de veículo que trafega pelas vias - figura 13.

Figura 13 – Leira trapezoidal de dimensões adequadas.



Fonte: Manual de estradas de Mina - Vale

3.4 Vida útil dos pneus

O pneu é um produto essencial à segurança dos usuários, garantindo melhor desempenho, estabilidade e performance dos veículos. É fabricado para atender os hábitos de consumo, assim como as condições climáticas e as características do sistema viário existente em cada país. Seu material é de difícil decomposição, de aproximadamente 600 anos, não é biodegradável (ANDRIETTA, 2002).

O descarte de pneus no meio ambiente causa poluição do solo e contaminação de áreas. Além disso, quando estão expostos à luz solar e às chuvas, os pneus começam a se desfazer tanto em líquidos como em gases, contaminando ecossistemas inteiros e a atmosfera.

Figura 14 - Composição de um pneu radial.



Fonte: ANDRIETTA (2002).

As falhas de uma superfície de estrada resultam em aumento da solitação do veículo e custos de manutenção, e retardam severamente a habilidade do mesmo percorrer o caminho com segurança. Essas dificuldades são usualmente maiores em superfícies de terra ou rochas acamadas. Uma maior manutenção do veículo é requerida sobre superfícies rochosas por causa do excessivo desgaste do pneu. Por ser

virtualmente impossível construir uma superfície rochosa livre de bordas dentadas, o desgaste contínuo acaba cortando os pneus dos veículos que por aí passam.

3.4.1 TKPH Caminhões de Mineração

TKPH é um algoritmo numérico fornecido pelos fabricantes de Pneus que faz uma correlação entre temperatura e fadiga do pneu.

Usado para aumentar a vida do pneu e diminuir o risco de acidente. É, efetivamente, uma característica essencial da capacidade de trabalho de um pneu). Para uma mesma dimensão e escultura, podem existir vários tipos de borracha, cada uma associada a um TKPH distinto. Os valores do TKPH figuram nas características de cada pneu. Eles dependem da capacidade de carga de cada dimensão, do número de Km permitidos a cada hora por tipo de pneu, a uma temperatura ambiente normalizada de 38 °C.

T = Toneladas

K = Kilômetros

P = Por

H = hora

Carga

Velocidade

Produtividade

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada compreendeu as etapas de coleta de dados e sua análise, culminando na proposição de tecnologias construtivas e sugestões para elaboração de planos de adequação.

4.1 Aspectos metodológicos do estudo

A natureza dessa pesquisa é do tipo aplicada, pois procura produzir conhecimentos para aplicação prática, os quais serão direcionados na solução de problemas encontrados.

Procedimento técnico baseado em um estudo de caso que aborda as vias inadequadas na Mina de Capão Xavier, onde serão realizadas análises dos parâmetros geométricos, sendo o foco do estudo a segurança operacional e consequentemente, o aumento de produtividade nos equipamentos de transporte.

O objetivo do estudo será exploratório, pois, por meio dele proporcionará maior familiaridade com os problemas.

Levando em consideração a forma como são planejados e operacionalizados atualmente, as rotinas em Capão Xavier.

4.1.1 Largura

Conforme Manual de Estradas de Mina Vale, a largura mínima da via sugerida é a recomendação de Tannant e Regensburg (2001) conforme a equação (3) para o dimensionamento da largura mínima de vias a fim de que não haja impacto na velocidade dos caminhões fora de estrada, sempre atentando para as obras nos acessos, de modo a corrigir estreitamentos de pistas.

$$L_{min} = (1,5 * N + 0,5) * L_e \quad (3)$$

Onde:

L_{min} : é a largura mínima da via (m);

N : o número de faixas da via;

L_e : é a largura do maior equipamento utilizado na mina (m).

Baseado nesta equação se propõe a equação (4) que permite estimar a influência da largura da via na velocidade do caminhão.

$$v_l = v \left(\frac{L_v}{L_{min}} \right) \quad (4)$$

Onde:

v_l : velocidade influenciada pela largura da via (km/h);

v = velocidade normal na via de tráfego do caminhão (km/h);

L_v : largura real da via (m) com $L_v \geq 0,8L_{min}$

L_{min} : largura mínima da via (m).

Restrições:

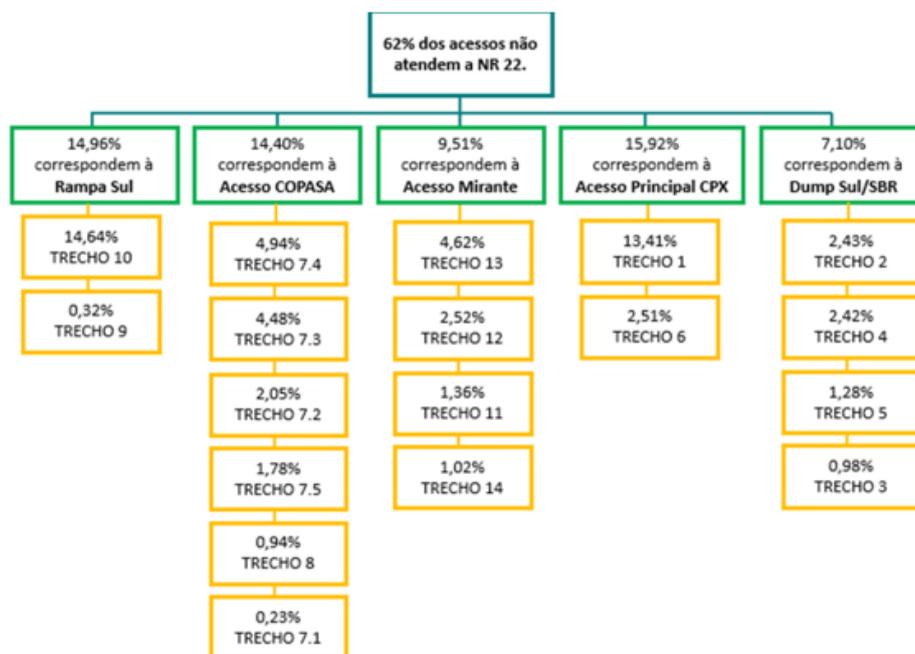
Se $L_v > L_{min}$ então $v_l = v$

Como exemplo para um caminhão CAT 793 C de largura 7,68 m aplicando a equação (4) a largura mínima resulta 27 m e aplicando a equação (4) para uma velocidade normal de 25 km/h e via de 25 m de largura resulta 23,14 km/h.

Figura 15 - Diagnóstico – Trechos críticos (Largura dos trechos principais)



% DE IMPACTO NOS TRECHOS



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Grade

Apesar de ser mais comum a expressão em percentual, o grade também pode ser dado em graus. Nesse caso a conversão para percentual é dada pela equação 7:

$$\text{Grade}(\%) = 100 \cdot \text{tg } \alpha \quad (7)$$

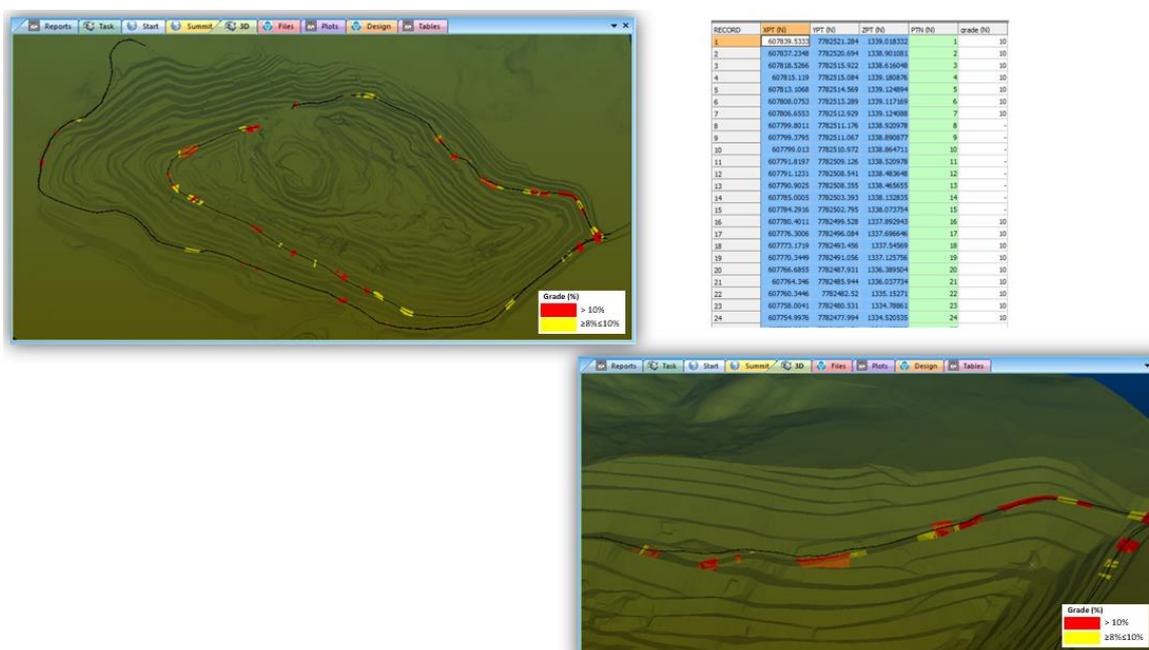
Onde:

α = ângulo entre a superfície da estrada e o plano horizontal (graus), considerando-se a distância horizontal igual a 100 metros.

A definição do grade ideal requer a análise das características topográficas e geométricas da estrada, assim como da performance do caminhão. Deve-se também considerar as distâncias de parada. Grades pronunciados exigem a redução de velocidade dos caminhões nas descidas para garantir distâncias de parada seguras e frequente redução de marcha também nas subidas, provocando perda de velocidade. Tais mudanças de velocidade resultam em perda de produtividade, consumo adicional de combustível, aumento de desgaste mecânico e de custos de manutenção.

É muito comum a adoção de grades que variam entre 8 e 10%, mas devem-se observar as especificações dos manuais dos equipamentos de transporte e as limitações geométricas das rampas.

Figura 16 - Diagnóstico – Trechos críticos (Grade dos trechos principais)



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.3 Raio de curvatura

Já o raio de curvatura pode ser calculado segundo a equação (8) de López Jimeno et al. (2014).

$$R = \frac{v^2}{127 * e_{max}} \quad (8)$$

Onde:

R : é o raio de curvatura mínimo (m);

v : é a velocidade máxima do equipamento;

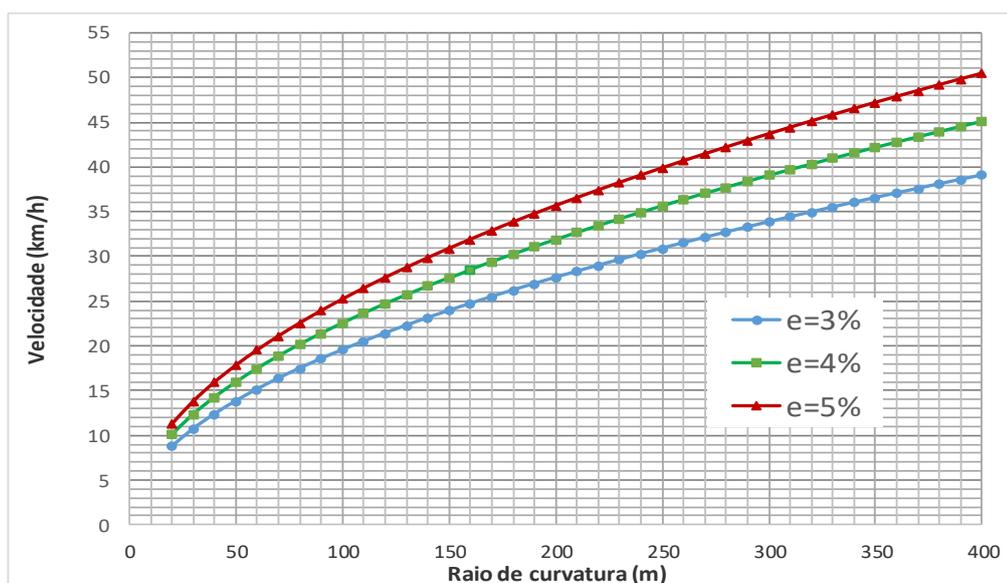
e_{max} : é a superelevação máxima;

Logo, isolando a velocidade na equação (8), se obtém a equação (9) da velocidade em função do raio de curvatura, da superelevação e do coeficiente de atrito entre os pneus e a via.

$$v_R = \sqrt{127 * R * e_{max}} \quad (9)$$

À título de exemplo, a Figura 17 mostra a variação da velocidade em função do raio de curvatura para a superelevação variando de 3 a 5% conforme indicado por López Jimeno et al. (2014) devido à questões de segurança (KAUFMMAN & AULT, 1977).

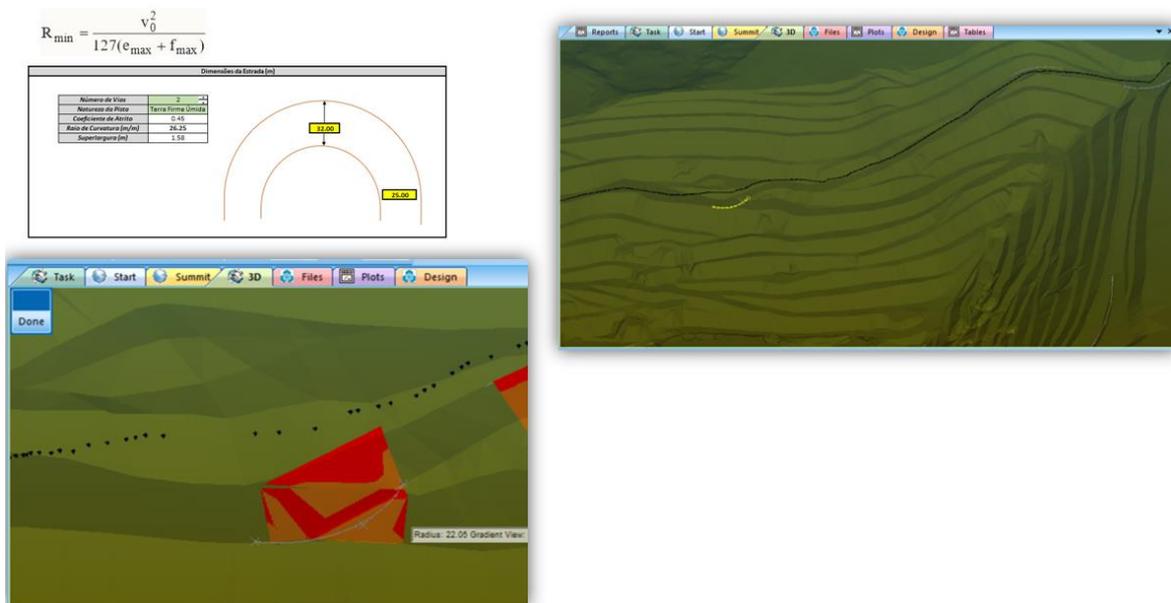
Figura 17 - Velocidade versus raio de curvatura



Fonte: Navarro Torres et al. (2017).

Verifica-se que as curvas deveriam ter no mínimo cerca de 150 metros de raio de curvatura para um caminhão fora de estrada atingir uma velocidade de 30 km/h para 5% de superelevação.

Figura 18 - Diagnóstico – Trechos críticos (Raio de curvatura dos trechos principais)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4 Modelo de produtividade de transporte relacionados com as vias

Os modelos matemáticos de produtividade são úteis para determinar a produtividade máxima sob a influência dos parâmetros geométricos (largura da pista e raios de curvatura, grade) e dos tempos fixos e variáveis. Os tempos fixos são representados pelo tempo de manobra no carregamento e no basculamento, tempo de fila no carregamento e no basculamento. Os tempos variáveis são determinados pelo tempo de ida do caminhão cheio até o britador e tempo de volta do caminhão vazio. Observa-se que os tempos variáveis são influenciados pela distância média de transporte, condições das vias, inclinação da estrada (grade) e velocidade do caminhão. O aumento da distância de transporte aumento consideravelmente os custos, em função do maior consumo de diesel.

Desde 2017 o instituto tecnológico da Vale (ITV) desenvolve pesquisas na otimização de vias. Um modelo de otimização da produtividade no transporte

desenvolvido por Navarro Torres (2017), apresentado no relatório de “Validação do Modelo de otimização aplicado na mina de Itabira” pode ser expressado pela equação (10):

$$P_t = \frac{60 * F_{cc}}{T_f + \frac{1}{16,67} \left(\sum \frac{d_c}{v_R} + \sum \frac{d_i}{v_i} \right) + \frac{d}{16,67} \left(\frac{1}{v_i} + \frac{1}{v_v} \right)} \quad (10)$$

Onde:

P_t: produtividade total (t);

F_{cc}: carga útil do caminhão (t);

T_f: tempos fixos (min);

d_c: distância de curvatura (m);

V_R: velocidade na curva (km/h);

v_i: velocidade referente ao percurso mais estreito (km/h);

d_i: distância de transporte (m);

Os tempos fixos estão compostos pelo tempo de carregamento, tempo de esperas e tempo de descarga.

A velocidade máxima de ida pode-se determinar mediante a equação 11:

$$v_i = \frac{366,97 * P * E_f}{F_c (f_r + f_\theta)} \quad (11)$$

Onde:

v_i: velocidade máxima do caminhão (km/h)

P: potência do motor de caminhão

E_f: eficiência de transmissão

f_r: coeficiente de resistência ao rolamento (kg/t);

f_θ : coeficiente de resistência devido à inclinação da via (kg/t)

A velocidade de volta v_i , para o estudo será determinado como $v_v = f \cdot v_i$ na que o fator f será resultado de relacionar a velocidade média de ida e volta medidos na prática e para o caso da mina em estudo.

Para o presente trabalho de pesquisa para o cálculo do coeficiente de resistência e de grade serão utilizados o descrito na equação 12

$$f_r = 2\% + 0,6\%pp \quad e \quad f_\theta = \text{Sen}\theta \quad (12)$$

Onde:

pp: penetração do pneu na via (cm)

θ : ângulo de inclinação do grade da via ($^\circ$)

4.2 Estudo de caso na mina de capão xavier

Para dar embasamento ao presente trabalho, foi estudada a Mina de Capão Xavier, pertencente à Vale.

A análise realizada teve início com o acompanhamento topográfico através da utilização do Software DESWIK, com base no script utilizado para verificação de parâmetros geométricos.

Após a realização das análises, foram realizadas visitas in loco, visando obter conhecimento das anomalias e identificação dos problemas encontrados. Com isso, foi possível adquirir conhecimento acerca do processo e das técnicas operacionais utilizadas.

Através dos acompanhamentos realizados, foi possível identificar quais as vias estão inadequadas no que tange à largura, grade e raio de curvatura. Sendo pontuadas as seguintes ações que levaram as vias em estados inadequados:

- necessidade de sequenciamento em função dos atrasos nas liberações de licenciamentos;
- frota de equipamentos de infraestrutura ineficiente.

4.2.1 Informações geológicas e geotécnicas

A tabela 1, representa a distribuição litológica dos materiais existentes nos acessos principais da Mina de Capão Xavier.

Tabela 1 - Litologias dos acessos principais

Mina	Amostra	Localização	Área	Litologia	Imagens
Capão Xavier	AM 01 - A/B	N: 7782642.160 E: 606680.470	Mina	Canga Ferruginosa	
Capão Xavier	AM 03 - A/B	N: 7782308.010 E: 607261.061	Mina	Argila Branca - Estéril	
Capão Xavier	AM 04 - A/B	N: 7782810.620 E: 606830.880	Mina	Dolomítico	
Capão Xavier	AM 05 - A/B	N: 7783069.520 E: 607069.320	Mina	Itabirito Compacto	
Capão Xavier	AM 06 - A/B	N: 7782781.640 E: 606801.420	Mina	Itabirito Dolomítico	

Fonte: Dados do autor.

O sequenciamento geométrico, assim como a adequação dos acessos são feitos respeitando os parâmetros geotécnicos referente à cada litologia existente na mina, conforme a tabela 2.

Tabela 2 - Ângulos operacionais

TALUDES DE 20 METROS DE ALTURA E BERMA DE 10 METROS	COMPACIDADE	ÂNGULO INTERRRAMP A POR CLASSE	ÂNGULO DE FACE MÉDIO DA LITO
LITOTIPO			
ITABIRITO, HEMATITA, ESTÉRIL FRANCO	COMPACTO	60°	85°
ITABIRITO, HEMATITA, ESTÉRIL FRANCO	MÉDIO	49°	70°
ITABIRITO, HEMATITA, ESTÉRIL FRANCO	FRIÁVEL	34°	45°
ATERRO		22°	30°
TALUDES DE 13 METROS DE ALTURA E BERMA DE 8 METROS			
LITOTIPO			
ITABIRITO, HEMATITA, ESTÉRIL FRANCO	COMPACTO	55°	85°
ITABIRITO, HEMATITA, ESTÉRIL FRANCO	MÉDIO	45°	70°
ITABIRITO, HEMATITA, ESTÉRIL FRANCO	FRIÁVEL	34°	50°
ATERRO		22°	30°

Fonte: Dados do autor.

4.2.2 Caracterização geométrica das vias da Mina de Capão Xavier

A Mina de Capão Xavier apresenta três trechos principais, sendo elas, a Rota Copasa, Acesso Sul e Mirante que foram escolhidos para estudo, elaborado pela equipe do ITV, conforme mostrado na figura 19.

Figura 19 - Principais rotas em cores e acesso Britador primário e a pilha de estéril.



Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

A rota 1 (Copasa), a rota 2 (Acesso Sul) e a rota 3 (Mirante) estão representados pelas cores verdes, amarelo e azul respectivamente. Observa-se que os três trechos se encontram em determinado acesso, tornando apenas um. O trecho em branco representa o trecho único até o britador.

Tabela 3 - Distância dos trechos até o britador

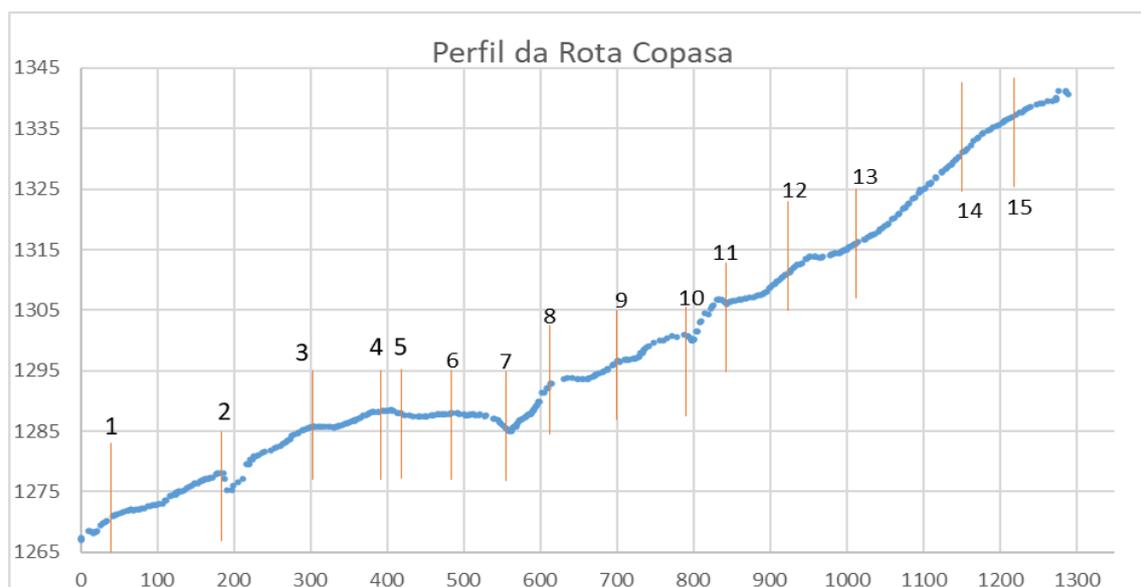
Rota	Total do trajeto distância até britador (km)
Rota 1 (Copasa)	4409.7
Rota 2 (Mirante)	5.209.5
Rota 3 (acesso sul)	5.450,96

Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Rota 1: Copasa

Rota Copasa apresenta um comprimento de 1.289,7 m, considerando apenas o trecho dentro da cava. Para determinar a inclinação da via (grade) foi necessário subdividir o trecho de acordo com a mudança do grade. A figura 20 representa a segmentação da (rota 1- Copasa) para determinação da inclinação da via (grade) correspondente apenas ao trecho dentro da mina. Observa-se que o trecho é muito irregular com mudanças constantes da inclinação da pista o que dificulta o deslocamento dos caminhões resultando em perda de produtividade. Caracterizado por vias muito estreitas, o caminhão sobe carregado até determinado ponto da mina e depois desce carregado até o britador (figura 21). A tabela 4 apresenta o tamanho do trecho percorrido pelo caminhão e grade relacionados com aquele percurso.

Figura 20 - Divisão por trechos da rota Copasa (sentido mina britador).



Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Observa-se a tabela 4 que apenas no trecho 13 a inclinação (grade) está fora do padrão (8% a 10%) recomendado segundo as pesquisas por Navarro Torres (2017) e pela Caterpillar (2012). Portanto, a inclinação dos trechos não significa um problema relevante nessa rota. Observa-se que durante o percurso do caminhão as inclinações (grades) mudam constantemente deixando a pista com ondulações.

O percurso do caminhão da mina em direção ao britador totaliza 4409,9 km. Sendo que, 59,15 % do percurso é realizado com o caminhão subindo. Na figura 21 está representado o trecho Copasa até o britador.

Figura 21 - Rota Copasa até o britador



Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Essas características da pista certamente interferem na velocidade do caminhão. É importante destacar que as condições da pista também influenciam na performance dos equipamentos, portanto a utilização da motoniveladora é importante para manter as condições da via em níveis aceitáveis. Também são necessárias correções de grades pela grande diferença entre os mesmos.

Tabela 4 - Relação entre a inclinação e os trechos da rota Copasa

	Grade	DMT (trecho)
Trecho_1	9.71%	44.59
Trecho_2	4.99%	133.50
Trecho_3	6.13%	126.70
Trecho_4	3.23%	80.29
Trecho_5	-2.95%	29.71
Trecho_6	0.79%	61.18
Trecho_7	-2.66%	55.42
Trecho_8	8.63%	82.54
Trecho_9	3.98%	79.79
Trecho_10	4.81%	76.33
Trecho_11	8.35%	124.80
Trecho_12	5.72%	92.22
Trecho_13	11.71%	117.91
Trecho_14	9.40%	77.69
Trecho_15	5.71%	57.72

Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

4.2.3 Largura das vias do acesso Copasa

A rota apresenta trechos muito estreitos com larguras médias variando de 15 a 22 m. Através da tabela 5 é possível perceber essa variação de largura no trajeto. A figura 22 mostra a largura dos trechos representados por faixa de cores.

Tabela 5 - Largura média por trecho da rota Copasa

Trecho	Largura média (m)
1	15
2	16
3	16
4	16
5	16
6	22
7	22
8	17
9	17
10	15
11	15
12	21
13	19
14	19
15	22

Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Figura 22 - Representação das larguras da rota Copasa por faixa de cores.

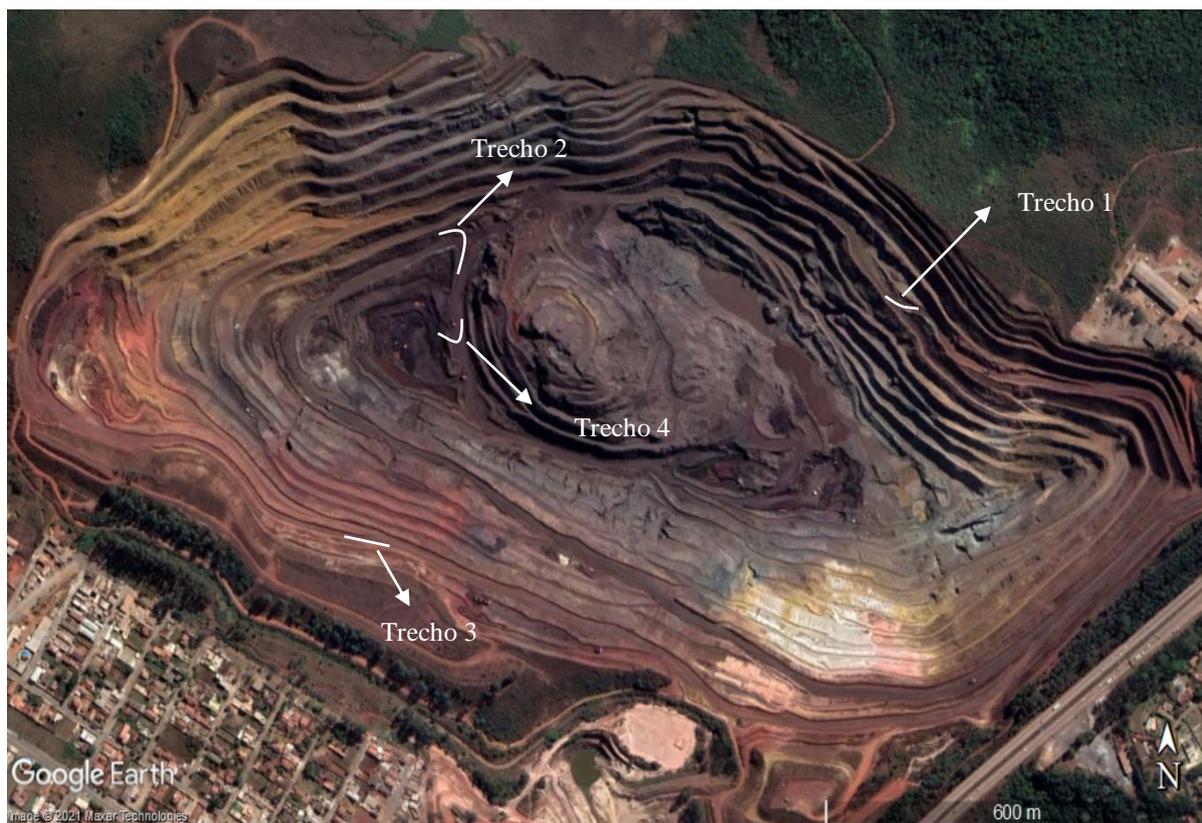


Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

4.2.4 Raios de curvatura da rota Copasa

A mina apresenta nessa rota um raio de curvatura crítica representado na figura 23 com trecho 1 em torno de 15m o que que dificulta a manobra do caminhão e ocasionando redução de velocidade.

Figura 23 - Identificação de raios de curvatura críticos da rota Copasa, Acesso Sul e Mirante.

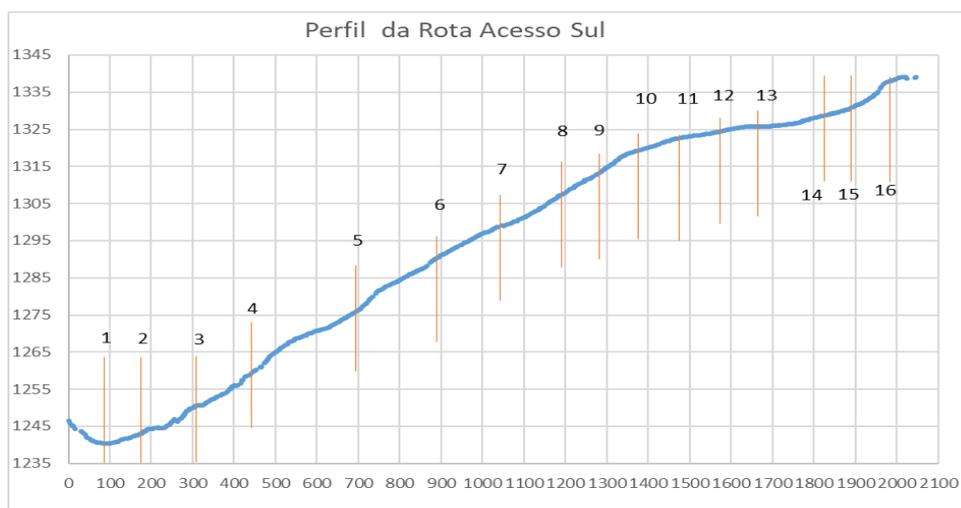


Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Rota 2: Acesso Sul

O Acesso Sul apresenta uma variação de grade mais uniforme conforme a figura 24 e dados apresentados na tabela 6. A inclinação média da via está em 4.45%. Durante o percurso até o britador o caminhão sobe carregado em 50.5% do trajeto de um total de 5.209,5 km.

Figura 24- Divisão por trechos da rota Acesso Sul (sentido mina britador)



Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Tabela 6 - Relação entre a inclinação e os trechos da rota do Acesso Sul

	Grade	DMT (m)
Trecho 1	-6.35%	97.20
Trecho 2	3.55%	79.31
Trecho 3	5.75%	156.37
Trecho 4	8.89%	135.66
Trecho 5	6.45%	237.57
Trecho 6	6.73%	196.66
Trecho 7	4.99%	155.76
Trecho 8	6.59%	143.49
Trecho 9	6.86%	87.28
Trecho 10	4.80%	88.24
Trecho 11	2.91%	104.54
Trecho 12	2.01%	88.16
Trecho 13	0.93%	104.42
Trecho 14	2.41%	165.66
Trecho 15	5.33%	63.74
Trecho 16	5.20%	108.00

Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

4.2.5 Largura da rota acesso sul

A rota do Acesso Sul apresenta trechos com muitas variedades de largura de 12m a 25m de largura com uma largura média 16m. No caso o modelo 777G, apresenta uma largura de 7m. Devido a essa situação, quando um dos caminhões se encontram o caminhão vazio deve parar para permitir a passagem do caminhão cheio, resultando perda de produtividade. Na tabela 7 tem um resumo das larguras médias de cada trecho da Rota Acesso Sul. A figura 25 representa as larguras da rota.

Tabela 7 - Largura média por trecho da rota Acesso Sul

Trecho	Largura média (m)
1	15
2	16
3	16
4	16
5	16
6	22
7	22
8	17
9	17
10	15
11	15
12	21
13	19
14	19
15	22

Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Figura 24 - Representação das larguras da rota do Acesso Sul por faixa de cores.

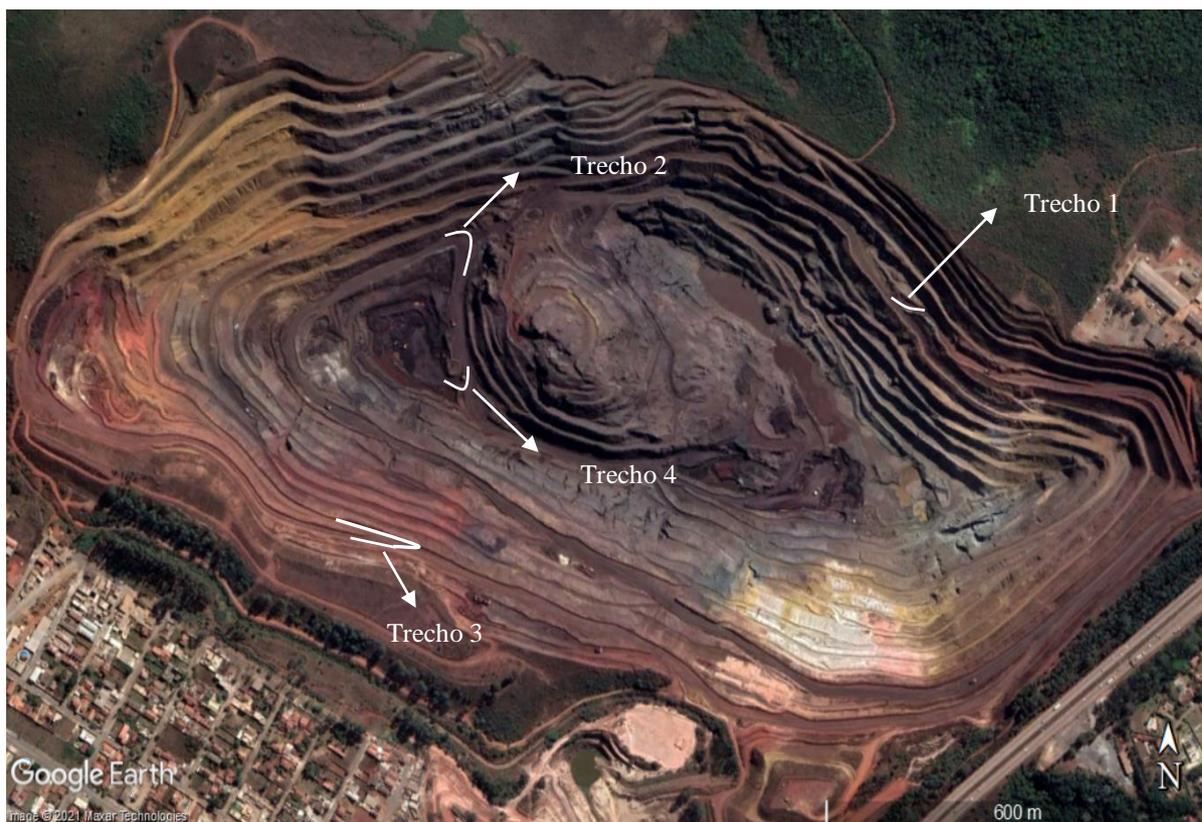


Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

4.2.6 Raios de curvatura da rota sul

A mina apresenta dois raios de curvatura críticos representados na figura 26 como trechos 2 e 4 com valores de 23,78m e 25m de raio, respectivamente, devido à erros geométricos.

Figura 25 - Identificação de raios de curvatura críticos da rota Copasa, Acesso Sul e Mirante.

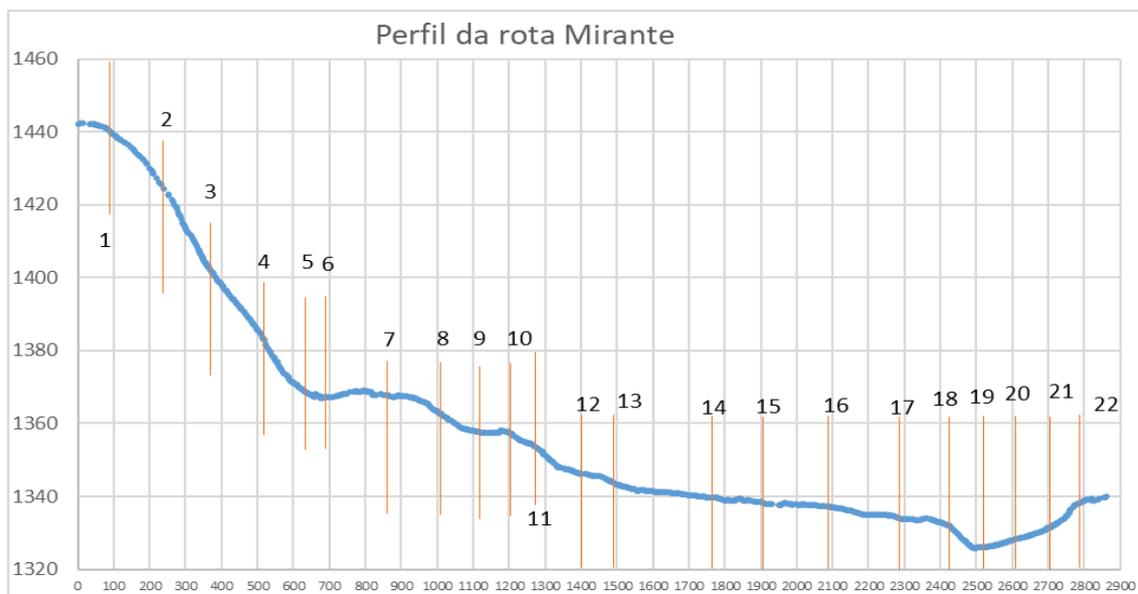


Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Rota 3: Mirante

A rota Mirante como descrito anteriormente foi dividida em 22 trechos. A partir desses dados foi possível a elaboração do gráfico da figura 27. A rota mirante apresenta uma grande variabilidade de grades (tabela 8), principalmente nos trechos 2, 3 e 4, onde a variação é maior se comparado com os demais trechos. A inclinação da via está em torno de 4.91%. Sendo que 81% do trajeto é feito com o caminhão descendo cheio.

Figura 26 - Divisão por trechos da rota Mirante



Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Tabela 8 - Relação entre a inclinação e os trechos da rota 3 – Mirante

	Grade	DMT (m)
Trecho 1	-4.07%	103.38
Trecho 2	-11.94%	142.99
Trecho 3	-17.32%	140.65
Trecho 4	-14.83%	145.57
Trecho 5	-7.26%	108.25
Trecho 6	1.91%	58.25
Trecho 7	-0.44%	170.95
Trecho 8	-5.68%	149.40
Trecho 9	-1.41%	102.86
Trecho 10	-3.50%	88.25
Trecho 11	-8.12%	79.26
Trecho 12	-2.29%	115.96
Trecho 13	-3.90%	96.60
Trecho 14	-0.93%	273.44
Trecho 15	-0.78%	129.68
Trecho 16	-1.11%	195.12
Trecho 17	-1.03%	192.45
Trecho 18	-5.78%	134.37
Trecho 19	1.56%	92.68
Trecho 20	2.90%	92.16
Trecho 21	7.54%	92.42
Trecho 22	3.02%	91.90

Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

4.2.7 Largura da rota do Mirante

A rota do Mirante apresenta uma largura média de 18m. A NR-22 sugere que a largura da estrada para pista simples seja de no mínimo, 2 vezes a largura do maior

equipamento de transporte. No caso o modelo 777G, apresenta uma largura de 7m. Portanto, a largura mínima da pista deveria ser de 14 m. Devido a essa situação, quando um dos caminhões se encontram, o caminhão vazio deve parar para permitir a passagem do caminhão cheio. A tabela 9 representa a largura média por trecho.

Tabela 9 - Largura média por trecho da rota Mirante

Trecho	Largura média (m)
1	21
2	16
3	16
4	16
5	16
6	22
7	22
8	17
9	17
10	15
11	15
12	21
13	18
14	18
15	18
16	18
17	18
18	16
19	16
20	16
21	16
22	19

Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Na figura 28 está representado em escalas de cores as larguras do trecho Mirante.

Figura 27 - Representação das larguras da rota da rota Mirante por faixa de cores.

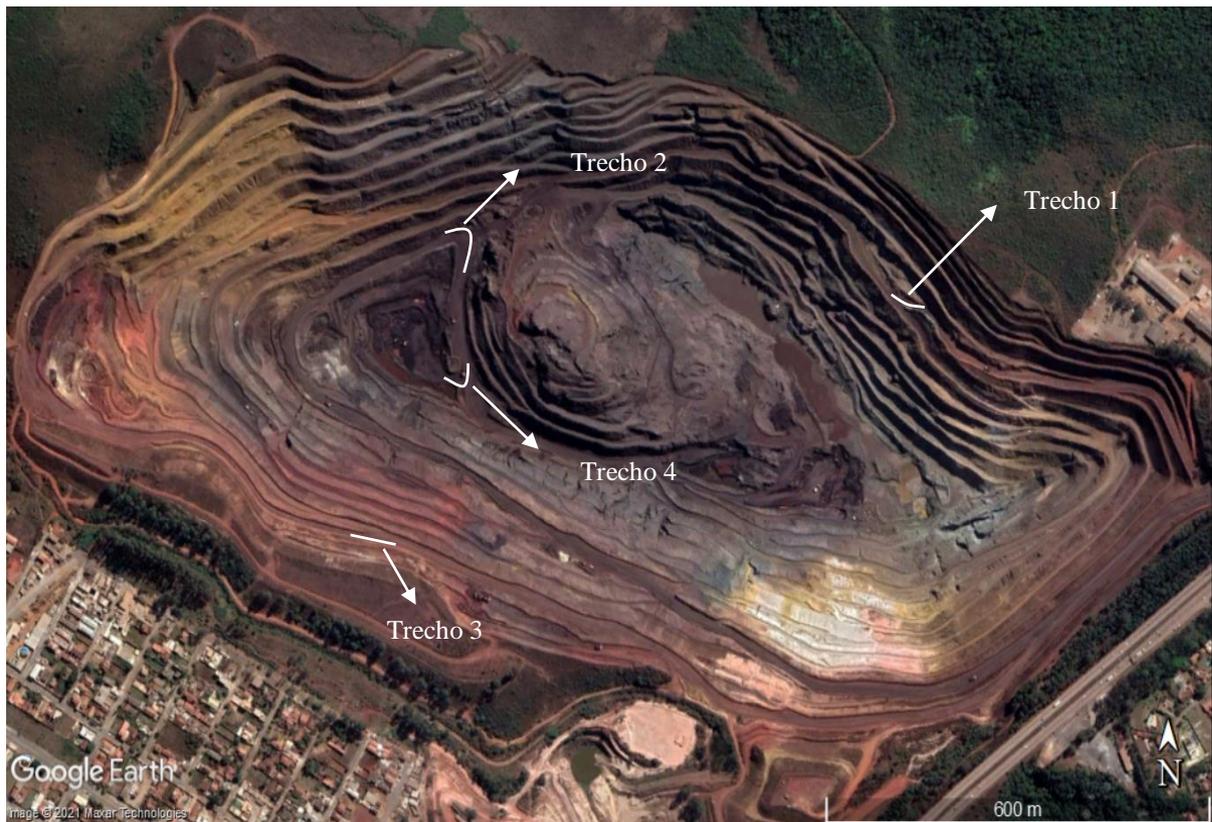


Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

4.2.8 Raios de curvatura da rota do Mirante

A mina apresenta apenas um raio de curvatura crítico representados na figura 29 como trecho 3 em torno 9,5 m sendo de raio de curvatura consideravelmente pequeno o que dificulta a manobra do caminhão e ocasionado redução de velocidade.

Figura 28 - Identificação de raios de curvatura críticos da rota Copasa, Acesso Sul e Mirante.



Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

4.2.9 Parâmetros e custos operacionais de transporte na Mina de Capão Xavier

- Tempos fixos

Como tempos fixos tem-se o tempo de manobra, tempo de basculamento e tempo de ciclo de carregamento, que sofrem pequenas variações em torno de uma média constante.

- Velocidades médias e produtividade

As velocidades dos caminhões e a produtividade é influenciada pela distância média de transporte e pela sazonalidade climática. Nos tópicos seguintes estão detalhadas as informações referentes a velocidade dos caminhões cheios, vazio, global para os dois modelos de caminhões utilizados (775 e 777). A tabela 10 é importante para o cálculo do material transportando em função do tipo de minério e da densidade. Para os minérios friáveis é considerado um empolamento de 30% e para o restante é

considerado um empolamento de 50% de acordo com o setor de Geologia da Mina de Capão Xavier, através de testes em laboratório. Dentre os tipos de minério com mais movimentação na mina destaca-se a hematita friável seguido pelo itabirito goetítico.

Tabela 10 - Principais litologias e suas respectivas densidades na Mina de Capão Xavier

Litologia	Densidade (in situ)	Densidade Empolada
Hematita Compacta	3.83	1.92
Hematita Friável	3.39	2.38
Hematita Goetítica	3.31	2.32
Hematita Manganésifera	3.36	2.35
Itabirito Compacto	3.06	1.53
Itabirito Dolomítico	3.00	1.50
Itabirito Friável	2.74	1.92
Itabirito Friável Rico	3.11	2.18
Itabirito Goetítico	2.97	2.08
Itabirito Manganésífero	2.91	2.04
Dolomítico	2.55	1.27

Fonte: Dados do autor.

- Carga Média

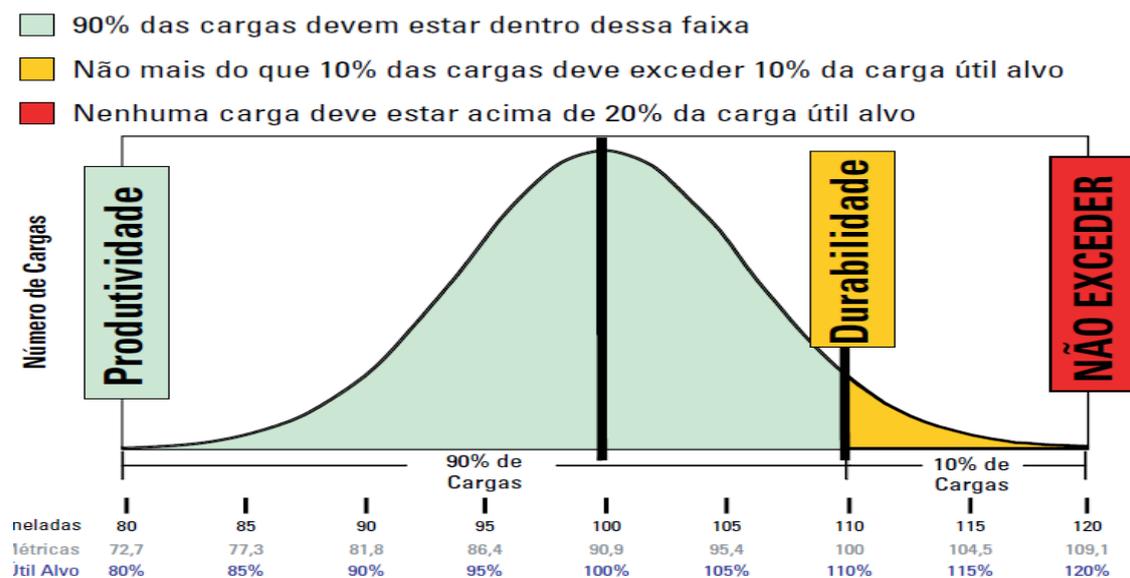
A carga média corresponde à quantidade de massa, em toneladas, de material transportado pelo caminhão em um ciclo. Depende de fatores como volume da caçamba do caminhão, sua capacidade de carga e características do material e da densidade empolada.

Ribeiro (2017) cita em sua pesquisa a política de gestão de carregamentos da fabricante Caterpillar, denominada 10/10/20, que em linhas gerais estabelece critérios de avaliação dos carregamentos com a finalidade de maximizar a produtividade com excelente vida útil dos componentes e disponibilidade do caminhão, conforme especificado abaixo e ilustrado nas Figuras 30 e 31.

- A média da distribuição dos carregamentos não deve exceder a carga nominal dos equipamentos.

- Não mais que 10% dos carregamentos devem exceder em 10% da capacidade nominal dos equipamentos.
- Nenhum carregamento deve exceder em 20% a capacidade nominal dos equipamentos.

Figura 29 - Critério de carregamento 10/10/20 para o caminhão 775G da Caterpillar.



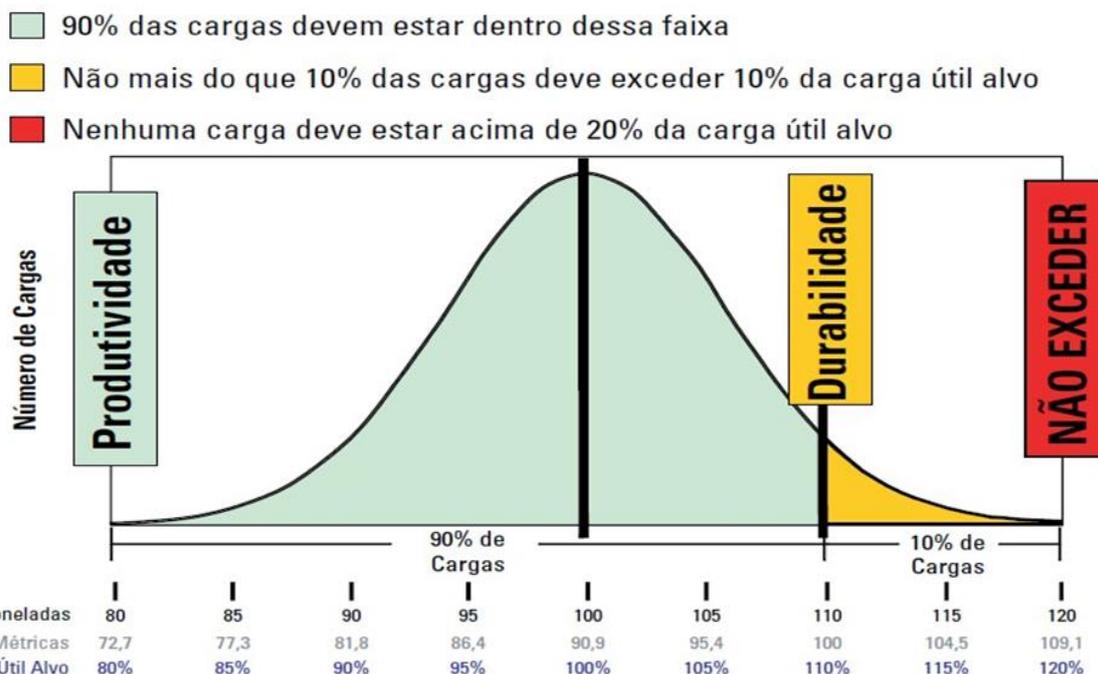
Fonte: Caterpillar (2012).

Os caminhões 775G e 777G apresentam cargas nominais equivalentes à, 63,5 t e 90.9 t, respectivamente (toneladas métricas).

Desta forma, de acordo com a política de cargas da Caterpillar:

- A média da distribuição dos carregamentos não deve exceder a carga nominal dos equipamentos.
- 10% dos carregamentos não devem exceder a carga equivalente à 69.9 e 100 t para os caminhões 775G e 777G, respectivamente.
- Nenhum carregamento deve exceder a carga equivalente à 76.2 t e 109.1 t para os caminhões 775G e 777G, respectivamente.

Figura 30 - Critério de carregamento 10/10/20 para o caminhão 777G da Caterpillar.



Fonte: Caterpillar (2012).

4.3 Proposta de melhoria da produtividade de transporte pela influência dos parâmetros geométricos da via

De acordo com o sequenciamento de lavra e a identificação de interferências operacionais (Limites de restrição de cavidades naturais, limitação quanto à execução de desmonte com explosivo etc.), foi definido um cronograma para realizar as atividades, conforme as tabelas abaixo.

4.3.1 Avaliação dos raios de curvatura e proposta de melhoria

Figura 31 - Raios de curvatura inadequados



Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

Tabela 11 - Proposta de adequação de raio de curvatura

TRECHO	REGIÃO	INICIATIVA	Mes de Execução - Plano Trimestral
1	Acesso Copasa	Pendente desmonte com plasma	2º trimestre - Maio
2	Acesso Copasa	Pendente desmonte com plasma	1º trimestre - Abril
3	Rampa Sul/Fundo de Cava	Pendente Projeto (não esta no plano anual) - Depende de seuenciamento de lavra	2º trimestre - Maio
4	Acesso Mirante	Projeto realizado pelo planejamento. Depende de sequenciamento de lavra para execução	1º trimestre - Abril
5	Acesso Fundo de Cava	Pendente lavra dolomítico para regularização. Depende de sequenciamento	2º trimestre - Maio

Fonte: Instituto Tecnológico Vale.

4.3.2 Análise da largura das vias e propostas de melhoria

Figura 32 - Larguras inadequadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

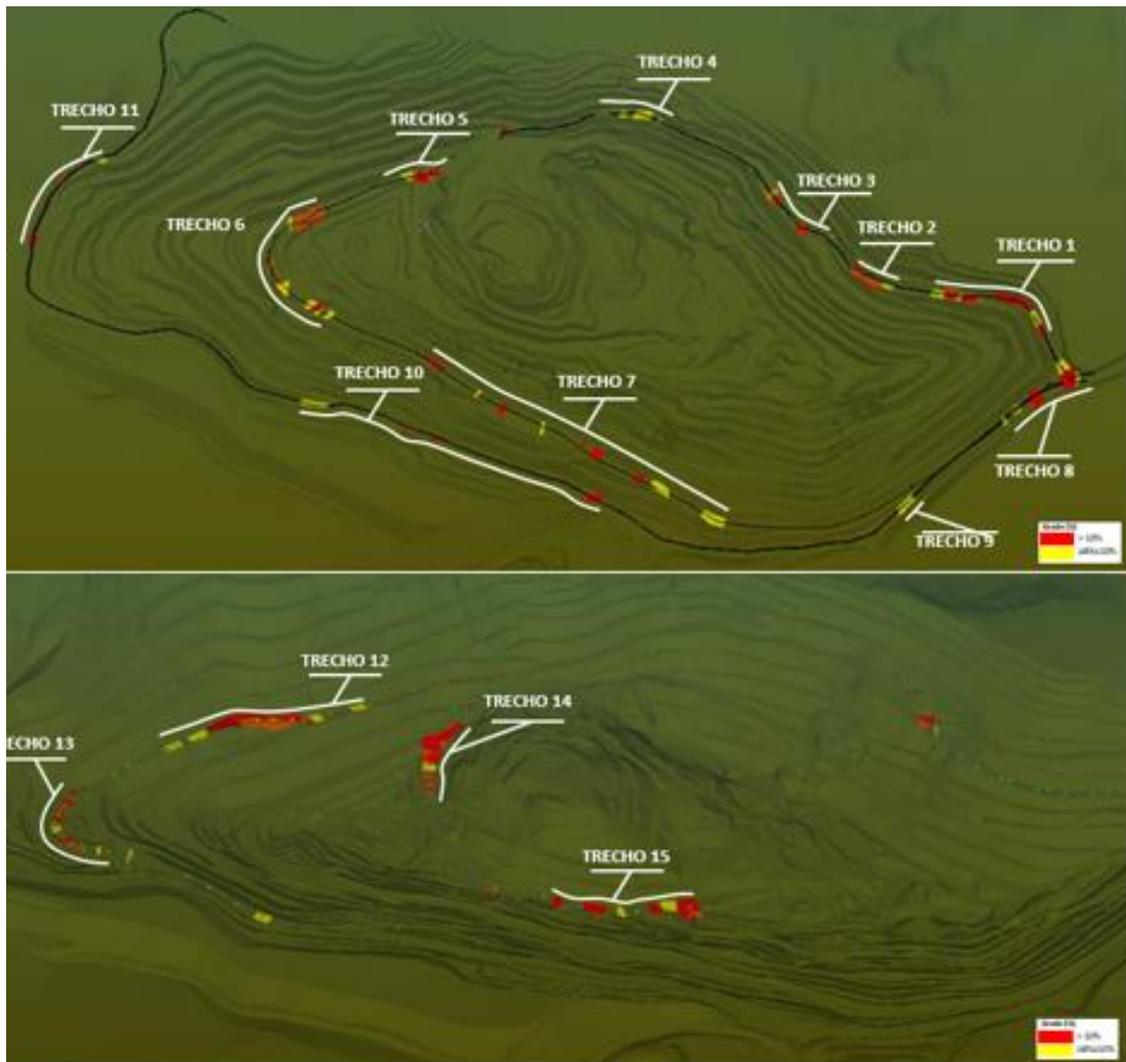
Tabela 12 - Proposta de adequação de largura

TRECHO	REGIÃO	DESCRIÇÃO	Situação do Trecho	Limitação	INICIATIVAS
1	Acesso Principal	Trecho principal CPX, passando pelo viaduto da COPASA até o viaduto da BR 040.	Limitação em função de licenciamento ambiental.	Licenciamento Ambiental	Levar proposta para licenciar o alargamento do trecho ao estratégico.
2	Dump Sul/SBR	Britador - SBR	Oportunidade a longo prazo, limitação em função de aterro em cima de sump da Cava da Mutuca.	Limitação Geotécnica	Estudar aterro para alargamento de trecho (Necessário validação da Geotecnia).
3	Dump Sul/SBR	Trevo Linha Azul	Adequação operacional avaliada e aprovada, aguardando disponibilidade de máquina de infra.	Avaliação Geotecnia	Consultar Geotecnia sobre status da avaliação
4	Dump Sul/SBR	Entrada ROM D	Aguardando avaliação de projeto de estoque (pilha de homogeneização) pela equipe de geotecnia	Avaliação Geotecnia	Consultar Geotecnia sobre status da avaliação
5	Dump Sul/SBR	Dump Sul	Aguardando realocação de rede	Avaliação Infraestrutura e Elétrica	Projetar alargamento de pista.
6	Acesso Principal	Pare e Siga 1 até Pare e Siga 2	Limitação em função de conflito das vias com Viaduto da 040 e rotatória de Macacos.	Conflito Externo	Verificar melhoria em campo.
7.1	Acesso Copasa	Entrada COPASA + 50m.	Adequação de acordo com o sequenciamento da Lavra da Copasa.	Sequenciamento de Lavra	Avaliar em campo oportunidade de melhoria da largura do acesso e grade da pista.
7.2	Acesso Copasa	Trecho 7.1 + 350m.	Adequação de acordo com o sequenciamento da Lavra da Copasa.	Fora do Plano de Lavra/ 2021	Avaliação de Ganho Operacional
7.3	Acesso Copasa	Trecho 7.2 + 460m.	Adequação de acordo com o sequenciamento do Pit Final.	Fora do Plano de Lavra/ 2021	Avaliação de Ganho Operacional
7.4	Acesso Copasa	Trecho 7.3 + 350m.	Adequação parcial do trecho com a utilização do plasma para ganho em largura. Depende de sequenciamento, sem geometria para 2021	Fora do Plano de Lavra/ 2021	Avaliação de Ganho Operacional
7.5	Acesso Copasa	Trecho 7.4 + 160m.	Adequação já iniciada com o plasma.	Sequenciamento de Lavra	Desmontar Repés.
8	Rampa Sul	Ligação Rampa Sul e Rampa Norte	Adequação dependente da liberação de cavidades para realização de recocorrência e ajuste geométrico.	Fora do Plano de Lavra/ 2021	Avaliação de Ganho Operacional
9	Rampa Sul	Cotovelo Rampa Sul	Aguardando avaliação da geotecnia (surgência de água) para adequação de acordo com sequenciamento e ganho com adequação de drenagem.	Avaliação Geotecnia	Consultar Geotecnia sobre status da avaliação. Avaliar em campo melhoria operacional

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Influência do grade e propostas de melhoria

Figura 33 - Trechos com grade inadequado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os custos para melhorar os trechos de grade são elevados, pois além dos custos diretos de infraestrutura de mina, ocorre a perda de produtividade, enquanto os trechos estão sendo corrigidos pela operação.

Tabela 13 - Proposta de adequação dos trechos com grades inadequados

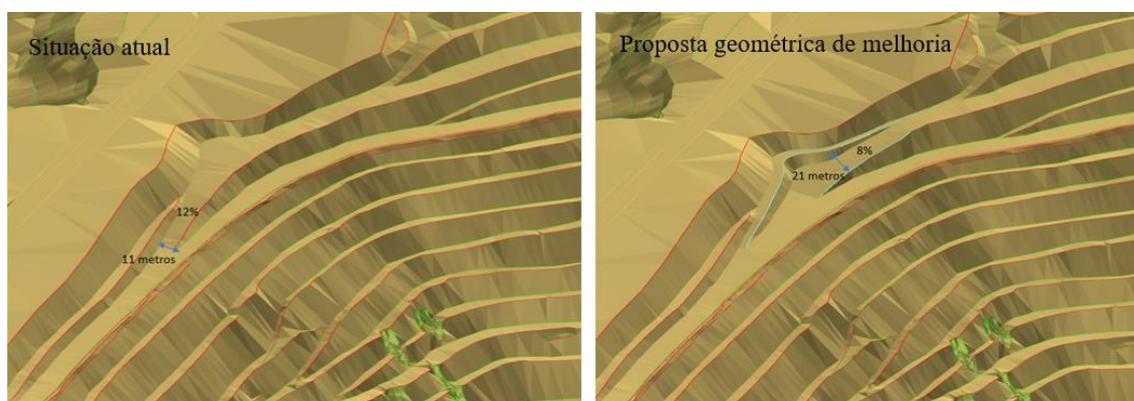
TRECHO	REGIÃO	INICIATIVA	Mes de Execução - Plano Trimestral
1	Acesso Copasa	Projeto realizado. Em andamento no plano de lavra, dependendo de sequenciamento	1º trimestre - Março
2	Acesso Copasa	Necessidade de realização de projeto - Não depende de lavra, já em pit final	1º trimestre - Abril
3	Acesso Copasa	Adequação parcial do trecho com a utilização do plasma para ganho em largura.	1º trimestre - Março
4	Acesso Copasa	Necessidade de realização de projeto - Depende de Sequenciamento (plano de infra)	1º trimestre - Abril
5	Ligação Rampa Copasa/Sul	Pendente Projeto (não esta no plano anual) - Depende de seuenciamento de lavra	2º trimestre - Maio
6	Cotovelo Rampa Sul	Projeto já realizado pelo planejamento. Pendente atuação devido interdição de acesso para correção e material para forração	1º trimestre - Março
7	Rampa Sul	Projeto já realizado pelo planejamento. Pendente atuação devido interdição de acesso para correção e material para forração	1º trimestre - Março
8	Acesso Principal	Pendente programação para marcação de topografia e atuação de infraestrutura	1º trimestre - Fevereiro
9	Bifurcação do Mirante/Rampa Sul	Projeto já realizado pelo planejamento. Em andamento, conforme plano mensal de janeiro	1º trimestre - Fevereiro
10	Acesso Mirante/Estéril	Previsão de adequação conforme sequenciamento de 1º trimestre de 2021	1º trimestre - Abril
11	Acesso Mirante	Pendente realização de projeto para execução	2º trimestre - Abril
12	Acesso Lavra GO	Previsão de adequação dependente de sequenciamento da area das cavidades.	2º trimestre - Junho
13	Acesso Estéril	Sem lavra na região (não consta no plano anual) - Pendente entrar na programação de infra	1º trimestre - Abril
14	Dolimitico	Pendente Projeto - Depende de seuenciamento de lavra e avanço de correção em largura	2º trimestre - Maio
15	Acesso Fundo de Cava	Sem lavra na região (não consta no plano anual) - Pendente entrar na programação de infra	1º trimestre - Abril

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Ganho na produtividade do transporte

Tendo como base a fórmula para cálculo do modelo de produtividade de transporte, foi possível mensurar o ganho relacionado à proposta de adequação da via conforme a figura 35.

Figura 34 – Trecho proposto para adequação geométrica (rampa do mirante)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4.1 Produtividade de transporte na situação da operação atual para CAT 777G

$$\theta: 6,5^\circ$$

$$f_\theta = \text{Seno}(6,5)^\circ = 0,11$$

$$\text{pp: } 8,0\text{cm}$$

$$f_r = 2\% + 0,6\%(8,0) = 6,8\%$$

$$v_i: 14,13 \text{ km/h}$$

$$P: 765\text{kw}$$

$$E_f: 0,85$$

$$f_r: 0,06$$

$$f_\theta : 0,11 \text{ (kg/t)}$$

$$v_i = \frac{366,97 * 765 * 0,85}{158(0,11 + 0,06)} = 14,13\text{km/h}$$

$$P_t = 115,56\text{ton/h};$$

$$F_{cc}: 91\text{t};$$

$$T_f: 5,55 \text{ min};$$

$$d_c: 20\text{m};$$

$$V_R: 18\text{km/h};$$

$$v_i: 15 \text{ km/h};$$

$$v_i: 14,13\text{km/h}$$

$$d_i: 3700\text{m};$$

$$v_v: 20\text{km/h}$$

$$P_t = \frac{60 * 91}{5,55 + 0,06 \left(\sum \frac{20}{13} + \sum \frac{3700}{15} \right) + \frac{3700}{16,67} \left(\frac{1}{14,13} + \frac{1}{20} \right)} = 115,56\text{ton/h}$$

4.3.4.2 Produtividade de transporte com a proposta geométrica de melhoria para CAT 777

$$P_t = 156,15 \text{ ton/h;}$$

$$F_{cc}: 91 \text{ t;}$$

$$T_f: 5,20 \text{ min;}$$

$$d_c: 36 \text{ m;}$$

$$V_R: 20 \text{ km/h;}$$

$$v_i: 20 \text{ km/h;}$$

$$v_i: 14,13 \text{ km/h}$$

$$d_i: 3700 \text{ m;}$$

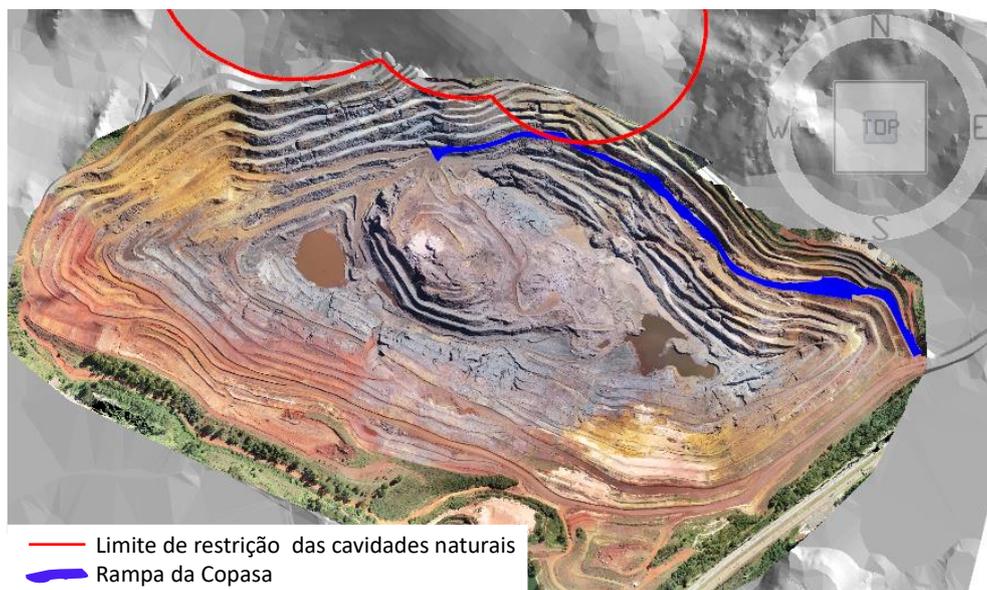
$$v_v: 20 \text{ km/h}$$

$$P_t = \frac{60 * 91}{5,20 + 0,06 \left(\sum \frac{36}{20} + \sum \frac{3700}{20} \right) + \frac{3700}{16,67} \left(\frac{1}{14,13} + \frac{1}{20} \right)} = 126,35 \text{ ton/h}$$

5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

As adequações das principais vias de Capão Xavier não foram concluídas em sua totalidade, muito em função do atraso na liberação da redução do limite de restrição das cavidades naturais existentes na porção Norte da cava, principalmente no que se refere à largura da via, o que impactou diretamente no ganho de produtividade no acesso denominado “Rampa da Copasa”, conforme figura 36.

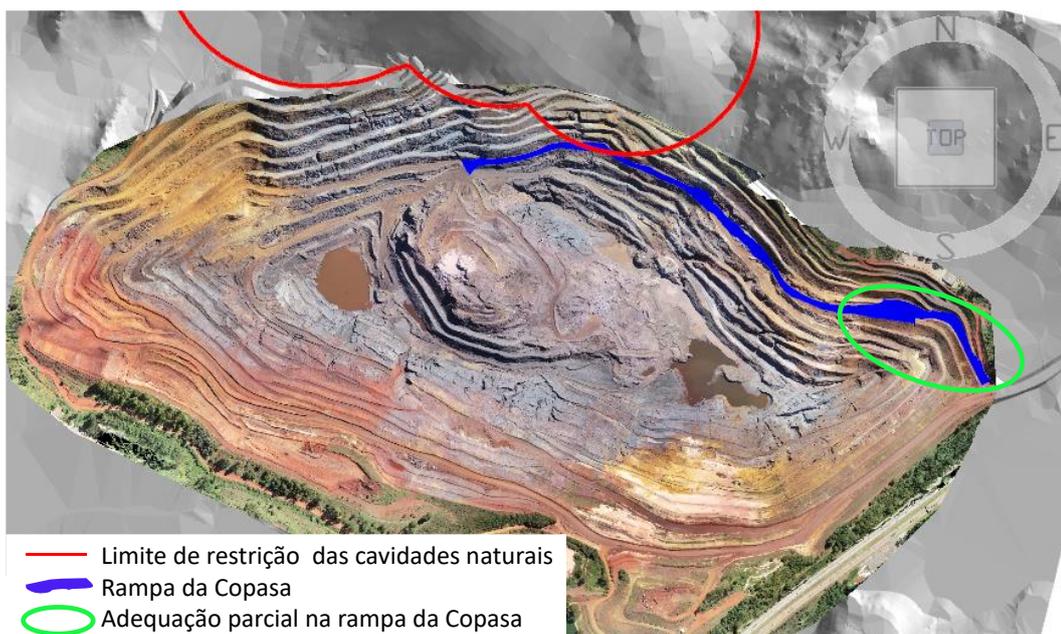
Figura 35 - Limite de restrição das cavidades naturais x Rampa da Copasa



Fonte: Elaborado pelo autor

Porém, foi possível adequar parcialmente a largura conforme poligonal na cor verde - figura 37.

Figura 36 - Adequação parcial na largura na rampa da Copasa



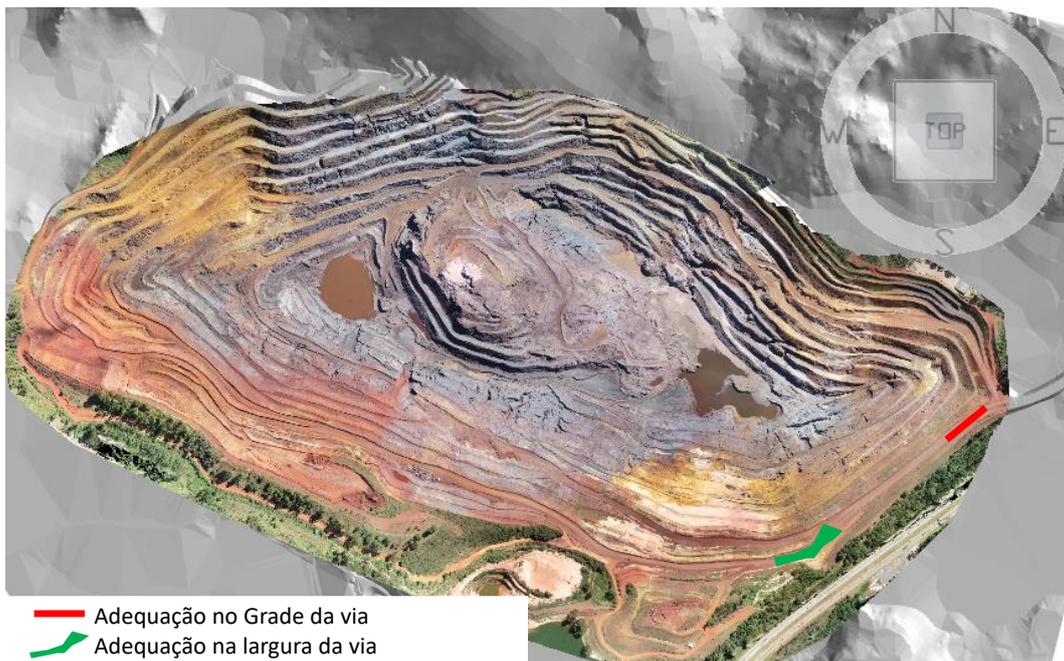
Fonte: Elaborado pelo autor.

O trecho mencionado permanece em operação com pista simples, estando sinalizada atendendo normas de segurança, através da comunicação via rádio no caso de algum equipamento de transporte / infraestrutura estiver acessando os pontos de estreitamento.

Os demais trechos, denominados rampa Sul e rampa do Mirante, estão sendo adequados conforme o sequenciamento da lavra, obedecendo as premissas operacionais de produção e parâmetros geotécnicos.

Os trechos em questão, também estão sendo adequados parcialmente conforme citado anteriormente na rampa da Copasa, o que resultou no atingimento das adequações pontuais referentes à largura da via e inclinação das rampas. Figura 38.

Figura 37 - Adequação parcial na largura e no grade na rampa do Mirante



Fonte: Elaborado pelo autor.

O trecho identificado na cor verde foi adequado conforme proposta geométrica, atingindo parâmetros ideais para ganho na produtividade.

6 CONCLUSÕES

Foi observado um ganho expressivo no quesito segurança, e 9,3% de produtividade na proposta de adequação do trecho da via denominada rampa do mirante, através da adequação de largura e inclinação.

Mediante estudos realizados acerca das dificuldades operacionais existentes na cava de Capão Xavier, relacionados ao perfil de transporte e análise dos indicadores de performance, foi elaborado um cronograma no qual foram mapeados todos os trechos das vias principais que não estavam adequados conforme as Normas Técnicas condizentes com os tipos de equipamento usados atualmente na cava.

Com base nas principais premissas de produção, atrelado ao sequenciamento e obedecendo as restrições de licenciamento, foram estabelecidas geometrias para adequações parciais buscando atingir resultados de melhoria a curto prazo, inserindo as atividades de adequação nos sequenciamentos mensais contemplados nas ações de infraestrutura e operação de mina.

Os trechos nos quais não foram possíveis realizar as devidas adequações, sejam elas relacionadas à largura da via, inclinação de rampa e raio de curvatura, estão sendo sinalizadas nos sequenciamentos futuros, ou seja, contemplados na geometria referente ao próximo ano (2022), concomitante às liberações no que tange ao licenciamento e atendimento aos parâmetros geotécnicos.

Sugestões para trabalhos futuros:

1 O trabalho demonstra que com o progresso da lavra, os problemas com acessos aumentaram significativamente, com perdas médias de produtividade acima de 100 Ton/hora. Os problemas de acessos precisam ser mais bem planejados, desde o sequenciamento plurianual até o anual.

2 Se o planejamento dos acessos foi contemplado nos planos de lavra de médio e longo prazo, a execução foi deficiente, ocasionando uma continuidade das deficiências de grade, largura e raio de curvatura.

3 Para minimizar a continuidade dos acessos deficientes, cada mina precisa readequar, principalmente as que estão em operação e no sequenciamento de médio prazo, buscar planejar com muito cuidado os acessos.

4 Nas avaliações de lavra, contemplar acessos planejados e realizados, focado em geometria dos mesmos.

5 As perdas de produtividades também precisam fazer parte das avaliações de lavra.

6 Não há necessidades de recursos adicionais de TI e topografia para melhorias.

7 Existem softwares robustos também para dimensionar acessos.

8 Qualquer operação de mina nova, tem que contemplar acessos principais dentro das normas dos equipamentos de lavra.

9 A segurança operacional é necessária desde a abertura da mina e deve ser planejada desde o longo prazo, até as operações correntes, adequações e melhorias de rotina.

REFERÊNCIAS

- ANDRIETTA, A. J. **Pneus e meio ambiente:** um grande problema requer uma grande solução, 2002.
- BAESSO, F. L. R; GONÇALVES, D. D. P. **Estradas Rurais:** Técnicas Adequadas de Manutenção. Florianópolis: DER, 236p, 2003.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica:** Formação Básica de Engenheiros. Rio de Janeiro. Petrobras: ABEDA. 2008.
- CATERPILLAR®. **Performance handbook.** Caterpillar Inc. Edition 40. Peoria, Illinois, U.S.A: 2010. 1442 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - **Manual de Pavimentação.** 3ª. Ed., Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes, Publicação IPR 719, 274p., 2006.
- FERREIRA, R. M. **Dimensionamento de um Pavimento Experimental para o Tráfego de Caminhões Fora de Estrada em Planta de Mina.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG, 277 f., 2007.
- INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE – ITV. **Análise estatística da base de dados operacional.** Ouro Preto. 2017. 112 p.
- KAUFMAN, W.W.; AULT, J. C. **Design of Surface Mining Haulage Roads – Manual.** U.S. *Department of Interior, Bureau of Mines, Information Circular 8758.* 1977.
- JIMENO, C. L et al. **Manual de transporte con volquetes y diseño de pistas mineras.** Grupo de Proyectos de Ingeniería - E.T.S.I. Minas y Energía- Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2014.
- MASETTI, L.; Cláudio, M.; Costa, W. **Manual de estradas de mina da Vale** (Interno), 2011.
- MEDINA, J. de.; MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos pavimentos.** Ed. UFRJ, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 574p, 2005.
- NAVARRO TORRES, V. F. **Desenvolvimento de modelos matemáticos e estatístico para a otimização do transporte em lavra.** Otimização de vias. Instituto Tecnológico Vale. Ouro Preto. Brasil. 2017. 47p.

NAVARRO TORRES, V. F. **Resultados da validação do modelo para otimização da produtividade e custos no Complexo Itabira.** Otimização de vias. Instituto Tecnológico Vale. Ouro Preto. Brasil. 2017. 47p.

RIBEIRO, F. F. **Análise estatística dos dados históricos dos indicadores operacionais de mina das diretorias de ferrosos.** Trabalho de conclusão de curso (Especialização Lato Sensu em Lavra de Minas a Céu Aberto) – Instituto Tecnológico Vale, ITV, Ouro Preto, 2017.

TANNANT, D. D.; REGENSBURG, B. **Guidelines For Mine Haul Road Design.** 2001.

VISSER, A. T. **Mine Road Design, Construction and Maintenance Management.** Belo Horizonte, 2008.