

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE MINAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

JOÃO CARLOS VIEIRA

DETERMINAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE ELEMENTOS DE RELEVÂNCIA  
EM INFRAESTRUTURA DE MINA

PARAUPEBAS

2013

JOÃO CARLOS VIEIRA

DETERMINAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE ELEMENTOS DE RELEVÂNCIA  
EM INFRAESTRUTURA DE MINA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito  
parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas

Orientador: Eng. de Minas, MSc., PhD. Rodrigo de Lemos Peroni

PARAUAPEBAS

2013

JOÃO CARLOS VIEIRA

DETERMINAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE ELEMENTOS DE RELEVÂNCIA  
EM INFRAESTRUTURA DE MINA

Este trabalho sobre a determinação e quantificação de elementos de relevância em infraestrutura de mina foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Orientador: Eng. de Minas, MSc., PhD. Rodrigo de Lemos Peroni

---

Coordenador: Telmo Roberto Strohaecker

Aprovado em: 27/08/2014

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Dr. Germán Marcelo Martins Vinueza Freire – Instituto Tecnológico Vale

---

Dr. Leonardo Queiroz – Diretoria de Ferrosos Norte - Vale

## AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma especial à minha família que soube me apoiar e entender todos os momentos, minhas decisões e prioridades. A todos da Vale que tornaram este trabalho possível, de forma direta ou indireta, me apoiando, ou fornecendo informações fundamentais na elaboração do material. A todos que trabalharam para que os resultados fossem atingidos de forma clara e simples. Todas estas pessoas tornaram minha tarefa fácil e gratificante.

À minha mãe, Ernestina Caetana de Deus (in memorian) e ao meu pai, João de Deus Vieira (in memorian) que deram início à minha vida, aos exemplos de luta, dedicação, disciplina e persistência que sempre nortearam minha vida.

À minha esposa, Yone Barcelos Carneiro Vieira por aceitar minhas escolhas e me apoiar nas horas difíceis, quando não tinha a quem recorrer em busca de apoio e ajuda.

À minha filha, Laura Barcelos Carneiro Vieira e ao meu filho, Matheus Barcelos Carneiro Vieira por sempre entenderem o quanto esta conquista é importante para mim e para nossa família. Nos momentos de pesquisa e trabalho procuraram me ajudar, sugerindo novos caminhos e/ou formas.

Ao Professor Rodrigo Peroni que não mediu esforços, acreditou em meu trabalho, me direcionou e orientou várias vezes quando eu estava com dúvidas para que a dissertação tomasse o melhor curso.

Ao Engenheiro Gajego Menezes e Geizon Sá (Sotreq) por terem me apoiado nas pesquisas de campo, na montagem, organização dos relatórios de campo e apresentação dos resultados.

Ao Planejamento de Mina; Camilo Cavalcanti, André Anderson, Amarildo Souza, Márcio Estevam e Edcarlos Silva que não mediram esforços para apresentarem os relatórios dos trabalhos executados.

Aos Engenheiros Juary Silveira e Diego Menezes que não mediram esforços na preparação dos bancos de dados e elaboração de relatórios dos resultados comparativos.

Ao Engenheiro e Geotécnico Leonardo Leopoldo Gomes, e Geóloga e Geotécnica Aristotelina Silva que não mediram esforços para me orientarem e fornecer material bibliográfico.

Aos Gerentes da GEMIN, Engenheiros Jaymilson Magalhães e Roberto Francisco por terem colaborado com a execução de todas as atividades de forma ágil e precisa.

Ao Gerente Geral Fernando Carneiro que tornou toda esta logística possível e apoiou todos os estudos realizados durante estes dois anos de pesquisa, execução, acompanhamento e comparação.

Ao Diretor Antônio Padovezi, aos Gerentes Gerais Herbert Viana, João Carlos Henriques e Leonardo Queiroz por me ofertarem esta possibilidade de fazer este mestrado em Carajás.

Não posso deixar de agradecer aos operadores, técnicos, analistas, supervisores e gerentes que colaboraram diretamente ou indiretamente para a execução de todas as atividades abordadas nesta dissertação e que as tornaram viáveis, reais e claros estudos de caso de sucesso.

## RESUMO

Este estudo apresenta, de forma sistemática, a importância da infraestrutura de mina a céu aberto, determinando as atividades principais dessa fase e os impactos e benefícios causados por alterações na forma de execução, medidos através de indicadores de produtividade e resultados financeiros. Algumas atividades principais como a reconfiguração das faces dos bancos de lavra pela aplicação comparativa de desempenho de trator de esteira e retroescavadeira; o estabelecimento de padrão para o dimensionamento das camadas estruturais e funcionais das estradas de mina; a mensuração dos benefícios da construção e manutenção das estradas, no desempenho dos caminhões e dos tratores de esteira, através de estudos de caso e demonstrar que a aplicação de técnicas adequadas modificam o resultado operacional. A metodologia utilizada aborda a relevância da infraestrutura e da frota de equipamentos auxiliares dentro do ciclo operacional, propondo uma aplicação correta e sistemática, baseada na demanda e nas atividades auxiliares que proporcionam condições operacionais para as atividades "que geram valor", suportando o cumprimento das metas estabelecidas no plano de produção. Os principais resultados obtidos vão desde a melhoria da segurança operacional, da imagem da empresa, do resultado financeiro, ao melhor aproveitamento dos recursos minerais, impactando diretamente a sustentabilidade do negócio. Através dos casos abordados neste trabalho, conclui-se que o desempenho da mineração a céu aberto é fortemente dependente do foco dado à infraestrutura de mina, ou seja: da qualidade das pistas, adequação das praças de carregamento, condição operacional de pilhas de estéril ou minério, drenagem superficial, dos métodos de trabalho e da disciplina operacional, gerando ganhos e/ou perdas que vão de unidades de porcentagem a várias vezes a capacidade do processo abordado.

**Palavras-chave: Infraestrutura, mineração a céu aberto, equipamentos**

## ABSTRACT

This study presents, in a systematic way, the importance of the infrastructure in the open pit mining, determining the main activities of this operation and the impacts and benefits from changes implemented measured by operating productivity indicators and financial results. Some major activities such as the reconfiguration of the slope faces by the comparative performance of bulldozer and backhoe; the establishment of standards for the design of structural and functional layers of the mine haul roads; measure the benefits of the construction and maintenance of roads, the performance of trucks and bulldozers, through case studies show that the application of appropriate techniques can modify the operating result. The methodology addresses the importance of infrastructure and auxiliary equipment fleet in the operating cycle, proposing a correct and systematic application, based on demand and auxiliary activities that provide operating conditions for activities "that create value", supporting the achievement of the goals established in the production plan. The main results ranging from improved operational safety, company image, financial results, the best use of mineral resources, directly impacts on the business sustainability. Through the cases discussed in this work, it is concluded that the performance of the open pit mining is strongly dependent on the focus given to the mine infrastructure which means, the quality of the tracks, adequacy of the loading spots, operating condition of waste dumps or ore bins, surface drainage, working methods and operational discipline, generating gains and/or losses ranging from small amounts to several times the capacity of the covered process.

**Keywords: Infrastructure, open pit mining, equipment**

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	2
1.2 METAS	7
1.3 OBJETIVOS	7
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	8
<b>2. ESTADO DA ARTE</b>	<b>9</b>
2.1 ESTUDO DE ESTABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DOS TALUDES	9
2.1.1 <i>Fundamentos básicos</i>	9
2.1.2 <i>Projeto do ângulo de talude</i>	9
2.1.2.1 Segurança e fatores sociais	11
2.1.2.2 Fatores econômicos	12
2.1.2.3 Fatores Ambientais e Regulatórios	14
2.1.3 <i>Terminologia de Taludes</i>	15
2.1.3.1 Configurações do ângulo de talude	15
2.1.3.2 Instabilidade	16
2.1.3.3 Queda de blocos	18
2.1.4 <i>Formulação do talude</i>	19
2.1.4.1 Introdução	19
2.1.4.2 Considerações finais	21
2.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DAS CAMADAS DE ESTRADAS DE MINERAÇÃO	21
2.2.1 <i>Construção, recuperação e manutenção de praças e pistas de rolamento</i>	21
2.2.2 <i>Metodologia</i>	23
2.2.3 <i>Tipos de projetos de estradas de mina</i>	24
2.2.3.1 Projeto Geométrico	24
2.2.3.2 Projeto Estrutural	24
2.2.3.3 Projeto funcional	28
2.2.3.4 Projeto de drenagem	28
2.2.4 <i>Manutenção, readequação e segurança</i>	29
2.2.4.1 Manutenção	29
2.2.4.2 Readequação	30
2.2.4.3 Segurança	31
2.2.5 <i>Métodos de dimensionamento de pavimentos</i>	32
2.2.5.1 Métodos empíricos	32
2.2.5.2 Carga de roda e o CBR	33
2.2.6 <i>Materiais usados na construção de camadas de base e sub-base</i>	37
2.2.7 <i>Materiais usados na construção de camadas de revestimento</i>	39
2.2.8 <i>Vida útil de estradas</i>	41
2.2.9 <i>Dimensionamento de estradas de mina no contexto de normas</i>	43
2.2.9.1 Normas brasileiras	43
2.2.9.2 Normas norte-americanas	43
2.3 TRATORES DE ESTEIRA	44
2.3.1 <i>Definições básicas e contextualização de estudos voltados à aplicação dos Tratores de Esteira</i>	44
2.3.2 <i>Generalidades sobre as unidades de tração (tratores)</i>	45
2.3.2.1 Campo de aplicação	46
2.3.2.2 Novas tendências no projeto dos tratores de esteiras:	47
2.3.3 <i>Tratores disponíveis no mercado brasileiro</i>	51
2.3.4 <i>Descrição dos implementos dos tratores de esteira e aplicações</i>	52
2.3.5 <i>Estimativa de produção dos tratores de esteiras</i>	58
2.3.5.1 Tempos e movimentos elementares: Ciclo e tempo de ciclo	61
2.3.5.2 Tempos de ciclo mínimo e efetivo	62
2.3.5.3 Produção de um equipamento	63
2.3.5.4 Rendimento da operação ou fator de eficiência	64
2.3.5.5 Fórmula básica da produção de um equipamento	65
2.3.5.6 Aumento de produtividade	65
2.3.5.7 Estimativa de produção dos tratores de esteiras	70
<b>3. METODOLOGIA APLICADA - ESTUDO DE CASOS – MINAS DE FERRO DE CARAJÁS</b>	<b>80</b>
3.1 ESTABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DOS TALUDES	80
3.1.1 <i>Modelo geomecânico</i>	81

3.1.1.1	Classificação do maciço e setorização	81
3.1.2	<i>Análises de estabilidade</i>	82
3.1.2.1	Talude de Bancada	82
3.1.2.2	Talude Geral e critérios de aceitação (fator de segurança - FS)	84
3.1.3	<i>Resumo – Dimensionamento</i>	85
3.1.4	<b>MONITORAMENTO DOS TALUDES DAS MINAS</b>	87
3.1.5	<i>Considerações finais</i>	89
3.1.6	<i>Reconfiguração de talude – estudo de caso 1</i>	89
3.1.6.1	Reconfiguração do Talude da Mina de N4E	90
3.1.6.2	Reconfiguração de talude da Mina de N4WM – Cava II	94
3.1.7	<i>Utilização de trator de esteira e/ou retro-escavadeira na reconfiguração de talude – estudo de caso 2</i>	98
3.2	<b>DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DAS CAMADAS DO PAVIMENTO DAS ESTRADAS NAS MINAS DE FERRO DE CARAJÁS</b>	105
3.2.1	<i>Introdução</i>	105
3.2.1.1	Análise e caracterização das propriedades estruturais dos materiais disponíveis	106
3.2.1.2	Previsão de desempenho estrutural - Modelos analíticos	109
3.2.1.3	Recomendação de projeto estrutural e geométrico formal- Padronização	111
3.2.1.4	Implementação e monitoramento do procedimento	112
3.2.2	<i>Projeto das estradas</i>	116
3.2.2.1	Geométrico	116
3.2.2.2	Estrutural	117
3.2.2.3	Drenagem	117
3.2.3	<b>CONSTRUÇÃO</b>	117
3.2.3.1	Resistência ao rolamento	118
3.2.3.2	Obstáculos	119
3.2.3.3	Combate a particulados em suspensão	120
3.2.4	<b>MANUTENÇÃO E READEQUAÇÃO</b>	121
3.2.5	<i>Dimensionamento estrutural das camadas do pavimento das estradas – Estudo de caso 3</i>	124
3.2.5.1	Influência da qualidade das estradas no custo da produção – Resistência ao rolamento	129
3.3	<b>APLICAÇÃO DOS TRATORES DE ESTEIRA NO EMPILHAMENTO DO ESTÉRIL</b>	131
3.3.1	<i>Definição da altura do banco da pilha de estéril</i>	132
3.3.1.1	Localização	132
3.3.1.2	Objetivo	132
3.3.1.3	Avaliação	132
3.3.1.4	Resultados e Recomendações	133
3.3.2	<i>Ponto de descarga do caminhão na pilha de estéril</i>	134
3.3.2.1	Objetivo	134
3.3.2.2	Avaliação	135
3.3.2.3	Resultados e Recomendações	135
3.3.3	<i>Aplicação dos tratores de esteira – estudo de caso 4</i>	136
3.3.3.1	Introdução	136
3.3.3.2	Influência da Distância na Produtividade do Trator	139
3.4	<b>PONTO ÓTIMO DE DESCARGA NAS PILHAS DE ESTÉRIL – CASO 5</b>	142
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>146</b>
4.1	<b>ESTABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DOS TALUDES – RECONFIGURAÇÃO DO TALUDE – ESTUDO DE CASO 1</b>	<b>146</b>
4.1.1	<i>Econômico e recuperação de minério</i>	146
4.1.2	<i>Segurança, social, ambiental e regulatório.</i>	146
4.2	<b>UTILIZAÇÃO DE TRATOR DE ESTEIRA E/OU RETROESCAVADEIRA NA RECONFIGURAÇÃO DE TALUDE – ESTUDO DE CASO 2</b>	<b>148</b>
4.2.1	<i>Dimensionamento das camadas do pavimento das estradas – estudo de caso 3</i>	149
4.2.2	<i>Influência da Qualidade das estradas no custo da produção</i>	151
4.3	<b>APLICAÇÃO DOS TRATORES DE ESTEIRA NO EMPILHAMENTO DO ESTÉRIL – ESTUDO DE CASO 4</b>	<b>153</b>
4.4	<b>PONTO ÓTIMO DE DESCARGA NAS PILHAS DE ESTÉRIL – CASO 5</b>	<b>157</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>160</b>
5.1	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>160</b>
5.2	<b>RECOMENDAÇÕES</b>	<b>163</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>		<b>165</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis de desenvolvimento do projeto.....	10
Figura 2 - Impacto potencial do talude íngreme.....	12
Figura 3 - Talude de Bancada e Talude Geral – Geometria.....	13
Figura 4 - Terminologia aplicada a taludes em português. ....	16
Figura 5 - Queda de blocos.....	18
Figura 6 - Fases e elementos do Projeto de Talude. ....	20
Figura 7 - Curva de custos teórica de estradas de transporte em mineração.....	22
Figura 8 - Impactos das estradas na mineração. ....	22
Figura 9 - Imagem da área operacional com a locação de acessos e principais destinos. ....	23
Figura 10 - Etapas do dimensionamento das camadas das camadas do pavimento das estradas mineiras.....	25
Figura 11 - Projeto de estrada de mina.....	26
Figura 12 - Fator de repetição de carga.....	34
Figura 13 - Ábaco para dimensionamento de pavimento usando valores de CBR e carga de roda. ....	36
Figura 14 - Valores ótimos de produto de contração e coeficiente de graduação para materiais de revestimento. ....	40
Figura 15 - Classes de estradas de mina em relação ao planejamento de lavra. ....	42
Figura 16 - Comparação roda motriz elevada e roda motriz no chassis – conforto do operador. ....	47
Figura 17 - Comparação roda motriz elevada e roda motriz no chassis – cargas fletoras. ....	48
Figura 18 - Roda motriz elevada – projeto modular.....	49
Figura 19 - Roda motriz elevada – Suspensão flutuante e independente dos roletes. ....	49
Figura 20 - Tratores de pequeno porte disponíveis no mercado.....	51
Figura 21 - Tratores de médio porte disponíveis no mercado. ....	52
Figura 22 - Tratores de grande porte disponíveis no mercado. ....	52
Figura 23 - Lâmina e seus componentes. ....	53
Figura 24 - Lâmina com acionamento hidráulico.....	54
Figura 25 - Dimensões gerais do trator e da lâmina. ....	54
Figura 26 - Lâmina inclinável (tombamento).....	55
Figura 27 - Principais lâminas utilizadas no mercado. ....	57
Figura 28 - Trator com Lâmina e escarificador.....	58
Figura 29 - Variáveis de entrada - DOZSIM Software.....	59
Figura 30 - Variáveis de saída - DOZSIM Software. ....	60
Figura 31 - Variáveis de entrada (FPC). ....	60
Figura 32 - Variáveis de saída (FPC).....	61
Figura 33 - Elementos que influem na capacidade da lâmina. ....	72
Figura 34 - Ângulo de talude natural para solos argilosos e arenosos, respectivamente.....	72
Figura 35 - Estimativa da capacidade da lâmina. ....	73
Figura 36 - Produção (m <sup>3</sup> /h) x distância (m).....	78
Figura 37 - Minas de Ferro no complexo Carajás. ....	81
Figura 38 - Setorização da Cava – Mina N4E.....	82
Figura 39 - Georadar e seus componentes principais. ....	88
Figura 40 - Geometria da cava de N4E em 29/03/2011.....	91
Figura 41 - Geometria da cava de N4E em 30/11/2012.....	91
Figura 42 - Perfis da cava de N4E antes e depois da reconfiguração do talude.....	94
Figura 43 - Mina N4WN – Cava II em 30/12/2010.....	95

Figura 44 - Mina N4WN – Cava II – Abaixo do Mirante em 30/12/2010.....	95
Figura 45 - Mina N4WN – Cava II em 30/11/2012.....	96
Figura 46 - Mina N4WN – Cava II – Abaixo do Mirante em 30/11/2012.....	96
Figura 47 - Perfis da Mina N4WN antes e depois da reconfiguração do talude. ....	97
Figura 48 - Acidente material com queda de bloco dia 19/03/2012.....	97
Figura 49 - Face do banco de lavra reconfigurada.....	98
Figura 50 - Método Atual – Trator trabalhando na reconfiguração da talude.....	98
Figura 51 - Trator “riscando talude”.....	99
Figura 52 - Método atual – Retroescavadeira “penteando”. ....	100
Figura 53 - Vista em planta dos elementos da reconfiguração de talude com retro-escavadeira. .....	101
Figura 54 - Vista em perfil da sequência das atividade de reconfiguração com retro- escavadeira. ....	101
Figura 55 - Operação ideal de reconfiguração de talude.....	102
Figura 56 - Produção do trator na reconfiguração de talude. ....	103
Figura 57 - Produção da retro-escavadeira na reconfiguração de talude. ....	103
Figura 58 - Evolução do custo e da produção (trator x retroescavadeira). ....	105
Figura 59 - Aplicação funcional da canga laterítica no revestimento de pistas. ....	107
Figura 60 - Comportamento funcional da máfica decomposta no revestimento de pistas. ...	108
Figura 61 - Comportamento estrutural da Máfica Sã.....	109
Figura 62 - Padrão de pavimento das estradas. ....	112
Figura 63 - Placa de sinalização - padrão de construção das estradas. ....	112
Figura 64 - Número de alarmes por mina e comparativo entre semanas. ....	113
Figura 65 - Criticidade por trecho de estrada. ....	113
Figura 66 - Quantidade de alarmes diários.....	114
Figura 67 - Fotos do local e a análise comparativa entre semanas, aspectos críticos.....	114
Figura 68 - Análise comparativa entre semanas. ....	115
Figura 69 - Elementos das estradas das minas de Carajás. ....	115
Figura 70 - Abaulamento transversal das estradas.....	116
Figura 71 - Sinalização vertical das estradas.....	117
Figura 72 - Resistência ao rolamento.....	118
Figura 73 - Blocos e obstáculos nas estradas. ....	120
Figura 74 - Aspersão móvel e aspersão fixa.....	121
Figura 75 - Readequação e manutenção de estrada. ....	121
Figura 76 - Perfil longitudinal das camadas estruturais das estradas conforme substrato – Fonte (Vieira e Peroni 2012).....	122
Figura 77 - Disponibilidade física (%) da frota de caminhões - 2008 a maio/2012.....	125
Figura 78 - Problemas na camada de revestimento do pavimento das estradas.....	128
Figura 79 - Impactos dos acessos na vida útil dos pneus. ....	129
Figura 80 - Impacto da qualidade das estradas na produção e custo. ....	130
Figura 81 - Impactos da resistência ao rolamento. ....	130
Figura 82 - Impacto da resistência total ao rolamento na produção e custo. ....	131
Figura 83 - Metodologia produtividade dos tratores de esteira D11 e D475 nas pilhas de estéril. ....	136
Figura 84 - Histórico das horas trabalhadas dos tratores de esteira D11 e D475.....	137
Figura 85 - Movimentação de estéril em milhões de toneladas. ....	137
Figura 86 - Comparativo da produtividade horária mensal dos tratores D11 e D475.....	138
Figura 87 - Produtividade sazonal dos tratores. ....	138
Figura 88 - Tela de Simulação do Software DOZSIM. ....	139
Figura 89 - Influência da distância na produtividade dos tratores CATD11. ....	140

Figura 90 - DMT x Custo x Produção horária dos tratores CAT D11.....	141
Figura 91 - Pontos ótimos de descarga e não ótimos da aba sul da Mina de N4E. ....	144
Figura 92 - Pontos ótimos de descarga e os não ótimos da Mina de N4WN. ....	144
Figura 93 - Produtividade vs custo vs Participação trator/retro-escavadeira. ....	148
Figura 94 - Relação Custo x produção x resistência ao rolamento.....	152
Figura 95 - Produtividade dos tratores nas pilhas de estéril nos anos de 2010 a 2012.....	153
Figura 96 - Horas trabalhadas dos tratores esteira na pilhas e em outras atividades. ....	154
Figura 97 - Comparativo produtividade x custo trator lâmina SU e U. ....	155
Figura 98 - Relação custo vs Produtividade vs Tempo de ciclo (DMT) – Mina N4WN.....	157
Figura 99 - Relação custo vs Produtividade vs Tempo de ciclo (DMT) – Mina N4E.....	157
Figura 100 - Ponto ótimo de descarga na pilha ótima de estéril.....	158
Figura 101 - Níveis operacionais. ....	160
Figura 102 - Efetividade vs preço vs tempo.....	161
Figura 103 - Por que padronizar? .....	162

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de trabalho vs. condição de eficiência mecânica. _____	68
Tabela 4 - Incremento de produção - Manual de Produção Caterpillar. _____	77
Tabela 5 - Rampa VS velocidade _____	78
Tabela 6 - Fatores de correção. _____	79
Tabela 7 - Resultados das Análises de Bancada. _____	83
Tabela 8 - 2a Etapa – alternativa II : resultados das análises. _____	85
Tabela 9 - Alternativa II – arrimo – geometria dos taludes. _____	86
Tabela 10 - Produção do trator de esteira e retro-escavadeira. _____	104
Tabela 11 - Dimensionamento do pavimento para caminhão CAT 797 F. _____	110
Tabela 12 - Dimensionamento do pavimento para caminhão CAT 793 C e D. _____	111
Tabela 13 - Resultados e comparações entre períodos avaliados. _____	126
Tabela 14 - Equalização dos resultados de 2012 para base 2011. _____	126
Tabela 15 - Cálculo do Ganho potencial. _____	126
Tabela 16 - Cálculo do Ganho real. _____	127
Tabela 17 - Cálculo dos Caminhões equivalentes. _____	127
Tabela 18 - Pluviometria dos últimos 13 anos de Carajás. _____	128
Tabela 19 - Resistência total VS tempo de ciclo VS produtividade VS custo R\$/t. _____	130
Tabela 20 - Parâmetros Geotécnicos (material inconsolidado). _____	133
Tabela 21 - Resumo dos resultados _____	133
Tabela 22 - Parâmetros Geotécnicos (material inconsolidado). _____	135
Tabela 23 - Resumo dos resultados. _____	136
Tabela 24 - Fatores de correção. _____	139
Tabela 25 - Produtividades simuladas conforme a DMT. _____	140
Tabela 26 - Cálculos de ciclo VS custos VS produtividade. _____	144
Tabela 27 - Margem operacional líquida – Ebitda. _____	146
Tabela 28 - Comparação custo Trator VS Retro-escavadeira. _____	149
Tabela 29 - Produtividade vs custo vs DMT para tratores. _____	154
Tabela 30 - Produtividade VS custo VS DMT VS lâmina do trator. _____	156
Tabela 31 - Ganhos com a utilização da lâmina “U”. _____	156
Tabela 32 - Ganho total com a aplicação da lâmina “U”. _____	157
Tabela 33 - Resumo dos ganhos financeiros capturados. _____	162

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De uma forma geral o dimensionamento de equipamentos de mineração é normalmente realizado focando-se nos equipamentos que produzem valor para a empresa. Entenda-se por valor aquele material que representa a atividade fim de uma empresa de mineração que via de regra é o minério e por consequência, em situações onde este material não esteja exposto na superfície, a remoção do material de cobertura, classificado como estéril, se faz necessária. No entanto, a atividade suplementar chamada infraestrutura de mina, corresponde a um elemento chave, muitas vezes negligenciado ou simplesmente agrupado como serviços e equipamentos de apoio ou auxiliares.

Nessa dissertação será abordada a relevância da infraestrutura e da frota de equipamentos auxiliares, através de estudos de casos, onde será demonstrada a necessidade da mesma, propondo uma aplicação correta e sistemática, dependendo da demanda e das atividades auxiliares que proporcionam condições operacionais para as atividades "que geram valor", suportando o cumprimento das metas estabelecidas no plano de produção.

Os resultados dessa metodologia serão mensurados por aspectos quantitativos e qualitativos. Do ponto de vista quantitativo salientamos os custos operacionais, custos capitais e custos indiretos (liberação de frentes, manutenção do plano de lavra, custos de manutenção de pista, entre outros). Esses elementos serão indicadores para medir em valor econômico o impacto da aplicação correta e sistemática que a presença e controle dos itens operacionais representam dentro da cadeia produtiva na lavra. Nos aspectos qualitativos, e que muitas vezes podem ser um tanto subjetivos, mas salientam a importância de aspectos não mensuráveis. Por exemplo, como medir qual o benefício de se investir em reconfiguração de talude para zonas em operação que não serão objeto de lavra em um horizonte de tempo menor do que dois anos? A resposta para questões como estas, pode ser dada sobre a própria imagem que a empresa apresenta para os órgãos fiscalizadores, demonstrando a sua preocupação com questões de recuperação ambiental ou manutenção da segurança operacional do ponto de vista de estabilidade geomecânica do maciço. Estas diretrizes claras são decisivas quando solicitadas licenças de funcionamento ou ambientais. A metodologia será demonstrada por meio de estudos de casos, utilizando dados da maior mina de ferro do mundo, onde a complexidade e a necessidade de atividades coordenadas determinam o cumprimento das metas de produção.

Esse trabalho demonstra ainda que entre as atividades fundamentais de: planejamento de mina, que define a progressão de avanço de lavra em acordo com a visão estratégica da empresa; e a operação de lavra, que executa as definições do planejamento, existe a infraestrutura que dá as condições para que os planos sejam cumpridos na prática e que o desempenho da operação seja satisfatório, com condições operacionais adequadas para manutenção dos índices de desempenho.

Outros fatores determinantes na efetividade da infraestrutura dizem respeito à técnica aplicada na execução de cada tarefa e à manutenção/conservação da mesma após a conclusão, se não for adequada, com o passar do tempo haverá a degradação. Quando isto ocorre, a efetividade é seriamente afetada, ou a recuperação se torna cara e difícil.

O problema da seleção do equipamento de infraestrutura ideal, neste caso, tratores de esteira e/ou retroescavadeiras, para a realização de determinada tarefa, está na identificação e análise de todos os fatores que exercem influência no seu comportamento.

Segundo Ricardo e Catalani (2007), a experiência mostra que vários parâmetros precisam ser conhecidos ou determinados para permitir a escolha e dimensionamento da frota de máquinas mais indicada, o que resulta em certa complexidade na solução do problema. Há que considerar que em muitos casos pode haver mais de uma configuração de frota que satisfaça tecnicamente às condições vigentes, ficando a escolha ao arbítrio de critérios pessoais (subjetivos), mas fundamentalmente econômicos e que satisfaçam um cronograma de implementação e de demandas de produção.

Será muito útil, entretanto, para determinar-se a solução mais vantajosa, o conhecimento desses parâmetros e sua influência no desempenho dos equipamentos.

Os fatores que influem nessa escolha podem ser classificados em três grupos:

Fatores naturais – são aqueles que dependem das condições vigentes no local dos trabalhos, como topografia mais ou menos acidentada, natureza dos solos ou maciços existentes, presença de lençol freático, regime de chuvas, descontinuidades, etc..

Fatores de projeto – são representados pelo volume a ser movimentado, as distâncias de transporte, as declividades de rampas e as dimensões das plataformas de operação.

Fatores econômicos – podem ser resumidos no custo unitário do trabalho (custo por volume ou massa movimentada), que, em última análise, é o fator predominante e, frequentemente, decisivo na escolha a ser feita.

O custo unitário depende, por sua vez, do investimento total, representado pelo custo de aquisição das máquinas da frota e, também, da sua produtividade.

Segundo Rego Chaves, 1955, existem três princípios que regem a escolha econômica dos equipamentos de forma que, a natureza, as condições e o volume das obras a executar são os principais fatores a serem verificados na determinação do equipamento mais apropriado. Essa escolha deverá obedecer, sempre que possível e dentro dos meios disponíveis, aos seguintes princípios básicos:

- redução, tanto quanto possível, dos investimentos de capital;
- equilíbrio de trabalho entre as diversas unidades mecanizadas, a fim de que o rendimento, por máquina, seja o máximo;
- custos unitários de produção sempre menores do que aqueles que resultariam do emprego de outras máquinas ou de outros quaisquer métodos de trabalho.

Em síntese, os três princípios citados determinam o emprego do equipamento mais econômico e que conduz a menores custos e atenda tecnicamente ao projeto. É necessário frisar que, em certos casos, os fatores naturais ou de projeto podem eliminar, por peculiaridades próprias, as soluções mais econômicas que, nesta hipótese, deixariam de ser viáveis.

Nas minas de ferro de Carajás, as principais aplicações dos tratores de esteira, são:

- disposição de estéril em pilhas de estéril;
- execução de rampas;
- construção, manutenção e readequação das praças e pistas de rolamento;
- lavra de minério ou estéril.
- estabilização de faces de taludes de bancos em pilhas de estéril (retaludamento);
- estabilização de faces de taludes de bancos de lavra (retaludamento/reconfiguração de talude);
- drenagem superficial de banco de lavra, das pilhas de estéril e das pistas;
- disposição de minério em pilhas pulmões;
- rebaixamento de banco para redução do risco de deslizamento ou desabamento.

Das principais aplicações dos tratores de esteira, a disposição de estéril em pilhas, construção de rampas, a estabilização de taludes e pilhas e as obras de drenagem superficial de mina, estão entre as mais importantes, visto que estão todas ligadas diretamente à garantia operacional do empreendimento mineiro.

Algumas das técnicas de estabilização mais simples, como reconfiguração de taludes, rebatimento de faces de bancos, drenagem e proteção superficial e estruturas de contenção,

envolvendo muros de arrimo, são conhecidas desde a antiguidade. Com o desenvolvimento da Engenharia Geotécnica, novas técnicas de contenção, como tirantes protendidos, estacas-raiz, muros de concreto armado, terra armada e aterros reforçados surgiram. O principal aspecto de um projeto de estabilização moderno refere-se à escolha da solução mais adequada, dentro de uma relação de custo/benefício otimizada ou pelo menos razoável, considerando o caráter de permanência de uma determinada obra.

A adoção de um determinado tipo de obra de estabilização deve ser o resultado final do estudo de caracterização geológico-geotécnica do talude e da encosta. Esta deverá atuar diretamente nos agentes e causas da instabilização investigada, e as alternativas de projeto deverão sempre partir das soluções mais simples e baratas. Para o caso da mineração onde a dinâmica de movimentação de massa e alteração de configuração de cava é muito intensa, em geral as estabilizações são feitas de forma a reconformar os taludes de acordo com parâmetros geotécnicos que mantenham a estabilidade dentro de fatores de segurança adequados para taludes operacionais e finais.

Dentre as operações unitárias de lavra a céu aberto perfuração / desmonte / carregamento e transporte, esta última é responsável por grande parcela dos custos operacionais, representando até 50% do valor total do custo de lavra. Os maiores custos são devidos, basicamente, ao consumo de óleo diesel e desgaste/troca de pneus dos equipamentos que transportam minério e/ou estéril.

Estradas mineiras são normalmente projetadas por profissionais de planejamento de lavra e executadas por equipes de operação ou infraestrutura de mina. Ao operacionalizar uma cava final, o objetivo primordial do engenheiro é projetar acessos que considerem o máximo aproveitamento de minério associado à menor remoção de estéril, assim como as menores distâncias de transporte das frentes de lavra aos locais de destino. O estudo das estradas considera, basicamente, alguns parâmetros de projeto geométrico, tais como inclinação de rampa, largura e raio de curvatura, mas não é voltado aos parâmetros contemplados nos projetos estrutural, funcional e de drenagem. Essa situação conduz a um desempenho das estradas de mina questionável e representa, nos dias de hoje, certo descompasso em relação ao alto nível alcançado em termos das tecnologias de exploração, assim como quanto à evolução dos veículos de transporte (Oliveira Filho et al., 2010).

Nos campos da Engenharia de Minas voltados à interpretação e modelagem geológica, otimização e operacionalização de cava, assim como no beneficiamento mineral, há uma variedade de programas destinados ao tratamento de dados, operacionalizações e simulações. Um exemplo é apresentado na dissertação de Carmo (2001), na qual o autor salienta o uso e a

aplicabilidade de algoritmos de otimização de cavas finais de minas a céu aberto. Em contrapartida, é escasso o material voltado aos parâmetros de projeto, construção e manutenção de estradas de mina, não só em termos de programas computacionais específicos, mas também em relação à literatura técnica existente em língua portuguesa. O material disponível contém, basicamente, alguns parâmetros de projeto geométrico voltados à saúde e segurança ocupacional dos operadores dos equipamentos de mina. Dentre as 34 Normas Regulamentadoras existentes no Brasil, a NR-22 (Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração) aplica-se ao escopo deste trabalho.

Dentre os elementos de projeto de uma estrada mineira, aqueles relacionados ao projeto estrutural têm sido os menos desenvolvidos, como apresentado na dissertação de Masetti (2011), representando um marco de boas práticas na construção de acessos, talvez por exigirem formação e conhecimento pouco disponíveis no meio mineiro. O estudo teórico do projeto estrutural de dimensionamento de pavimentos é tratado na disciplina Mecânica dos Pavimentos, principalmente no curso de Engenharia Civil. Na Engenharia de Minas, a literatura específica voltada ao dimensionamento de estradas de mina é bastante escassa. Por tal razão, somada a outras de ordem principalmente econômica e de segurança ocupacional, a adaptação e aplicação de conceitos advindos da disciplina acima citada mostram-se particularmente úteis em projetos de estrada de mina.

É de extrema importância que os vários componentes de um projeto estrutural de estradas de mina sejam estudados e aplicados, desde a definição dos tipos de material a serem usados no dimensionamento das camadas, até a caracterização das propriedades físico-mecânicas dos mesmos. Tal estudo deve ser feito de forma a conduzir a um desempenho ótimo a custos minimizados. É altamente relevante, nesse contexto, o estabelecimento de parâmetros mais eficientes para a projeção estrutural de estradas de mina.

No caso específico da mina de ferro de Carajás estas atividades demandam a aplicação de muitos tipos de equipamentos e um enorme quadro de empregados, conseqüentemente grande capital aplicado em tratores, motoniveladoras, retro-escavadeiras de pequeno porte, além de sistemas de aspersão. Este fato, torna a aplicação, principalmente dos tratores de esteira, algo de suma importância na efetividade, produtividade e segurança das operações de lavra.

Como suporte geral a esta pesquisa, propõe-se utilizar o contexto da mina de ferro de Carajás, onde serão realizados testes, simulações e tomadas de ciclos para definir produtividade e aplicação dos diversos tipos e porte de equipamentos de infraestrutura, conforme atividade e especificidade. Também serão utilizadas informações históricas e

comparações entre períodos distintos. A sensibilização de todos os setores envolvidos nas demandas pelas aplicações dos tratores de esteira e/ou retroescavadeiras, tais como: planejamento de lavra, terraplanagem, carregamento, transporte, controle de produção, geotecnia e manutenção, criará sinergia e sincronia entre os processos, gerando ganhos de produtividade, redução de custos e sustentabilidade em todas as fases de lavra.

## 1.2 METAS

Identificar as principais atividades de infraestrutura de mina no contexto da operação de lavra e demonstrar a relevância da frota de equipamentos auxiliares (sejam tratores de esteiras, retroescavadeiras e/ou motoniveladoras).

Aplicar técnicas de projeto e construção de estradas para o dimensionamento estrutural das camadas do pavimento das estradas para as minas de minério de Ferro em Carajás-PA e estudar o impacto na produção dos equipamentos de transporte e dos tratores de esteira nas pilhas de estéril, demonstrando assim a interdependência de desempenho entre os equipamentos e a eficiência das operações unitárias.

## 1.3 OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho são:

- mensurar através de estudo de caso os impactos da reconfiguração das faces dos bancos de lavra e a aplicação comparativa de desempenho de trator de esteira e retroescavadeira nesta atividade;
- aplicar metodologia e estabelecer padrão para o dimensionamento das camadas estruturais e funcionais das estradas de mina;
- mensurar os benefícios da construção e manutenção das estradas, no desempenho dos caminhões e dos tratores de esteira, através de estudos de caso;
- demonstrar que a aplicação de técnicas adequadas modificam o resultado operacional.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, incluindo este capítulo preliminar, no qual é feita a introdução por meio de considerações iniciais, meta, apresentação dos objetivos do trabalho e organização da dissertação.

O capítulo 2 apresenta a pesquisa bibliográfica do estado da arte da tecnologia aplicada no dimensionamento e estabilização de taludes, revisa os principais conceitos do dimensionamento das camadas do pavimento das estradas na mineração e descreve os tratores de esteira atuais de forma genérica, tais como: as partes constituintes, implementos, tempos e movimentos, previsão de produtividade nas aplicações características desse equipamento, considerando que esse é o equipamento chave avaliado na atividade de infraestrutura de mina, abordada nesse estudo.

O capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada em cada estudo de caso apresentado nesta dissertação, ou seja: estabilização de talude (reconfiguração de talude), comparação da aplicação de trator de esteira e/ou retroescavadeira nesta atividade e o dimensionamento estrutural das camadas do pavimento das estradas nas minas de ferro de Carajás.

No capítulo 4 estão apresentadas as análises dos resultados dos estudos de casos abordados nas minas de ferro de Carajás.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões, recomendações para desenvolvimentos futuros e referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento desse estudo.

## **2. ESTADO DA ARTE**

Esse capítulo apresenta a revisão bibliográfica nos temas que fundamentam essa dissertação. Considerando que a abordagem do estudo navega na área de infraestrutura de mina e que as sugestões propostas envolvem aspectos relacionados com estabilização de taludes, projetos de estradas de mineração e construção de pilhas de estéril esses três temas serão abordados para delinear o estado da arte sobre cada um desses elementos.

### **2.1 ESTUDO DE ESTABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DOS TALUDES**

#### **2.1.1 Fundamentos básicos**

Nas cavas a céu aberto existem vários níveis de planejamento e operação, o projeto do ângulo de talude da cava é um dos maiores desafios. A definição adequada desse parâmetro requer conhecimento especializado da geologia, normalmente complexa nas proximidades dos corpos mineralizados, onde a estrutura rochosa e/ou grau de alteração do maciço, as propriedades dos materiais, a concepção de aspectos práticos do projeto na operacionalização da lavra, entre outros, podem ser fatores importantes.

Serão apresentados os fundamentos associados ao alcance do equilíbrio em termos de expectativas dos vários agentes envolvidos na operação da mina, que geralmente incluem os proprietários, gerentes, empregados, comunidades e os órgãos reguladores da atividade. Apresentar os elementos detalhados do projeto de talude da cava, como a terminologia comumente usada, a abordagem típica e níveis de esforços para suportar a confiabilidade requerida nos diferentes estágios do desenvolvimento do plano de lavra a céu aberto. A maioria destes elementos são comuns às operações mineiras, mesmo que o material possa ser diferente ou tamanho e profundidade da cava variáveis.

#### **2.1.2 Projeto do ângulo de talude**

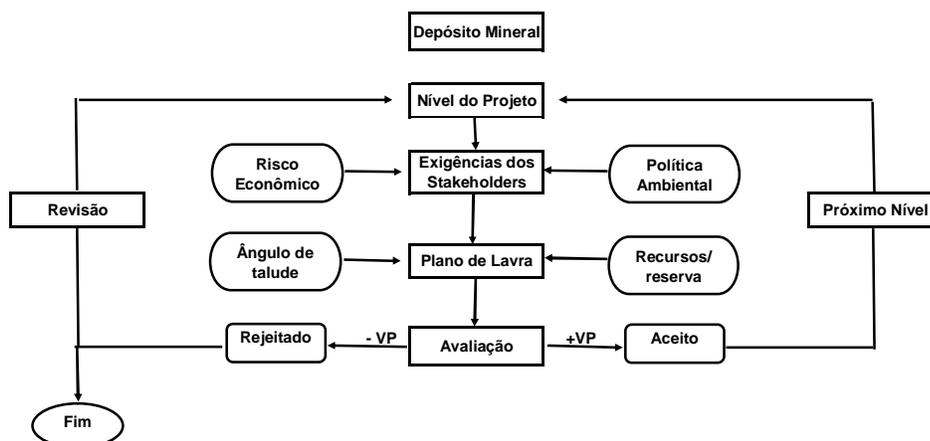
O objetivo do plano de lavra a céu aberto é prover a configuração ótima da cava no contexto de segurança, recuperação do minério e retorno financeiro. A expectativa dos investidores e a operacionalização do ângulo de talude são equalizados de forma a garantir a estabilidade durante o ciclo de vida da cava até o fechamento da mina. Qualquer instabilidade

deverá ser gerenciada. Isto se aplica a toda escala da mina, desde bancadas individuais até o ângulo geral de talude.

Ao mesmo tempo que a recuperação do minério deve ser maximizada e o estéril minimizado durante a vida da mina, também as exigências econômicas dos proprietários devem ser atendidas. O resultado compromissado é o balanço entre os planos formulados que não apresentem risco à viabilidade operacional, ambiental e à saúde dos colaboradores envolvidos, estabelecendo ângulos de taludes os mais íngremes possíveis ao longo do projeto.

O fluxograma da Figura 1, apresenta o ângulo de talude como um parâmetro essencial na configuração da cava, em cada estágio da avaliação do depósito mineral, do projeto conceitual inicial ao cálculo do valor do trabalho, na investigação da descoberta no curto e longo prazo para operacionalizar a cava. A cada nível do projeto todos os processos chaves são tratados, inclusive os requisitos de todos os agentes envolvidos.

Figura 1 - Níveis de desenvolvimento do projeto.



Fonte: Modificado de Read e Stacey, 2009.

As cavas de mineração são construídas com níveis menores de estabilidade, em relação à obras civis, reconhecendo a abrangência de operações com menor duração, envolvendo maior nível de monitoramento em termos de precisão e frequência, geralmente disponível na mina. Embora esta abordagem seja reconhecida pelas duas indústrias e pelas autoridades reguladoras, onde a tolerância ao risco pode variar entre empresas, entre estados e/ou países.

Instabilidade descontrolada é causada pela falha no projeto/execução do ângulo de talude e pode ter muitos desdobramentos, incluindo:

#### Segurança e fatores sociais

- perda de vida ou lesões;
- perda da renda do trabalhador;
- perda da confiança do trabalhador;
- perda da credibilidade da empresa com a comunidade e com os acionistas.

#### Fatores econômicos:

- transtorno nas operações;
- perda de minério/produção;
- perda de equipamentos;
- aumento de estéril;
- custos com limpeza;
- perda de mercado.

#### Fatores ambientais e regulatórios:

- impactos ambientais;
- aumento na regulação,
- considerações de fechamento.

#### ***2.1.2.1 Segurança e fatores sociais***

Condições operacionais seguras que protejam contra risco de morte ou lesões os trabalhadores em minas a céu aberto são requisitos de ordem moral, ética e legal. Esta perspectiva está se tornando cada vez mais comum para o gerenciamento, incluindo os executivos e os técnicos que podem enfrentar processos de responsabilidade civil quando os procedimentos são violados na fase de projeto ou na operação da mina.

Embora as minas a céu aberto estejam sempre propensas à instabilidade prevista do talude pela complexidade do ambiente envolvido, desde a adoção de metodologia formal para o projeto do ângulo de talude nos anos 1970, o número de falhas têm reduzido. Mesmo assim, têm acontecido alguns grandes acidentes na mineração a céu aberto no mundo. Tragicamente, algumas destas falhas têm resultado na perda de vida e a maioria tem severas consequências econômicas para as respectivas operações. Estas falhas têm atraído a atenção dos órgãos

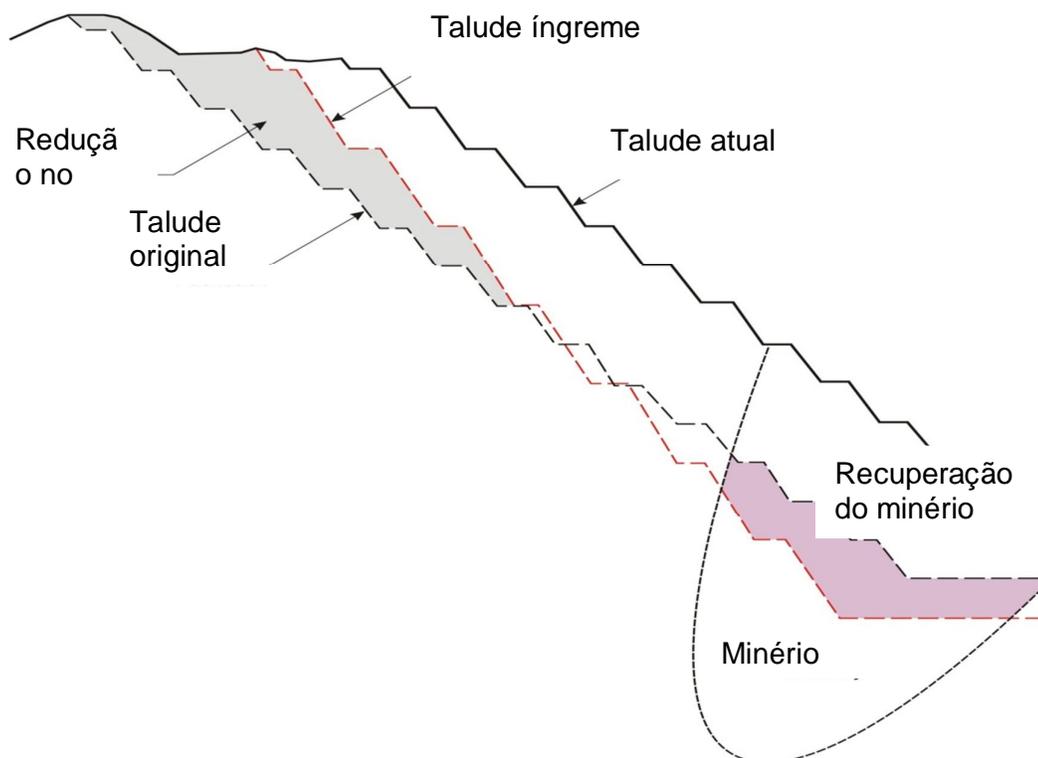
reguladores, do público e dos executivos, pois são cada vez mais responsabilizados pelas condições inseguras e eventos associados.

Embora os grandes acidentes atraiam ampla atenção, as falhas menores, algumas quedas de blocos em escala de banco que tipicamente resultam na maioria das mortes ou lesões. Para a mineração ser sustentável, segurança é o principal objetivo e deve ser tratada em todas as escalas de estabilidade do talude.

### 2.1.2.2 Fatores econômicos

O principal objetivo econômico na maioria das operações a céu aberto é atingir o ângulo máximo de talude geral adequado ao nível aceitável de estabilidade. Numa grande cava, a diferença de poucos graus na inclinação tem grande impacto no retorno da operação por aumentar a recuperação do minério e/ou reduzir o estéril (Figura 2).

Figura 2 - Impacto potencial do talude íngreme.

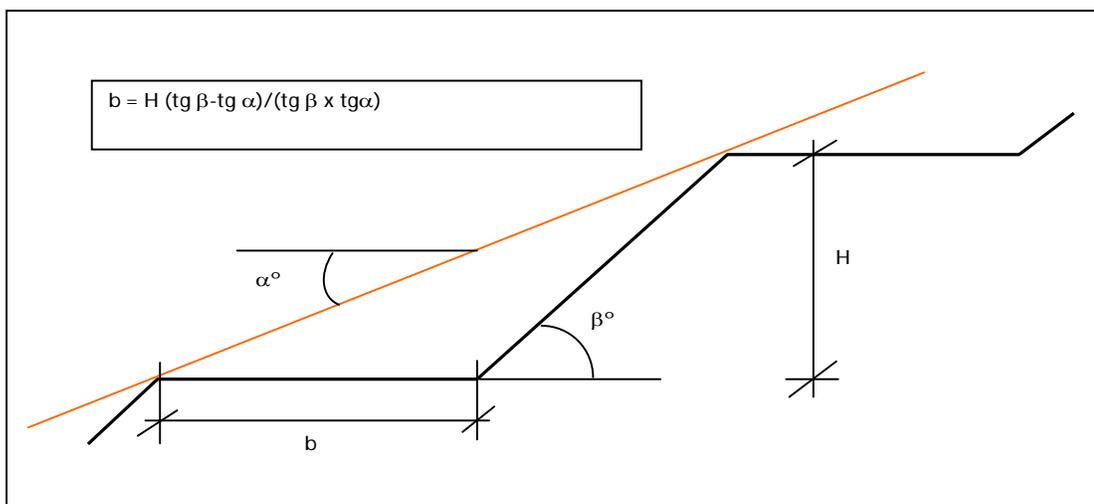


Fonte: Modificado de Read e Stacey, 2009.

A geometria do talude e dos bancos (altura e inclinação) e a largura mínima da berma operacional condicionam a inclinação máxima do talude geral possível de ser praticada. Esta

consideração pode ser visualizada nas relações que constam na Figura 3 e Equação 1, respectivamente, a seguir:

Figura 3 - Talude de Bancada e Talude Geral – Geometria.



Fonte: Mina N4E – Estudos de Estabilidade – Geoestrutural – Junho 2007

$$b = H (tg\beta - tg\alpha) / (tg\beta \times tg\alpha) \quad (1)$$

Em alguns exemplos, os ângulos dos taludes operacionais iniciais podem ser mais suaves que o ângulo “ótimo” para prover largura adicional operacional ou garantir estabilidade onde as informações do projeto são limitadas. Mas, esta flexibilidade, deve ser adotada com o conhecimento e autorização de todos os *stakeholders*, pois quase sempre tem consequências econômicas negativas.

Maior inclinação do ângulo de talude, geralmente resulta na redução do nível de estabilidade do mesmo, assumindo que os outros fatores permaneçam os mesmos. O ângulo de inclinação do talude pode ser executado sem comprometer os critérios de aceitação corporativos e regulatórios, os quais usualmente refletem os requisitos de segurança para as pessoas, equipamentos, instalações e as reservas de minério, devendo ser objeto das análises de estabilidade e por fim, avaliação do risco do empreendimento.

Algumas vezes, este critério não é suficiente para os projetos atuais de taludes em determinados termos para o planejador da mina que os aceitam, sem analisá-los. Cada vez mais, a exigência é que eles sejam propostos dentro da estrutura de níveis de risco relativos à segurança e aos resultados econômicos, por que nem sempre, a pessoa que toma a decisão tem conhecimento técnico em mineração. Neste contexto, os executivos de mineração devem ter

informação suficiente e entendimento para poderem estabelecer níveis aceitáveis de risco para a empresa e outros *stakeholders*; nestes processos o ângulo de talude deve ter um papel fundamental na decisão.

### ***2.1.2.3 Fatores Ambientais e Regulatórios***

A maioria das minas a céu aberto se desenvolvem em locais onde existem as normas de mineração específicas para segurança e para o meio ambiente, incluindo o fechamento da mina. As leis regulatórias podem ser federais, como nos casos dos Estados Unidos, Mine Safety and Health Administration (MSHA); na Rússia, SNIIP Codes; ou local, como no Canadá, provincial mining codes; na Austrália, state regulations. No Brasil, existem órgãos como o IBAMA e DNPM a nível federal, as diversas secretarias estaduais de meio ambiente e até municipais em determinadas cidades. Mas, apesar de todo tipo de código, na maioria das vezes, isto não é suficiente, a responsabilidade final por manter os padrões requeridos e as inspeções regulares dos órgãos reguladores é do gerente responsável pelo empreendimento.

Níveis de exigência dos códigos podem ser sumarizados a seguir:

Na Austrália Ocidental a responsabilidade é do gerente do empreendimento por manter plano de lavra adequado e procedimentos operacionais seguros.

Nos Estados Unidos, o MSHA não especifica o critério mínimo, embora possa incluir critérios definidos para as bermas e ângulos das faces dos bancos. Os inspetores de mina fazem cumprir as normas e são, portanto, responsáveis por aprovar a operação da cava em termos de ângulo de talude.

Diretrizes gerais, “Geotechnical Guidelines in Open Pit Mines – Guidelines” – Austrália Ocidental, estabelece linhas gerais básicas para a segurança no contexto dos fatores geotécnicos que devem ser considerados no plano de lavra e na operação da mina.

Definição de critérios gerais, por exemplo, na Columbia Britânica, Canadá, define a largura mínima das bermas e a altura máxima do banco, os quais estão relacionados à capacidade do equipamento de escavação.

Critérios detalhados, na Rússia, SNIIP Codes, define as metodologias a serem utilizadas nos respectivos níveis de projetos para investigação, plano de lavra e operação.

Na maioria dos locais é possível obter autorização por variações no Código de Mineração, por exemplo: o uso de múltiplos grupos de bancos entre bermas/plataformas, mostrando um claro caso de engenharia que pode estar presente e/ou ser priorizada por cada

variação em condições similares. Para profissionais que projetam taludes, isto significa estar sempre atualizado das mudanças nas normas regulatórias.

### 2.1.3 Terminologia de Taludes

A terminologia característica usada para definir taludes será apresentada e um caso de padronização desta terminologia, particularmente com relação ao ângulo e instabilidade.

#### 2.1.3.1 Configurações do ângulo de talude

A terminologia padrão usada descreve o arranjo geométrico dos bancos, acessos e rampas, ilustrando a configuração do talude representado na Figura 4. Os termos relevantes da configuração do ângulo de talude usados em manuais, são apresentados no glossário.

Deve-se observar que esta terminologia relativa a ângulo de talude varia conforme o local. Alguns importantes exemplos serão apresentados a seguir.

Bench Face (N. America) / Batter (Australia) / Face do Banco (Brasil)

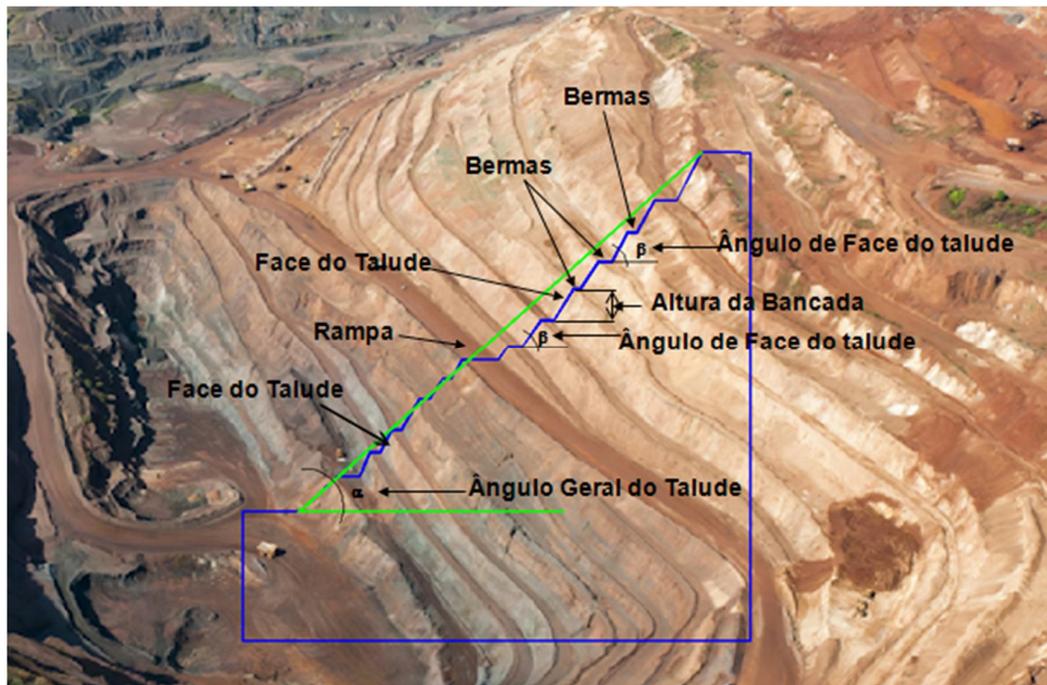
Bench (N. America) / Berm (Australia) / Berma (Brasil). Área plana entre as faces do banco, usada para evitar a queda de blocos e como acesso. O adjetivo “catch” ou “safety” é algumas vezes adicionado em frente do termo em inglês.

Berm (N. America) / Windrow (Australia) / Leira (Brasil). Leira de material colocada paralelamente ao longo do pé da face do banco para prevenir a queda de blocos e paralelamente ao longo da crista do banco para prevenir a queda de pessoas e/ou equipamentos, coleta e condução das águas superficiais (drenagem). Observe aqui a potencial confusão no uso do termo “berm” ou “a flat surface”.

Benchstack / Bancos entre rampas. Grupo de bancos entre uma superfície horizontal, por exemplo: rampas ou bermas mais largas propostas pela geotecnia.

Outro aspecto da terminologia que pode causar confusão é a definição de orientação do ângulo. Os projetistas usualmente trabalham com base na *dip/dip direction*, esta é a base da análise cinemática. Nos programas de planejamento de mina usualmente é requerido o *input* em termo do azimute da face, o qual é 180° na direção do mergulho da face. Independente da convenção adotada é importante que seja claramente entendida por todos os envolvidos.

Figura 4 - Terminologia aplicada a taludes em português.



Fonte: Treinamento RAC 08 – Taludes, Vale.

Observe que os ângulos das faces dos bancos são definidos entre o pé e crista de cada banco, enquanto os ângulos entre rampas são definidos pela linha dos pés dos bancos. O ângulo geral é sempre mensurado do pé do talude inferior à crista mais alta (Figura 4).

### 2.1.3.2 *Instabilidade*

A maior habilidade na detecção de pequenos movimentos nos taludes e a gestão da instabilidade também cresceram devido a necessidade de maior precisão na terminologia. Anteriormente, qualquer movimento significativo no talude era frequentemente referido a termos um pouco alarmistas como falha ou modo de falha, mesmo que o movimento pudesse ser gerenciado. Atualmente o adequado é ser mais específico sobre o nível de movimento e a instabilidade, usando as definições que reconhecem a progressão do movimento do talude ordenando a sequência da severidade do evento.

- Resposta à escavação

Movimentos iniciais no talude são frequentemente associados com o estresse da dilatação do talude devido à escavação e o confinamento provido pelo maciço que é retirado. Este tipo de movimento é uma deformação elástica e linear, ocorrendo em todo talude escavado e não necessariamente sintomático de instabilidade. Este é geralmente pequeno e relativo ao tamanho do talude, e embora possa ser detectado por instrumentos, e não necessariamente apresenta superfície com trinca ou rachadura. A deformação é geralmente em resposta à mineração, reduzindo ou parando quando a lavra é suspensa, salientando que, a resposta à escavação não conduz necessariamente à instabilidade ou grande escala de movimento se forem respeitados os parâmetros de projeto de estabilidade.

- Movimento ou dilatação

Considerado a primeira evidência clara de instabilidade, com formação associada de trincas e outros sinais visíveis, por exemplo, deformação no pé do talude. Em rocha competente, o movimento geralmente resulta de deslizamento ao longo da superfície ou superfícies, as quais podem ser geradas pela estrutura geológica (planos de acamamento, falhas.) ou uma combinação destas ou zona de fraqueza no material que forma o talude.

A dilatação do talude pode torna-se lenta e constante, onde a taxa de deslocamento é lenta e constante. Mas frequentemente pode haver aceleração, quando a resistência ao deslizamento é reduzida. Em certos casos o deslocamento pode reduzir por influência e alteração de outros fatores com o tempo (configuração do talude, pressão de água subterrânea). Embora estando em movimento, em geral, o talude mantém sua configuração original, mesmo podendo existir variação no grau de trincas e/ou rachaduras.

A lavra pode continuar segura, se um detalhado programa de monitoramento for estabelecido para gerenciar o comportamento do talude, particularmente se as taxas de deslocamento forem baixas e as causas da instabilidade puderem ser claramente definidas. Mas, se não houver intervenção, como despressurização/alívio do talude, modificação da configuração do ângulo, ou interrupção da lavra, o movimento pode conduzir a eventual falha. Tais falhas poderiam ocorrer como forças ao longo da superfície de deslizamento que se reduzem a níveis residuais, ou se houver fatores externos adicionais, como chuva torrencial, afetando negativamente a resistência do talude.

- Ruptura ou colapso

O talude pode ser considerado colapsado quando o deslocamento tenha atingido níveis onde não for seguro para operar ou a função está comprometida, por exemplo: quando os acessos que passam pelo talude não permitirem o trânsito.

Os termos ruptura e colapso tem sido usados sinonimamente quando se referem a lavra a céu aberto, particularmente quando a ruptura ocorre rapidamente. Em caso de modelo de ruptura progressiva, a ruptura do talude ocorre quando o deslocamento é contínuo e acelerado a ponto de colapsar (movimento muito acelerado). Durante e depois da ruptura ou colapso do talude, a conformação original é normalmente completamente destruída. A lavra contínua quase sempre envolve modificação do talude, mesmo que a suavização do talude geral ocorra. Esta ação resulta em aumento da remoção de estéril e/ou perda de minério, com significativo impacto financeiro.

A aplicação da terminologia técnica como mostrada anteriormente ajudará a estabelecer uma maior precisão na explanação da condição do talude para profissionais não técnicos.

### 2.1.3.3 Queda de blocos

O termo “*rockfall*” (queda de blocos) é geralmente usado para material frouxo que cai ou rola da face do talude. Como isto é uma questão de segurança e não diretamente ligada com a ruptura, embora possa ser precedente a uma instabilidade de grande escala (o talude está chorando).

Figura 5 - Queda de blocos.



Fonte: Treinamento RAC 08 – Taludes, Vale.

Queda de blocos pode ser um sintoma de baixa disciplina na detonação e/ou limpeza na conformação do talude. Mas, pode ser também resultado da degradação do talude, como também resultado da ação do tempo ou do congelamento e descongelamento.

## **2.1.4 Formulação do talude**

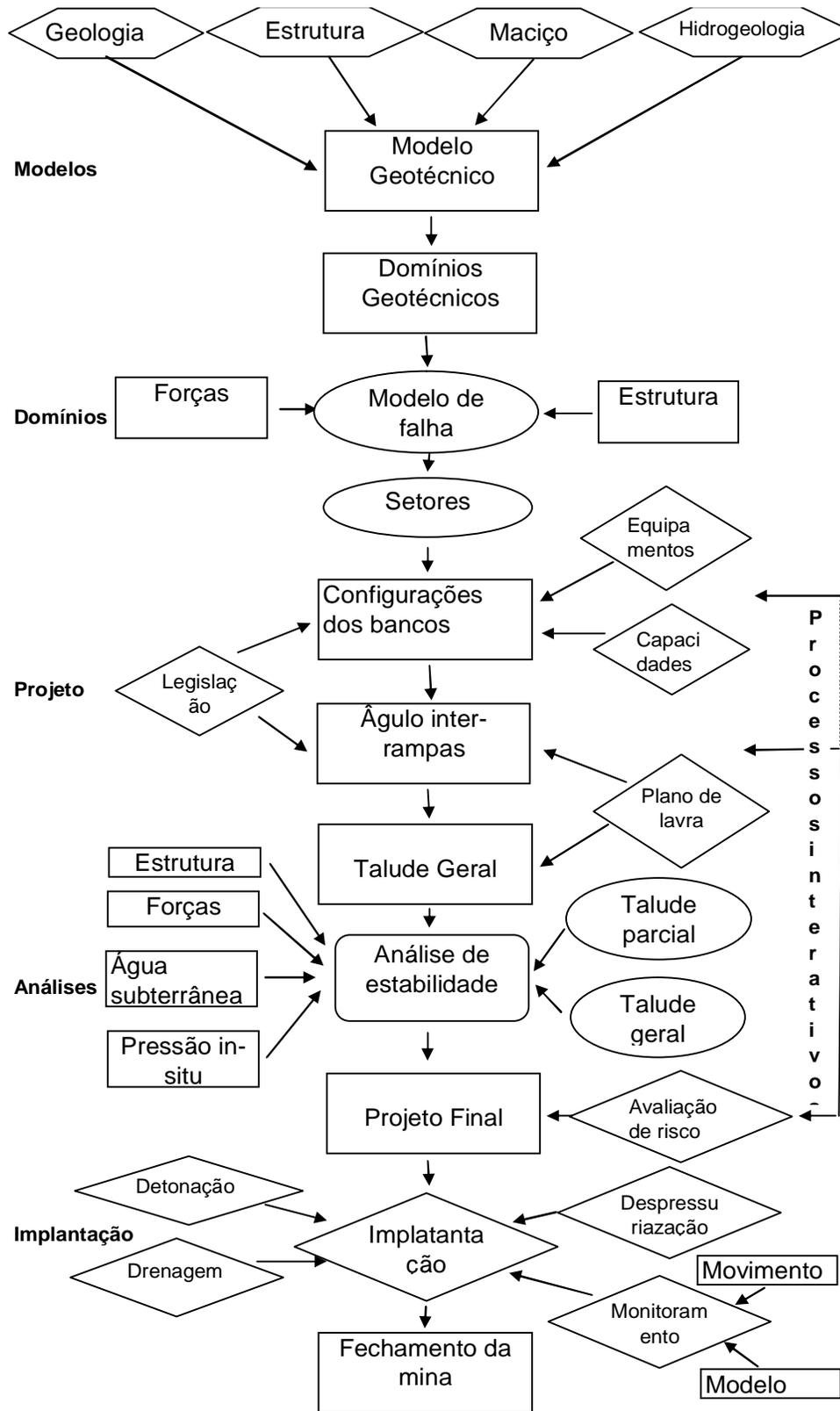
### ***2.1.4.1 Introdução***

O processo de formulação do projeto de talude está em desenvolvimento há 25 anos e é relativamente padronizado, embora algumas metodologias variem entre os profissionais especializados. Será mostrada a estrutura geral do processo como a introdução às metodologias detalhadas, as quais serão abordadas.

O processo básico para projetar o talude, independente do tamanho ou material, está sumarizado na figura 6. O processo para projetar o talude envolve essencialmente as seguintes fases:

- Formulação do modelo geotécnico por área;
- população do modelo com maior relevância;
- divisão do modelo em domínios geotécnicos;
- sub-divisão dos domínios por setores;
- projeto dos elementos do talude nos respectivos setores conforme os domínios;
- avaliação da estabilidade do talude resultante em termos dos critérios de aceitação;
- Definição dos requisitos de implantação e monitoramento do talude.

Figura 6 - Fases e elementos do Projeto de Talude.



Fonte: Modificado de Read e Stacey, 2009.

Os projetos dos taludes resultantes não devem somente ser tecnologicamente seguros, mas devem ser também endereçados a todo o contexto da operação da lavra, levando em conta a segurança, os equipamentos disponíveis para a implantação do projeto e o nível de risco aceitável para a empresa.

#### ***2.1.4.2 Considerações finais***

Estabilidade e dimensionamento de taludes é um tema muito extenso e rico em bibliografia. Como será abordado especificamente a operacionalização da reconfiguração de taludes, não será necessário o aprofundamento programático o qual tornaria esta dissertação muito extensa. O tema está apresentado de forma sucinta para reforçar e embasar a necessidade da reconfiguração de taludes.

## **2.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DAS CAMADAS DE ESTRADAS DE MINERAÇÃO**

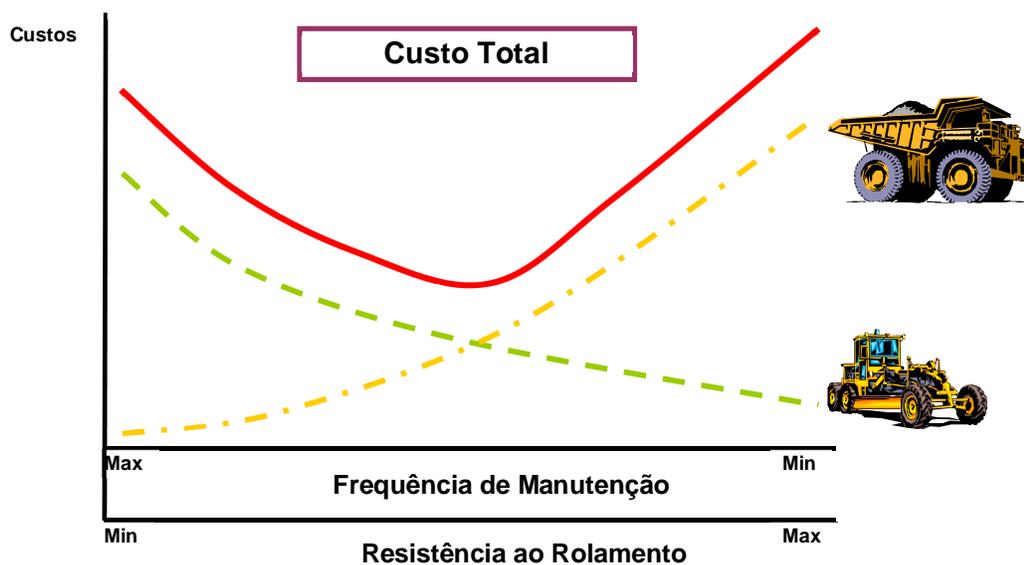
### **2.2.1 Construção, recuperação e manutenção de praças e pistas de rolamento**

As estradas de mina são projetadas e construídas segundo critérios específicos de caráter geométrico, estrutural, funcional e de drenagem, em conformidade com as legislações ambientais e normas regulamentadoras de saúde e segurança vigentes.

Um sistema eficiente de gestão de estradas deve considerar o estudo dos parâmetros envolvidos em cada fase, assim como a inter-relação entre eles. Dessa maneira, é possível a proposição de especificações que levem à otimização do uso das estradas do ponto de vista técnico, de segurança e de minimização de custos operacionais além da proposição de um sistema de dimensionamento de estradas aplicado à mineração.

A Figura 7 mostra que o projeto das estradas de mina deve conciliar o custo de construção e manutenção das estradas, com impacto no custo dos equipamentos de transporte. Onde as duas linhas se cruzam, encontra-se o custo otimizado, ou seja, o melhor custo benefício para determinada operação.

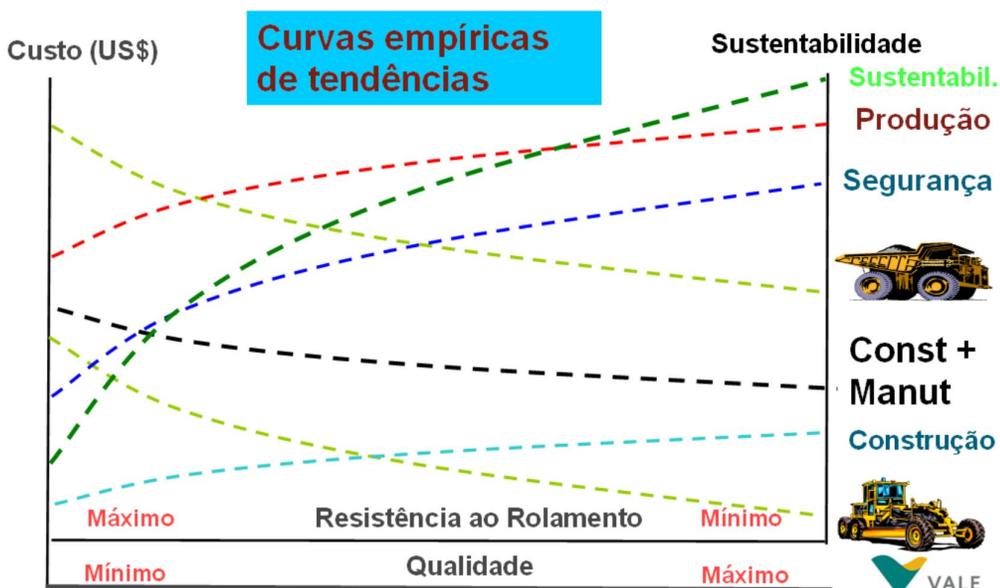
Figura 7 - Curva de custos teórica de estradas de transporte em mineração.



Fonte: Modificado de Thompson e Visser, 1999.

A Figura 8 mostra que a qualidade das estradas de mina impacta na produtividade dos equipamentos de carga e transporte, no custo de manutenção dos mesmos, na segurança das operações mineiras e no ambiente organizacional, uma vez que pode propiciar melhores condições de conforto e comodidade para os operadores, gerando melhor posicionamento do empreendimento quanto à sustentabilidade.

Figura 8 - Impactos das estradas na mineração.



Fonte: Modificado de Thompson e Visser, 1999.

Na Figura 9, pode-se observar a área operacional do complexo de minas de Carajás. Na verdade, a mina de Carajás está dividida em três minas principais, N4, N4E e N5. Aparecem destacadas ainda na imagem a posição dos BSMs (britadores semimóveis) que recebem o ROM assim como as pilhas de estéril em operação atualmente, que recebem os materiais fora de especificação ou estéreis por definição.

Figura 9 - Imagem da área operacional com a locação de acessos e principais destinos.



Fonte: Foto aérea do Complexo de Carajás – Planejamento de Mina, Vale.

### 2.2.2 Metodologia

Neste capítulo são revisados os principais tópicos relacionados a pavimentos, com destaque aos assuntos referentes a estradas mineiras. São apresentados os diversos tipos de projeto, com ênfase nos métodos de dimensionamento estrutural, principal foco de estudo deste trabalho. Objetiva-se, com isso, obter embasamento e suporte necessários ao desenvolvimento e a aplicação do estudo nos capítulos subsequentes.

## **2.2.3 Tipos de projetos de estradas de mina**

### ***2.2.3.1 Projeto Geométrico***

Pontes Filho (1998) define projeto geométrico como a correlação entre os elementos físicos de uma estrada e parâmetros operacionais, tais como frenagem, aceleração e características de operação.

O projeto geométrico de estradas de mina deve contemplar elementos que propiciem basicamente maior segurança de operação dos equipamentos que trafegam pelas vias. Deve também considerar condições que levem ao maior rendimento dos equipamentos de transporte, através de menor desgaste de pneus, chassi, motor, transmissão, entre outros componentes mecânicos. O aumento contínuo nas dimensões dos caminhões fabricados ao longo dos últimos anos, principalmente os fora-de-estrada, afeta diretamente os parâmetros de projeto geométrico.

Em síntese, a geometria de uma estrada é composta de alinhamentos horizontais (segmentos de retas concordados com curvas) e verticais (linhas de declividade retas e curvas), superelevações, distâncias de visibilidade e interseções entre elementos geométricos, entre outros.

### ***2.2.3.2 Projeto Estrutural***

O dimensionamento de um pavimento, foco principal do projeto estrutural, consiste na definição das espessuras das camadas que o compõe. Essa configuração minimiza, na medida do possível, a necessidade de manutenções excessivas (Hugo, 2005). Essas camadas devem ter capacidade de suporte e espessura que:

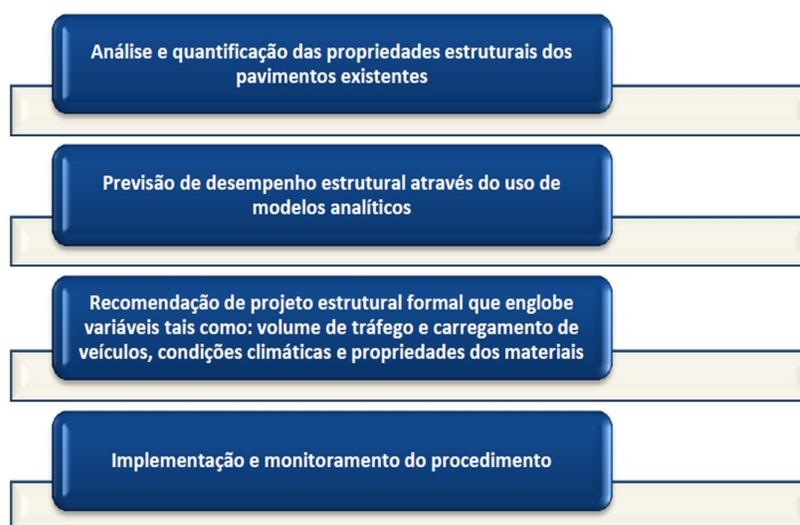
- resistam à ruptura;
- não apresentem deformações ou desgastes excessivos, quando submetidas a esforços de carga devidos ao tráfego dos equipamentos;
- absorvam as cargas transferidas a elas sem que ocorram deformações no subleito do terreno abaixo delas.

Em estradas mineiras, é primordial que os materiais normalmente existentes na própria mina, ou no seu entorno, possam ser utilizados na construção das camadas do pavimento. Neto (2004) acrescenta, como parte do objetivo do dimensionamento de pavimento, a

compatibilização dos materiais que compõem as camadas, de tal forma que a vida útil do pavimento corresponda a um número projetado de solicitações de carga.

Thompson (1996) enfatiza que o projeto estrutural é constituído por um processo de composição do arranjo mais econômico das camadas do pavimento (considerando sua espessura e tipos de materiais disponíveis), que seja compatível com o material *in situ* e com o volume de tráfego previsto para a vida útil das estradas. Ele agrupa as atividades de um projeto estrutural em etapas distintas, representadas esquematicamente pela Figura 10.

Figura 10 - Etapas do dimensionamento das camadas do pavimento das estradas mineiras.

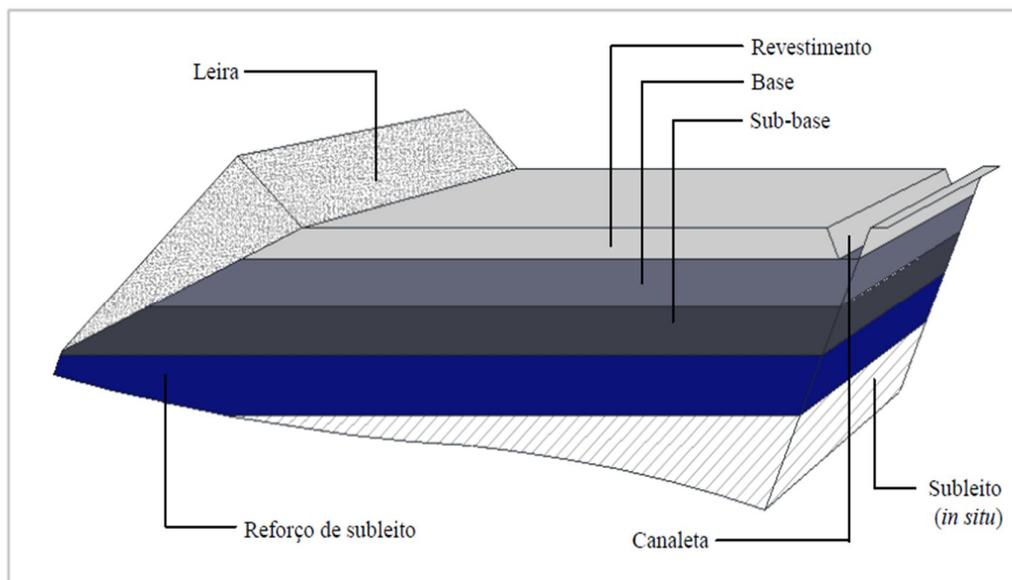


Fonte: Masetti, 2011.

Em relação à primeira etapa da Figura 10, entende-se que é igualmente válido partir-se da análise e quantificação das propriedades estruturais de pavimentos a serem construídos, além dos existentes, e que a composição das atividades subsequentes também é aplicável a esta condição.

Um pavimento idealmente dimensionado é formado por camadas de revestimento, base, sub-base e reforço de subleito, projetadas e construídas acima do terreno normalmente constituído pelo subleito *in situ*, conforme Figura 11. Elementos de projeto geométrico (leira) e de drenagem (canaleta) também são apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Projeto de estrada de mina.



Fonte: Masetti, 2011.

Estradas de mina são compostas por uma única camada de revestimento disposta sobre o subleito quando este é competente (constituído por materiais *in situ* resistentes), o que lhe confere boa capacidade de suporte. Este método também é empregado em estradas mineiras com vida útil de curta duração. Caso contrário, projeta-se um sistema de duas ou três camadas, normalmente constituídas por revestimento, base e/ou sub-base.

- Revestimento

O revestimento é a camada superficial que exerce papel funcional de promover tração e resistência à ação abrasiva do tráfego e ao cisalhamento. Além disso, ele transmite a carga imposta pelo 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

A base é uma camada de alta densidade e estabilidade. Ela distribui as tensões transmitidas pelos pneus, atuando na camada de revestimento de tal forma que essas tensões não provoquem deformação excessiva da sub-base e/ou subleito. Ela também protege a sub-base contra alterações volumétricas, 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 poderá provocar a deterioração geral do acesso.

- Sub-base

A sub-base, quando considerada no dimensionamento, é geralmente projetada sobre subleitos de solos pouco competentes. Em geral, é constituída por material granular. A sub-base promove drenagem e minimiza os efeitos de contração e expansão do subleito na estrutura do pavimento como um todo, além de aumentar a capacidade de suporte estrutural e de distribuir o carregamento.

- Reforço de subleito

O reforço de subleito é uma camada que pode ou não existir. Tem como finalidade distribuir mais adequadamente as tensões que atingem o subleito em função do seu suporte.

- *Subleito*

O subleito é a camada de fundação. Essa estrutura deve suportar todos os carregamentos aplicados nas camadas superiores. Pode ser constituído pelo próprio terreno natural (material *in situ*), por rocha ou solo compactado.

### ***2.2.3.3 Projeto funcional***

O projeto funcional refere-se à escolha adequada de materiais de revestimento que propiciem economia, conforto e segurança ao tráfego dos veículos.

O tratamento do revestimento contra a geração de poeira excessiva, causada principalmente pela abrasão de material particulado, deve ser considerado. Sistemas de aspersão fixa dispostos ao longo das leiras de segurança das estradas e caminhões pipa são usados na redução de poeira. No entanto, a umectação das vias nem sempre é eficiente, devido a fatores como insolação e rápida secagem do pavimento.

Ferreira (2007) estuda técnicas de tratamento contra pó. Ele destaca a possibilidade de aspersão de material betuminoso e a aplicação de areia grossa ou pedrisco, seguidos de compactação.

Tannant e Regensburg (2001) enumeram líquidos estabilizantes e polímeros como eficientes métodos de tratamento para minimização de poeira. Alguns exemplos são asfaltos emulsificados, produtos a base de cloreto de cálcio, linsulfatos de cálcio e surfactantes adicionados ao solo.

De maneira geral, os tratamentos acima listados promovem certa impermeabilização à camada de revestimento. Consistem em tratamentos menos provisórios do que o simples uso ou a combinação de materiais encontrados nas minas, visto que envelopam a camada de revestimento, criando uma película selante. Obviamente, recomenda-se o uso de tais procedimentos em estradas mineiras com vida útil longa.

### ***2.2.3.4 Projeto de drenagem***

A elaboração e execução de um projeto de drenagem são vitais em estradas de mina, pois um dos principais fatores que provocam a degradação de estradas não pavimentadas é a erosão provocada pelo escoamento superficial e o acúmulo de água em seu leito e margens. A água pode ser originada de escoamento superficial, gerada na própria estrada ou proveniente de áreas marginais. A coleta e o direcionamento adequados da água para escoadouros naturais, artificiais, bacias de acumulação ou outro sistema de retenção localizado no terreno marginal, são objetos do projeto de drenagem (Oliveira *et al.*, 2009, Griebeler *et al.*, 2005 e Griebeler, 2002).

Quanto menos tempo a água ficar sobre as estradas, ou às margens, ou infiltrada nas camadas estruturantes, menor será o dano causado. Posto isto, deve-se cuidar do

direcionamento e escoamento da água superficial longitudinal e transversal (abaulamento) da estrada e também da água infiltrada nas camadas estruturantes da estrada que deve ser drenada através de estruturas drenantes que atinjam a parte inferior da base ou sub-base da estrada. Evitando a saturação e conseqüente degradação da estrutura da estrada.

## **2.2.4 Manutenção, readequação e segurança**

### **2.2.4.1 Manutenção**

A manutenção de estradas tem como objetivos conservar a superfície de rolamento razoavelmente isenta de irregularidades, firme e livre de perda excessiva de material solto, além de manter a declividade transversal do leito da estrada apropriada para assegurar o escoamento superficial das águas. É constituída por um conjunto de atividades que são executadas para minimizar os defeitos e, conseqüentemente, reduzir os custos operacionais dos caminhões, assim como para prolongar a vida útil das estradas.

A manutenção de uma estrada depende de itens como materiais que a constituem, solicitações do tráfego, esforços aplicados ao piso, drenagem e intempéries. A qualidade dos materiais usados na construção das camadas e o sistema de drenagem influenciam de forma definitiva o desempenho das estradas. Esse desempenho está relacionado com os defeitos, que são agravados à medida que a estrada é mais solicitada pelo tráfego.

As condições da superfície de uma estrada de acesso influenciam diretamente parâmetros de segurança, qualidade e custos de manutenção dos caminhões (consumo de combustível e lubrificante, desgaste dos pneus, etc.). A taxa de deterioração de uma estrada que tenha sido bem construída será menor e, conseqüentemente, a frequência de manutenção corretiva será mais baixa.

As técnicas de gerenciamento de manutenção de estradas, normalmente aplicadas em minas, apresentam respostas em curto prazo e não são desenvolvidas e utilizadas da forma mais eficaz possível (Hugo et al., 2005). Além disso, estradas mal ou não projetadas, construídas com pouca técnica e mantidas de maneira indevida, provocam maiores desgastes nos equipamentos que por elas transitam e aumento na frequência de manutenção dos mesmos.

Brown *et al.* (2001) realçam que a manutenção dos equipamentos provoca perda de produção e aumento de custos; a manutenção corretiva de equipamentos, por exemplo,

depende do tempo necessário para diagnosticar a falha, da disponibilidade de componentes e do tempo efetivo para a realização do reparo.

Thompson e Visser (2003b) desenvolvem um estudo de sistema de gerenciamento de manutenção de estradas de mina. O parâmetro resistência ao rolamento é utilizado na avaliação de desempenho funcional das estradas e em modelos de custo operacional de caminhões. Objetiva-se obter a frequência ótima de manutenção de tais vias.

#### **2.2.4.2 Readequação**

A readequação das estradas consiste em refazer as camadas, quando as medidas tomadas na fase de manutenção deixam de ser efetivas. Ela consiste na reavaliação dos elementos de projeto e construção em suas diversas fases, detectando aqueles que são críticos e que devem, portanto, ser retrabalhados.

A condução da readequação dos acessos existentes deve ser precedida por levantamentos de campo, buscando-se caracterizar e classificar os defeitos encontrados nas estradas. O tempo de vida útil do acesso, assim como a frequência de tráfego nas áreas em estudo, são variáveis importantes a serem consideradas no processo de tomada de decisão quanto à real necessidade de readequação do acesso e quanto aos parâmetros que devem ser abordados.

Dentre os possíveis parâmetros avaliados na readequação de estradas, a qualificação e quantificação do grau de severidade dos defeitos são também norteadoras da necessidade de manutenção e readequação dos acessos. Defeitos são alterações na superfície da estrada de acesso, influenciando negativamente suas condições de uso e reduzindo o desempenho operacional de transporte. O tráfego e a ação das intempéries aceleram o processo de degradação da superfície das estradas, principalmente quando não existem técnicas de manutenção adequada.

Segundo Silva (2008), os defeitos associados ao revestimento dos pavimentos podem ser de natureza estrutural (associados à capacidade estrutural) ou funcional (associados às condições de conforto e segurança). Para o autor, enquanto defeitos estruturais podem estar associados a defeitos funcionais, pavimentos funcionalmente defeituosos podem não apresentar problemas estruturais.

Em seu trabalho de caracterização de estradas não pavimentadas voltado à implantação de um sistema de gerência, Oda (1995) realiza um extenso estudo a respeito dos tipos de defeitos nessas estradas, tanto em termos de revisão bibliográfica relevante, quanto

em relação aos métodos de avaliação das suas condições. Ela mostra que os defeitos mais comuns são seção transversal e drenagem lateral inadequadas, corrugações, buracos, poeira, afundamento de trilha de roda e segregação de agregados.

Ferreira (2004) comenta sobre a importância da caracterização das condições superficiais das estradas, variando, nos casos extremos, de excelente a falida. Segundo o autor, a partir dessa caracterização podem ser definidos os tipos de manutenção necessária, tais como: rotina, reconformação, restauração e reconstrução.

#### **2.2.4.3 Segurança**

Do ponto de vista de saúde e segurança ocupacional, acessos de mina bem projetados propiciam condições mais seguras aos operadores dos equipamentos que por elas transitam. Somam-se às melhorias na segurança, ambientes de trabalho mais salubres, através, por exemplo, de elementos de projeto funcional que mitigam a geração de pó em suspensão.

Thompson *et al.* (1997) investigam associações entre os acidentes de transporte em minas e estradas que tenham sido projetadas preliminarmente à sua construção. O estudo conclui que apesar de um pequeno percentual dos acidentes ser diretamente atribuído a padrões de projeto mal delineados, há uma falta geral de conhecimento da função e importância dos vários componentes do projeto e de questões associadas à operação e ao gerenciamento de transporte seguro.

No mesmo estudo, Thompson *et al.* (1997) desenvolvem um sistema de auditoria em segurança em estrada de mina para apurar o conhecimento da necessidade de um bom projeto na minimização de acidentes de transporte. Segundo esses autores, a condução do sistema de auditoria tem como objetivos prover uma visão estruturada dos problemas de segurança para os usuários das estradas e garantir que as medidas a serem tomadas para a eliminação desses problemas sejam completamente avaliadas. Além disso, os benefícios da auditoria são vistos como redução potencial no número e gravidade dos acidentes de transporte, assim como redução na necessidade de custos corretivos, caso a auditoria tenha sido implementada na fase de projeto.

Em abordagem mais aprofundada relacionada à auditoria de estradas, Thompson e Visser (2006) focam na adoção de melhores práticas e projetos *benchmark* que se apliquem a projetos de estradas na mineração. A auditoria é apontada como base para a redução potencial de acidentes devidos a estradas mal projetadas. Também é considerado que esse processo é

um difusor de melhores práticas e condutas entre os envolvidos, sejam eles operadores dos equipamentos de transporte nas minas ou planejadores e executores das estradas.

### **2.2.5 Métodos de dimensionamento de pavimentos**

Os métodos de dimensionamento de pavimentos têm sido estudados e pesquisados ao longo dos anos com o intuito de adaptá-los à realidade local. No caso de estradas de mina, são inúmeras as variáveis que caracterizam os empreendimentos mineiros e influenciam o sistema viário e seu entorno. Tipos litológicos, topografia regional, fatores climáticos, vegetação local e frota de equipamentos, são alguns dos parâmetros que particularizam as minas e fazem com que demandem estudos individualizados.

Os métodos de dimensionamento de pavimentos podem ser classificados como empíricos ou mecanístico-empíricos. Os métodos empíricos são baseados em observações, tentativas e experiências previamente realizadas em campo. Os métodos mecanístico-empíricos são fundamentados em modelos matemáticos.

Adverte-se que não há um método definido como puramente mecanístico, porque há uma estreita relação entre a resposta estrutural do pavimento (tensões, deformações e deslocamentos) associada à verificação de sua deterioração *in loco*, que não deve ser desconsiderada (Monteiro, 1996 e Brasil, 2009). Portanto, os métodos mecanístico-empíricos são também denominados teórico-experimentais.

#### **2.2.5.1 Métodos empíricos**

Os métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos baseiam-se em testes experimentais repetidos e observações de campo. Consideram as propriedades mecânicas do subleito e das camadas do pavimento. A abordagem dos métodos empíricos é determinística, ou seja, assume-se que os parâmetros estudados são fixos e únicos.

De forma geral, as aplicações dos métodos empíricos limitam-se a particularidades relativas a condições climáticas, tipos de materiais e pavimentos, características geomorfológicas e condições de carregamento. Eles também não consideram o trincamento por fadiga nos pavimentos flexíveis, devido ao efeito de repetição de deformações elásticas excessivas.

Franco (2007) salienta que os métodos empíricos são limitados por não poderem ser generalizados com confiabilidade para condições diversas àquelas consideradas para as quais

foram desenvolvidos. Batista (2001) traduz, de forma semelhante, as limitações dos métodos empíricos, salientando a elevada complexidade do pavimento em termos das tensões e deformações que ocorrem nas suas camadas, quando submetido a esforços devidos à carga dinâmica imposta pelo tráfego. Finalmente, Divinski *et al.* (1996) mostram a importância do uso de abordagem probabilística no projeto de dimensionamento do pavimento, enfatizando que tal análise é essencial para melhor entendimento do comportamento do pavimento e da previsão de seu desempenho futuro.

### 2.2.5.2 Carga de roda e o CBR

Um dos métodos mais usuais de dimensionamento de pavimento em estradas de mina é o que tem como base o ensaio CBR (*California Bearing Ratio*, correspondente ao Índice de Suporte Califórnia, ISC, em português) e a carga de roda. O desenvolvimento desse método deve-se ao engenheiro O. J. Porter, do Departamento de Estradas da Califórnia, na década de 1920. O método refere-se à capacidade de suporte das camadas do pavimento, de forma a evitar a ruptura plástica do subleito sob carregamento estático.

O cálculo do CBR é dado, conforme Hustrulid e Kuchta (2006), pela razão percentual entre a pressão exercida por um pistão que penetra uma amostra de solo em estudo e a pressão exercida pelo pistão, nas mesmas condições, em uma amostra padrão de referência, sendo normalmente constituída por brita bem graduada de alta qualidade com CBR igual a 100%.

O dimensionamento de pavimento, baseado na carga de roda e no CBR em sua forma original, é apresentado por Divinsky *et al.* (1996), conforme Equação 2.

$$t_p = \alpha_i \times \sqrt{A \left( \frac{p_e}{8,1 \times CBR} - \frac{1}{\pi} \right)} \quad (2)$$

Onde:

$t_p$  = espessura do pavimento (em polegadas).

$\alpha_i$  = fator de repetição de carga, dependendo do número de repetições e da distribuição do carregamento.

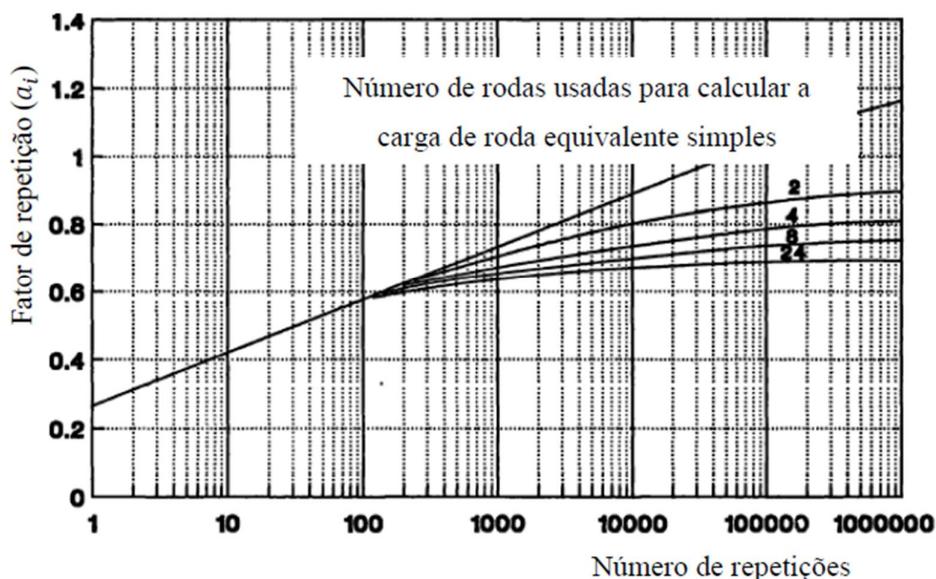
$A$  = área de contato de um pneu (em polegadas ao quadrado).

CBR = *California Bearing Ratio* (%).

$p_e$  = pressão interna (inflação do pneu) em carregamento de roda simples ou equivalente, fornecida pelo fabricante (em libras por polegada ao quadrado).

O fator de repetição de carga é obtido por uma relação gráfica entre o número de repetições e as rodas em múltiplas configurações, conforme Figura 12.

Figura 12 - Fator de repetição de carga.



Fonte: Modificado de Thompson, 1996.

A área de contato de um pneu ( $A$ ) é dada pela Equação 3.

$$A = \frac{P}{p_e} \quad (3)$$

Onde:

$P$  = carga da roda (em libras).

É estudada por vários autores a não uniformidade da distribuição da pressão de contato dos pneus, além do que ela é claramente maior do que a pressão de inflação. Ela é maior nas bordas dos pneus do que no centro, quanto maior for a carga (Himeno *et al.*, 1997 e De Beer

et al., 1997 apud Medina e Motta, 2005). Apesar disso, para fins de simplificação, admite-se que a pressão de contato seja igual à pressão de inflação, sendo a força vertical distribuída de maneira uniforme na área de contato entre o pneu e a superfície do pavimento.

A Equação 2 só é válida para valores de CBR inferiores a 12% ou para a relação CBR/ $p_e$  inferior a 0,22. Do contrário, o melhor ajuste para a curva de CBR generalizada é dado pela equação polinomial cúbica apresentada por Ahlvin *et al.* (1971), Hammit e Hutchinson (1971) e Yoder e Witczak (1975), conforme Equação 4, sendo as três referências citadas por Divinsky *et al.* (1996):

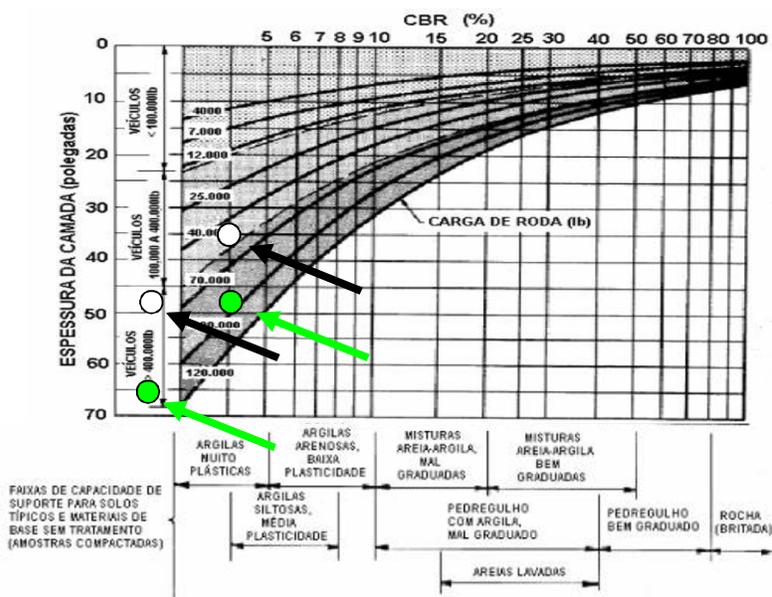
$$t = \alpha_i \times \sqrt{A} \times \left[ -0,0481 - 1,1562 \times \left( \log \frac{CBR}{p_e} \right) - 0,6414 \times \left( \log \frac{CBR}{p_e} \right)^2 - 0,4730 \left( \log \frac{CBR}{p_e} \right)^3 \right] \quad (4)$$

A aplicação do método de carga de roda, ou simplesmente CBR, pode ser feita a partir de um ábaco contendo curvas com os valores de CBR dos materiais ensaiados contra a espessura da camada para vários carregamentos de roda. Diferentes curvas empíricas foram desenvolvidas ao longo dos anos para aplicações específicas, compondo o ábaco da Figura 13

. Algumas delas incluem, por exemplo, a consideração do número de ciclos de carregamento. Determina-se a espessura total do pavimento a ser construído sobre o subleito e são calculadas as espessuras das camadas de sub-base e base.

Apesar de o gráfico da Figura 13 dar um indicativo geral dos valores de CBR de acordo com o tipo de material, é recomendado proceder aos ensaios laboratoriais de CBR tanto das camadas que serão dimensionadas quanto do subleito originalmente existente, visto que ele suportará todos os carregamentos aplicados nas camadas superiores. Salienta-se que a carga de roda é obtida dividindo-se o peso do veículo carregado sobre cada eixo pelo número de pneus naquele eixo.

Figura 13 - Ábaco para dimensionamento de pavimento usando valores de CBR e carga de roda.



Fonte: Modificado de Tannant e Regensburg, 2001.

O melhor desempenho do pavimento projetado, considerando-se os valores de CBR dos materiais que o compõem, somente será possível se a construção do aterro se fizer em camadas finas compactadas (aproximadamente 20 cm). Enfatizando-se a importância de compactação adequada, Cruz (2005) lembra que há redução no índice de vazios do solo depois de compactado, tornando-o menos compressível e aumentando sua capacidade de suporte. Uma boa compactação deve ser feita utilizando-se rolos compactadores, sendo que os rolos vibratórios são utilizados principalmente na densificação de solos granulares (Das, 2007).

Além das limitações aos métodos empíricos já descritas, alguns autores impõem restrições ao uso do método CBR para estradas de mina (Thompson, 2009 e Morgan *et al.*, 1994 apud Kumar, 2000), devido aos seguintes aspectos:

- O método CBR baseia-se na Teoria da Elasticidade em meios semi-infinitos homogêneos de Boussinesq, em que o módulo de elasticidade dos materiais do pavimento é considerado constante, em meio dado como elástico linear. Na realidade, há grande diversidade de materiais passíveis de serem utilizados na estrutura dos pavimentos de mina, cada um com propriedades diversas.
- Não são consideradas no método CBR as propriedades dos materiais de revestimento.

O método foi originalmente desenvolvido para ser utilizado em estradas pavimentadas e em aeródromos. Há grande diferença entre os parâmetros usados nesses tipos de estradas e os aplicados às estradas mineiras, principalmente no que se refere ao tipo de material usado nas camadas do pavimento e às características dos eixos dos equipamentos.

Acrescentam-se às restrições acima o fato de que, no gráfico do CBR apresentado na Figura 13, considera-se no eixo das abscissas solos típicos de clima temperado, submetidos a invernos rigorosos em que há congelamento atingindo até a profundidade do subleito, seguidos de degelo na primavera, o que encharca o pavimento. As características dos solos brasileiros são outras, sujeitos a diferentes tipos de relevo e a condições climáticas tropicais, gerando consequentes graus de intemperismo diversos.

Observe-se que Medina e Motta (2005) já haviam chamado atenção para esse fato, apontando a pouca utilização de parâmetros experimentais de deformabilidade dos solos e dos materiais de pavimentação tipicamente brasileiros.

### **2.2.6 Materiais usados na construção de camadas de base e sub-base**

Medina e Motta (2005) descrevem sumariamente tipos de solos e rochas usados na pavimentação rodoviária brasileira. Os principais tipos de solo são:

- Solos residuais ou saprólitos grossos: também denominados saibros, esses solos ocorrem em mantos de intemperização de granitos e gnaisses na região Sudeste.
- Solos lateríticos: compreendem uma ampla categoria, pois o processo de ferralização abrange 70% do território nacional. Nesse grupo enquadram-se as areias finas lateríticas e os solos argilosos vermelhos lateríticos. As areias têm sido usadas em camadas de base, com adição de brita. As argilas vermelhas são usadas como reforço do subleito, sub-base e base puras, misturadas com brita ou com tratamento por aditivos químicos.
- Cascalhos lateríticos: são camadas concrecionadas por aporte de hidróxidos de ferro e alumínio (em depósitos arenosos) pelas águas de percolação, evaporação e oxidação, ou resíduos de couraças ferruginosas do Terciário. A utilização desse material é comum em substituição à brita de granito, gnaisse e outras rochas sãs.

- Areias e pedregulhos aluvionares de rios e depósitos marginais, terraços, etc: solos sedimentares ocorrentes em todo o território nacional. O uso desses materiais puros na pavimentação é desprezível. No entanto, quando adicionados a cinza volante e cal hidratada na proporção aproximada de 13% e 5%, respectivamente, geram uma mistura pozolânica rígida. Essa abordagem é citada por Kumar (2000) e Leandro (2005), ao final desse tópico.

Os principais tipos de rocha usadas em pavimentação são:

- Granitos e rochas associadas (pegmatito, sienito, granodiorito e quartzodiorito): pedreiras de granito produzem britas de boa qualidade.
- Gnaisses, micaxistos e filitos: os gnaisses se intemperizam menos que os outros dois materiais.
- Basaltos, diabásios e arenitos: os diabásios possuem boa característica de brita, porém podem gerar muitos fragmentos lamelares.
- Calcários: as variedades compactas são utilizadas como brita e têm ótima adesividade ao asfalto.

Com o objetivo de analisar o comportamento mecânico de solos lateríticos para uso em pavimentação, Dias (2007) realiza ensaios de compressão simples e triaxiais convencionais. Esses tipos de solo possuem tom avermelhado e amarelado, são superficiais, altamente intemperizados e lixiviados. É característica a agregação de argilas, formando torrões quase sempre distinguíveis e resistentes.

As frações areia e pedregulho são constituídas basicamente por quartzo e minerais pesados (magnetita, ilmenita e zircão). A fração argila é formada principalmente por argilo-minerais (especialmente a caolinita), óxidos e hidróxidos de ferros e/ou alumínio, assim como constituintes orgânicos. Os óxidos possuem elevada superfície específica e dimensões diminutas, porém são não plásticos ou muito pouco plásticos. Dias (2007) avalia e destaca o bom uso das lateritas na construção de camadas de pavimentos e conclui que os solos lateríticos são mais resistentes à ruptura do que os solos não lateríticos de mesma granulometria, tanto na condição de saturação quanto na condição não saturada.

Kumar (2000) estuda a utilização de cinza volante produzida em plantas de geração de energia canadenses com possível aplicação à construção de estradas de mina. O autor verifica que esse resíduo tem potencial para ser usado como material de construção de camadas de base e sub-base de estradas mineiras, constatando que o módulo de elasticidade é alto o suficiente para atender a limites de deformação desejados. Para o autor, investigação

complementar é necessária para definir o percentual adequado de óxido de cálcio a ser utilizado na mistura para que as cinzas atinjam o grau máximo de cimentação.

De maneira semelhante a Kumar (2000), porém com foco na possível utilização de materiais na construção de pavimentos rodoviários, Leandro (2005) estuda a viabilidade de uso de cinza pesada produzida na região sul do Brasil como material incorporado a solos para a construção de camadas de base e sub-base em pavimentos flexíveis. Esse resíduo arenoso é obtido na queima do carvão mineral nas indústrias de geração de energia termelétrica, sendo gerado pela aglomeração de grãos semifundidos depositados no fundo da caldeira e transportados para bacias de sedimentação.

Conclui-se nesse trabalho que a cinza pesada adicionada aos solos melhora as propriedades mecânicas das misturas compactadas na condição de teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima, desde que utilizada com um estabilizante como a cal, adicionada às misturas de solo-cinza.

### **2.2.7 Materiais usados na construção de camadas de revestimento**

A escolha dos materiais de revestimento é um pouco diferente daquela considerada para as outras camadas. Neste caso, além dos requisitos gerais, devem ser levados em consideração alguns fatores operacionais aos quais apenas o revestimento é submetido, como controle de poeira, suavidade ao tráfego, aderência e resistência ao rolamento. Além disso, para essa camada é exigida a utilização do melhor material disponível, visto que ela recebe as ações de desgaste e as maiores cargas dinâmicas causadas pelo tráfego dos veículos.

Solos cascalhados naturais e rochas britadas são materiais largamente utilizados na construção de estradas de mina, principalmente na base e no revestimento. Esses materiais exibem baixa resistência ao rolamento e elevada aderência. Eles se destinam, em geral, a garantir a máxima segurança e eficiência operacional.

Esses materiais são frequentemente usados porque normalmente são encontrados na própria mina ou no seu entorno, podendo ser usados a baixo custo e com rapidez de obtenção. Quando os acessos são construídos e mantidos adequadamente, ambos os materiais propiciam estradas estáveis que resistem à deformação e permitem boa tração com baixa resistência ao rolamento. A espessura necessária da camada pode ser obtida pelas curvas CBR.

Monenco (1989) apud Tannant e Regensburg (2001) aponta vantagens e desvantagens do uso desses materiais como revestimento. As vantagens consistem em propiciarem superfície estável e relativamente lisa, promoverem baixa deformação sob carregamento e

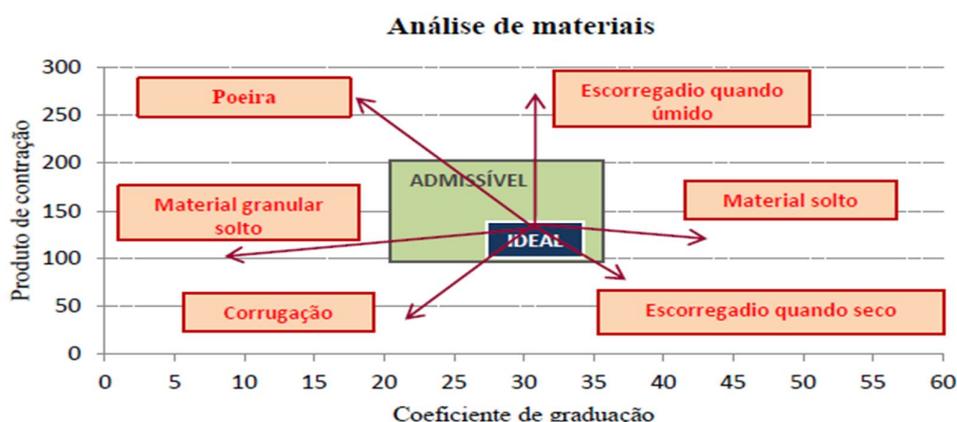
baixa resistência ao rolamento. Eles são também de fácil construção a custos relativamente baixos. Como desvantagens são salientadas a necessidade de manutenção frequente e possível necessidade de britagem e peneiramento. Além disso, podem gerar poeira e material inconsolidado no período seco e são passíveis de erosão quando inundados.

Outros materiais que têm se mostrado aplicáveis ao uso como revestimento são escória, cinza vulcânica, rejeitos de processamento mineral e granito alterado.

Segundo estudos realizados por Thompson e Visser (2002), a adequabilidade da escolha de materiais como revestimento pode ser analisada no espaço formado pelas variáveis coeficiente de graduação (GC) e produto de contração (SP), definidas adiante, e representadas na

Figura 14. Nesse espaço, as características do material são lançadas como um ponto no gráfico. De acordo com a sua localização, é atribuído a ele o comportamento mais provável que terá ao ser utilizado como material de revestimento. Se o ponto estiver nos limites da área marcada como “ideal”, as propriedades do material propiciam o seu uso como revestimento. Caso esteja na área delimitada como “admissível”, o seu uso como revestimento ainda é considerado viável. Qualquer ponto externo ao retângulo maior caracteriza materiais inapropriados para uso, visto que gerariam impactos negativos.

Figura 14 - Valores ótimos de produto de contração e coeficiente de graduação para materiais de revestimento.



Fonte: Modificado de Thompson e Visser, 2002.

O coeficiente de graduação ou *grading coefficient* (GC) é dado pela Equação 5:

$$GC = \frac{(P_{265} - P_2) \times P_{475}}{100} \quad (5)$$

Onde: P<sub>265</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>475</sub> = percentual de solo passante nas peneiras 26,50 mm, 2,00 mm e 4,75 mm, respectivamente.

O produto de contração ou *shrinkage product* (SP) é dado pela Equação 6:

$$SP = LS \times P_{425} \quad (6)$$

onde:

LS = contração linear (bar linear Shrinkage)

P<sub>425</sub> = passante na peneira 0,425 mm

A contração linear corresponde à redução unidimensional de uma amostra. O solo, moldado inicialmente no limite de liquidez, tem o teor de umidade reduzido em estufa, até que não sofra mais deformações. A diferença de comprimento entre o estado inicial e a amostra deformada é expressa em percentual. O ensaio é realizado conforme a *American Society for Testing and Materials* (ASTM 356-10 - *Standard Test Method for Linear Shrinkage of Preformed High-Temperature Thermal Insulation Subjected to Soaking Heat*). A contração linear é calculada pela Equação 7:

$$LS (\%) = L_s / L \times 100 \quad (7)$$

onde:

L = comprimento do molde (mm)

LS = contração longitudinal da amostra (mm)

### 2.2.8 Vida útil de estradas

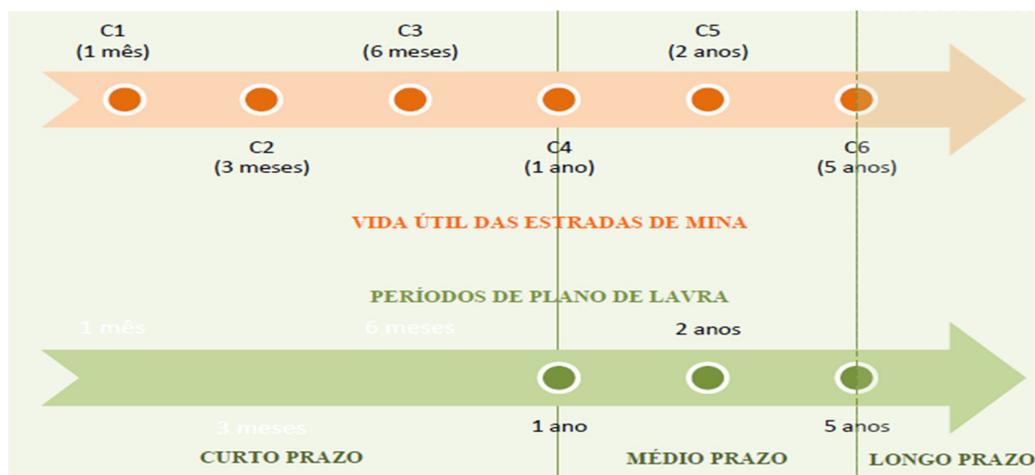
Em um estudo feito por Oliveira Filho et al. (2010), propõe-se o tratamento de parâmetros de projeto, construção e manutenção de estradas baseado na classificação da vida útil do acesso. Os acessos mineiros são divididos em seis categorias de acordo com o seu tempo de duração. A classe C1 refere-se à via com duração de um mês, C2 três meses, C3 seis

meses, C4 um ano, C5 dois anos e C6 classifica estradas que duram cinco anos ou mais. A partir da classe de vida útil em que o acesso se enquadre, cada parâmetro de projeto, construção ou manutenção é avaliado e qualificado quanto à necessidade de tomar-se uma providência, ou uma não providência. No primeiro caso, os conceitos envolvidos na otimização do parâmetro em questão deverão ser aplicados; em contrapartida, no segundo caso tais conceitos não precisam ser levados em consideração, não sendo necessário, portanto, serem avaliados e implementados.

As classes orientam a formação de conceitos úteis para que os responsáveis por tomadas de decisão encontrem medidas que efetivamente possibilitem o controle dos mecanismos que levam à degradação da estrutura do acesso e mitiguem os custos relativos à sua manutenção.

Em geral, as empresas de grande porte, principalmente as de minério de ferro, consideram o planejamento de lavra de curto, médio ou longo prazo de acordo com a produção anual prevista. Para empreendimentos mineiros cuja movimentação total é de no mínimo 15.000.000 t de minério de ferro, usualmente o horizonte do planejamento de curto prazo é considerado para o período de até um ano, o de médio prazo entre um e cinco anos e o de longo prazo acima de cinco anos. Fazendo-se um comparativo com a previsão de vida útil dos acessos, as classes C1 a C6 estão coerentes com tais períodos de planejamento de lavra. As classes C1 a C4 seriam tratadas pelo planejamento de curto prazo, enquanto C5 e C6 seriam abordadas pelo planejamento de médio prazo, conforme apresentado esquematicamente na Figura 15.

Figura 15 - Classes de estradas de mina em relação ao planejamento de lavra.



Fonte: Masseti, 2011.

## **2.2.9 Dimensionamento de estradas de mina no contexto de normas**

### ***2.2.9.1 Normas brasileiras***

Diferentemente do tratamento que se dá às estradas rodoviárias, as normas brasileiras voltadas à mineração não contemplam parâmetros técnicos de dimensionamento de suas estradas. A ênfase de tais regulamentos está no estabelecimento de questões relativas à segurança do trabalhador. O Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) estabelece as Normas Regulamentadoras (NR) relativas à segurança e medicina do trabalho. Dentre as 34 normas existentes, a NR-22 (Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração) aplica-se ao escopo deste trabalho. O objetivo dessa norma, segundo o MTE (1978), é compatibilizar o planejamento e o desenvolvimento da atividade mineira com a saúde e segurança do trabalhador.

Os itens da NR-22 diretamente aplicáveis ao presente estudo referem-se basicamente aos parâmetros de projeto geométrico: largura mínima das vias de trânsito e altura de leiras de segurança nas laterais de bancadas ou estradas com risco de queda de veículos. A norma não contempla, no entanto, os parâmetros envolvidos no projeto estrutural de dimensionamento de estradas.

A portaria DNPM nº 237 de 18/10/2001 aprova as Normas Reguladoras de Mineração (NRM), que regulam o Código de Mineração (instituído pelo Decreto-Lei nº 227 de 28/02/1967 e regulamentado pelo Decreto nº 62.934, de 02/07/1968) (Resende, 2009). O objetivo das NRM é semelhante ao das NR, acrescentando-se a busca de produtividade e de preservação ambiental à preocupação com a saúde e segurança do trabalhador (Brasil I, 2006).

A NRM 13 (Circulação e transporte de pessoas e materiais) considera os mesmos parâmetros da NR-22 para largura de vias de acesso e altura de leiras e também não trata das questões relativas ao dimensionamento das estradas mineiras.

### ***2.2.9.2 Normas norte-americanas***

Dentre as consultas a referências internacionais de países com tradição e expressividade mineral, ressaltam-se as normas que regem o sistema minerário dos Estados Unidos. O país é um grande produtor de minérios derivados de minerais metálicos como ouro, prata, chumbo e cobre, e de minerais não metálicos, como enxofre e fosfato.

O Mine Safety and Health Administration (MSHA) é um órgão pertencente ao Ministério do Trabalho Norte-Americano que regula o Código de Mineração (*Federal Mine Safety and Health Act of 1977: Mine Act*), atualizado pelo Código do Minerador (*Mine Improvement and New Emergency Response Act of 2006: MINER Act*). O MSHA faz cumprir as normas regulamentadoras de mineração, com objetivos de eliminar acidentes fatais e reduzir a frequência e gravidade de acidentes não fatais, minimizar riscos à saúde e promover melhorias nas condições de saúde e segurança dos mineradores.

O MSHA possui uma série de manuais, dos quais se destacam o manual de saúde e segurança para minerais metálicos e não metálicos (*Metal And Nonmetal Health Inspection Procedures*) (MSHA, 2006) e o manual de suporte técnico para estradas de mina (*Haul Road Inspection Handbook*) (MSHA, 1999). No entanto, ambos os documentos não tratam dos parâmetros de dimensionamento de pavimentos. Enquanto o primeiro aborda assuntos voltados diretamente à saúde e segurança do trabalho (higiene, poeira, barulho e contaminantes, entre outros), o segundo trata de alguns parâmetros geométricos, de drenagem e manutenção das vias.

## 2.3 TRATORES DE ESTEIRA

### 2.3.1 Definições básicas e contextualização de estudos voltados à aplicação dos Tratores de Esteira

Para executar a movimentação de terras existem os mais diversos tipos de equipamentos à disposição dos empreendedores.

Assim, será necessário, inicialmente, tomar conhecimento das máquinas existentes, e das suas características principais, para classificá-las e, em seguida, estudar a sua aplicação prática nos serviços de terraplanagem.

A Norma Brasileira da ABNT – P-TB-51 refere-se à classificação e terminologia das máquinas rodoviárias, em vigor desde 1968, e substituindo a antiga P-NB-103/62. Compreende as Partes I e II relativas aos Equipamentos e Máquinas para Terraplanagem (I) e Equipamentos e Máquinas para Compactação (II).

Para efeito do estudo dos equipamentos de terraplanagem, adotaremos a classificação proposta por Rego Chaves em seu livro “Terraplanagem Mecanizada”:

- 1) Unidades de tração (tratores)
- 2) Unidades escavo-empurradoras
- 3) Unidades escavotransportadoras
- 4) Unidades escavocarregadoras
- 5) Unidades aplainadoras
- 6) Unidades de transporte
- 7) Unidades compactadoras
- 8) Unidades escavo-elevadoras

### **2.3.2 Generalidades sobre as unidades de tração (tratores)**

A unidade de tração (trator) é a máquina básica da terraplanagem, pois todos os equipamentos à nossa disposição, para executá-la, são tratores devidamente modificados ou adaptados a realizar as operações básicas da terraplanagem.

Chama-se trator a unidade autônoma que executa a tração ou empurra outras máquinas e pode receber diversos implementos destinados a diferentes tarefas.

Essa unidade básica pode ser montada sobre esteiras e pneumáticos recebendo as denominações genéricas de trator de esteira ou trator de rodas (ou de pneus).

Essas máquinas possuem certas características comuns que devem ser definidas:

- a) esforço trator: é a força (potência = Força x Velocidade) que o trator possui na barra de tração (no caso de esteiras) ou nas rodas motrizes (no caso tratores de rodas) para executar as funções de rebocar ou de empurrar outros equipamentos ou implementos;
- b) velocidade: é a velocidade de deslocamento da máquina que depende, sobretudo, do dispositivo de montagem, sobre esteiras ou sobre rodas;
- c) aderência: é a maior ou menor capacidade do trator de deslocar-se sobre os diversos terrenos ou superfícies revestidas, sem haver a derrapagem da esteira (ou dos pneus) sobre o solo (ou revestimento) que o suporta;
- d) flutuação: é a característica que permite ao trator deslocar-se sobre terrenos de baixa capacidade de suporte, sem o afundamento excessivo da esteira, ou dos pneus, na superfície que o sustém;

e) **balanceamento:** é a qualidade que deve possuir o trator, proveniente de uma boa distribuição de massa e de um centro de gravidade a pequena altura do chão, dando-lhe boas condições de equilíbrio, sob as mais variadas condições de trabalho.

A esteira do trator é constituída por placas de aço rígidas, de vários tipos e tamanhos, ligadas umas às outras, de maneira que haja articulação entre elas, permitindo sua adaptação ou acomodação às irregularidades do terreno.

Essas placas possuem, na superfície em contato com o terreno, uma saliência chamada garra, que nele penetra, aumentando a aderência entre esteira e a superfície de suporte. De acordo com o tamanho dessas garras haverá maior ou menor aderência entre as superfícies, mas com maior dificuldade de manobra da máquina.

A largura da esteira é bastante variável, dependendo do tipo, porte e utilização da máquina. O uso de esteiras largas permite a diminuição da pressão exercida sobre o terreno e o deslocamento da máquina sobre solos de baixa capacidade de suporte, melhorando as características de flutuação.

De modo geral, as esteiras exercem pressões sobre o terreno portante da ordem de 0,5 a 0,8 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente.

Os equipamentos de rodas, ao contrário, transmitem ao terreno pressões de contato da ordem de 3 a 6 kg/cm<sup>2</sup>.

A diminuição da largura da esteira implica aumento da pressão de contato, de maneira que nos terrenos fracos haverá a tendência ao afundamento. Nos terrenos de maior suporte, a maior pressão exerce certo adensamento sobre o solo, resultando maior resistência ao cisalhamento, especialmente nos solos argilosos.

Entretanto, nos solos não-coesivos (areias, silte-arenosos etc.) isso não ocorre e, ao contrário, procura-se aumentar a área de contato evitando o patinamento pela falta de aderência.

### ***2.3.2.1 Campo de aplicação***

Os tratores de esteiras e de rodas têm os seus campos de aplicação bem distintos em razão de suas características diferentes.

Os trabalhos que requerem esforços tratores elevados, com rampas de grande declividade, resultante da topografia acidentada, ou quando executados em terrenos de baixa capacidade de suporte, não importando o fator velocidade e em curtas distâncias (<100 m), constituem o campo de aplicação ideal para os tratores de esteira.

Quando a topografia é favorável, isto é, as declividades das rampas não são fortes e as condições de suporte, aderência do solo são boas e as distâncias são longas, as máquinas de pneus são insuperáveis. Portanto, podemos utilizar a sua maior vantagem que é a velocidade elevada, significando, em última análise, maior produção.

Contudo, ultimamente, os fabricantes e projetistas de equipamentos têm introduzido certas modificações na parte mecânica, que resultam na melhoria do desempenho dos tratores de pneus quanto à aderência e flutuação. Assim, podemos citar a utilização de tração nas quatro rodas, aumento da potência dos motores, diferenciais travantes, pneumáticos revestidos com esteiras ou correntes metálicas, fatores esses que têm contribuído para sanar as deficiências das máquinas de pneus, no tocante à aderência e flutuação, permitindo, inclusive, a execução de trabalhos anteriormente considerados como apropriados aos tratores de esteiras.

### ***2.3.2.2 Novas tendências no projeto dos tratores de esteiras:***

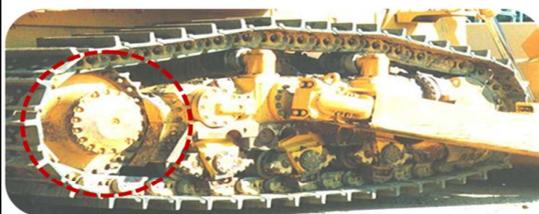
Os tratores de esteiras mais recentes apresentam, em relação aos mais antigos e convencionais, algumas modificações de projeto e fabricação.

#### **1- Roda motriz elevada**

Os modelos mais recentes, desde os tratores de pequeno porte até os mais pesados, têm apresentado a roda motriz elevada em relação ao plano médio da esteira. Esta fica apoiada na parte superior pela roda motriz, que substitui o rolete superior. Assim, a função de roda motriz será apenas impulsionar a esteira.

Figura 16 - Comparação roda motriz elevada e roda motriz no chassis – conforto do operador.

## Projeto Roda Motriz Elevada & Rodas guias flutuantes



Roda Motriz no Chassis

O projeto elíptico da esteira coloca o comando final ao nível do solo, expõe a grandes impactos.

Desconforto para os operadores devido a pequenos “saltos” .



• Roda Motriz Elevada

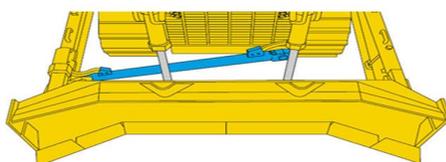
Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

As vantagens apresentadas por essa modificação são várias, entre elas:

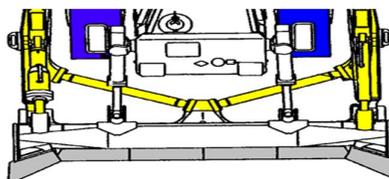
a) com as rodas motrizes separadas do “chassis” da esteira e dos roletes, OS comandos finais e as embreagens laterais de direção ficam aliviados de todas as cargas verticais de impacto, bem como todas as cargas de choques provenientes da lâmina e da barra de tração;

b) as cargas fletoras existentes no “chassis” da esteira que produzam desalinhamento do eixo motriz e das embreagens do comando final foram eliminadas;

Figura 17 - Comparação roda motriz elevada e roda motriz no chassis – cargas fletoras.



Roda Motriz Elevada



Roda Motriz no Chassis

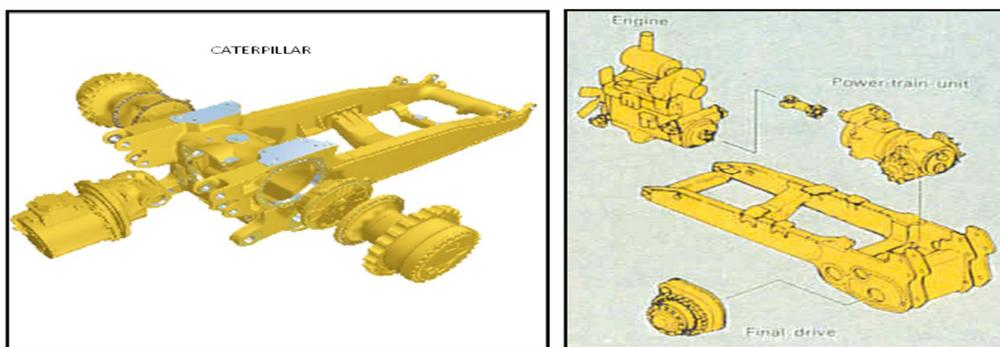
Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

os retentores do comando final são mais protegidos por ficarem mais distantes dos elementos abrasivos constituídos pela terra, areia, fragmentos de rochas etc;

c) sob o aspecto da manutenção mecânica do trator, a grande vantagem está na possibilidade de alcançar-se o comando final sem necessidade de abrir a esteira.

Figura 18 - Roda motriz elevada – projeto modular.

#### PROJETO MODULAR



O projeto de componentes modulares da CAT possibilita menores tempos para remoção e instalação de componentes, portanto maior disponibilidade dos tratores.

Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

#### 2- Suspensão flutuante e independente dos roletes

Os roletes, em grupos de quatro, são fixados ao “chassis” da esteira independentemente e podem oscilar em torno de pinos fixos.

Figura 19 - Roda motriz elevada – Suspensão flutuante e independente dos roletes.



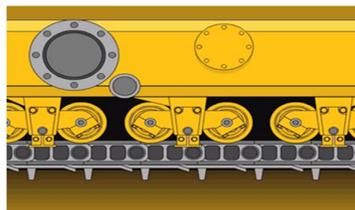
✓ Projetado para operar em materiais rochosos, o chassi montado elasticamente prolonga a vida útil do componente.

✓ Reduz o impacto da carga no comando final, acomoda material rodante.



12 / Caterpillar Confidential: GREEN / WHEREVER THERE'S MINING

video clip



Demonstração



Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

Cada grupo principal tem, por sua vez, dois roletes da esteira, os quais também oscilam em torno de pinos fixos. As rodas-guias dianteira e traseira são ligadas aos grupos principais e se elevam junto com eles quando encontram obstáculos.

Esse sistema permite que as sapatas se amoldem às irregularidades do terreno pela sua ação de flutuação, reduzindo os impactos nos roletes, pinos e “chassis” da esteira.

Assim os roletes e as sapatas estão quase sempre em contato com o terreno, melhorando a aderência e a tração da máquina e tornando mais suave o seu movimento.

### 3- Servotransmissão

O conjunto do conversor de torque e das engrenagens planetárias, que constituem a servotransmissão, é colocado na parte posterior do trator, tornando fácil o acesso e a sua remoção sem haver necessidade de desmontar parte da transmissão, como acontecia nos modelos antigos.

### 4- Modificações da esteiras

As esteiras das máquinas mais recentes apresentam modificações relevantes a fim de aumentar sua durabilidade, em face do desgaste que sofrem no uso normal.

#### a) Roletes de lubrificação permanente

O eixo dos roletes fica imerso em óleo lubrificante permanente, encerrado numa câmara vedada, o que aumenta sua vida útil pela redução do desgaste normal por abrasão.

#### b) Pinos da esteira com lubrificação permanente

Os pinos da esteira são envolvidos pelas buchas, protegidos por uma película de óleo lubrificante, proveniente de um reservatório situado no próprio pino, o que, também, reduz o desgaste entre essas peças.

#### c) Roda motriz segmentada

A roda motriz não é inteiriça como nos modelos antigos, sendo os dentes colocados em segmentos periféricos e parafusados a ela. Podem ser removidos e substituídos com facilidade no campo, desmontar a esteira e a roda motriz.

#### d) Buchas rotativas

Nos tratores antigos o contato permanente entre as buchas e os dentes da roda motriz produzia, com o uso continuado, desgaste localizado das duas peças. Era necessário, após certo número de horas de operação, o giro das buchas para melhor distribuir o desgaste na superfície de contato.

Esse problema foi resolvido pela introdução das buchas rotativas. Com o movimento de rotação, o desgaste provocado distribui-se uniformemente ao longo de sua superfície. Essa modificação evita o giro das buchas e reduz o desgaste dos dentes da roda motriz.

#### 5- Sistema de direção hidrostática

Este sistema de direção hidrostática envia a potência para ambas as esteiras, sem que haja interrupção para a que move internamente numa curva.

Nesse caso, a esteira interna tem velocidade mais baixa que a externa, graças a um sistema de engrenagens planetárias, movidas por um motor hidrostático, que absorve o diferencial de velocidades, sem que se produza o arrastamento. Os raios das curvas resultantes são reduzidos, o que facilita a operação em locais de pouco espaço.

Como as esteiras podem mover-se em sentidos contrários simultaneamente (contra-rotação), o trator pode girar sobre si mesmo.

### 2.3.3 Tratores disponíveis no mercado brasileiro

Hoje no mercado brasileiro existem vários modelos de tratores de esteira de diferentes capacidades (potência motor) e tamanhos disponíveis.

Nas figuras a seguir são apresentados os principais.

Figura 20 - Tratores de pequeno porte disponíveis no mercado.



Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

Figura 21 - Tratores de médio porte disponíveis no mercado.



Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

Figura 22 - Tratores de grande porte disponíveis no mercado.



Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

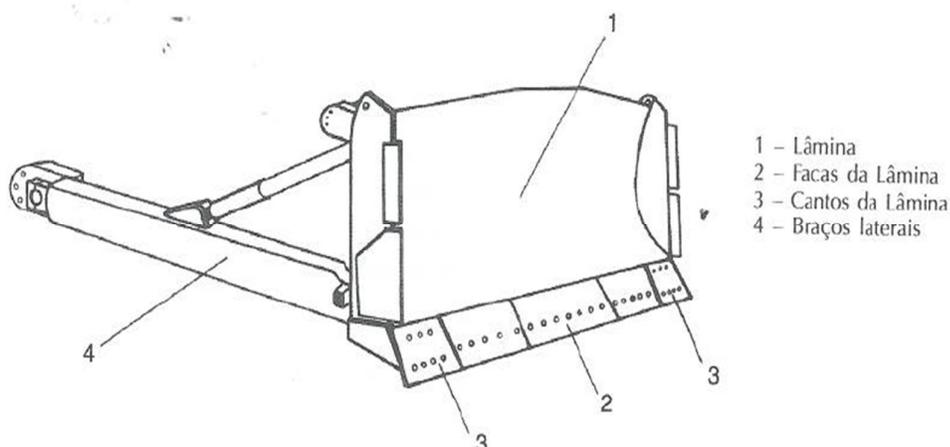
## 2.3.4 Descrição dos implementos dos tratores de esteira e aplicações

Unidades escavo-empurradoras

O trator de esteiras ou de pneus, que é a máquina básica da terraplanagem, pode receber a adaptação de um implemento que o transforma numa unidade capaz de escavar e empurrar a terra ou outros materiais fragmentados de diversos tamanhos, chamando-se, por isso, unidade escavo-empurradora.

Esse implemento é denominado lâmina e o equipamento passa a chamar-se trator de lâmina ou “bulldozer”.

Figura 23 - Lâmina e seus componentes.



Fonte: Ricardo e Catalani, 2007.

A lâmina tem sua seção transversal curva para facilitar a operação de desmonte e na parte inferior recebe a ferramenta de corte, constituída de peça cortante, denominada faca da lâmina, nela parafusada. Nas extremidades, temos duas peças menores que são os cantos da lâmina. As facas e os cantos são facilmente removíveis para substituição, quando desgastados pela abrasão resultante da operação de corte, ou quando sofrem fraturas pelo choque com obstáculos diversos: blocos de rocha, matações, restos de concreto etc.

As lâminas são suportadas por braços laterais, fixados no chassi da esteira, um de cada lado.

O acionamento da lâmina, ou seja, a sua movimentação no sentido vertical, nos modelos antigos, por um sistema de guincho, polias e cabos de aço.

Nos modelos modernos esse acionamento foi modificado para o tipo hidráulico, que apresenta diversas vantagens em relação ao anterior.

Figura 24 - Lâmina com acionamento hidráulico.

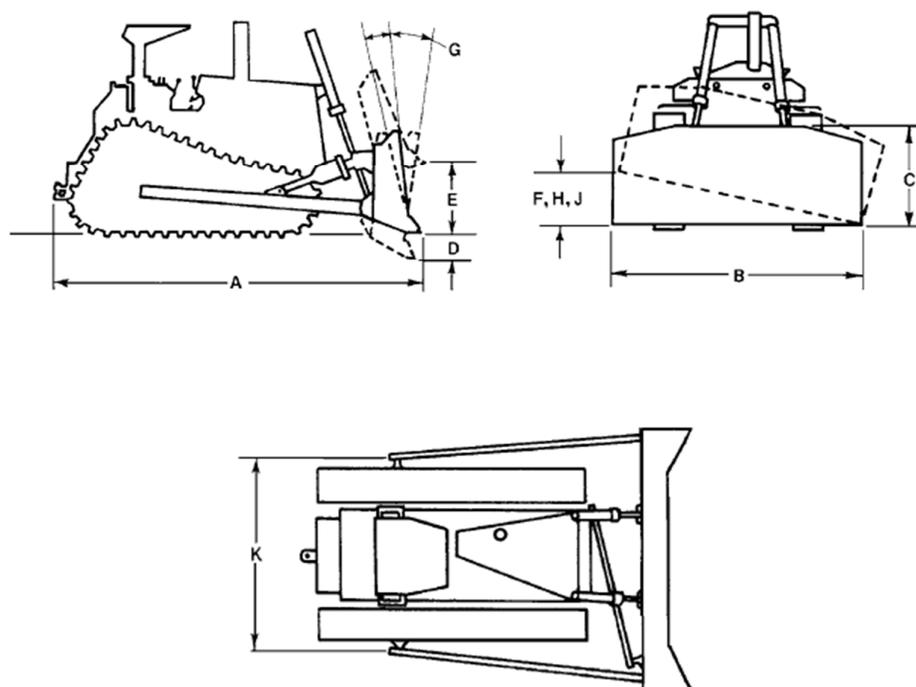


Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

O acionamento hidráulico é feito por dois pistões de duplo efeito que sustentam a lâmina e são movidos pela pressão fornecida por uma bomba hidráulica de alta pressão.

Uma das principais vantagens consiste no fato de que os dois pistões podem exercer um empuxo (E) sobre o solo, forçando a lâmina ou, especialmente, a faca sobre a superfície a ser cortada. Além disso, nos materiais mais compactos e, mais difíceis de serem escavados, o empuxo aumenta bastante a eficiência da operação de corte, resultando em aumento de produção.

Figura 25 - Dimensões gerais do trator e da lâmina.



Fonte: Manual de Desempenho Caterpillar, 2011.

## LEGENDA

- B** Largura (incluindo cantos de lâmina padrão)
- C** Altura
- D** Profundidade Máxima de Escavação
- E** Altura Livre sobre o Solo ao Levantamento Total
- F** Inclinação Máxima (Manual)
- G** Ajuste de Tombamento Máximo
- H** Inclinação máxima hidráulica
- J** Inclinação Hidráulica (braço manual centrado)
- K** Largura do Munhão do Braço de Empuxo (até os Centros das Esferas)

A principal vantagem da lâmina “angledozer” está no fato de o trator, ao se deslocar, levar o material lateralmente, o que facilita a escavação e o seu transporte, especialmente no caso de corte em meia-encosta, formando-se uma leira contínua paralela à direção seguida pelo trator. Em alguns equipamentos modernos a angulagem é feita através de dois pistões hidráulicos de duplo efeito. Além dessa angulagem, algumas lâminas podem ser inclinadas lateralmente em relação a um eixo vertical do trator, e denominam-se lâmina “tilt-dozer” ou inclináveis. O movimento de inclinação é conseguido por intermédio de dois pistões hidráulicos, colocados lateralmente, ou através de parafusos adaptados nos braços laterais que permitem o seu alongamento ou retração feitos manualmente.

Há, ainda, um tipo de lâmina especial, “tip-dozer” (tombamento), que pode variar o seu ângulo de ataque em relação à superfície do solo, facilitando a escavação em terrenos compactos.

Figura 26 - Lâmina inclinável (tombamento).



Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

- Seleção de lâminas

A Caterpillar Brasil, em seu “Manual de Produção” (Caterpillar, 2011), apresenta os principais tipos de lâmina que podem ser colocados em seus produtos, mostrando as características e as vantagens de cada uma, bem como o campo de aplicação. As considerações a seguir dão informações para a escolha da lâmina mais adequada ao trabalho que se tem em vista.

Combinar um trator com o bulldozer é um requisito básico para o aproveitamento máximo da produção. Considere primeiro o tipo de trabalho que o trator estará fazendo a maior parte de sua vida útil. Em seguida, calcule:

- O material a ser movimentado.
- As limitações do trator.
- Materiais a serem movimentados

A lâmina pode trabalhar na maioria dos materiais. Contudo, o desempenho do bulldozer varia de acordo com as características do material, tais como:

Tamanho e Forma das Partículas – Quanto maiores as partículas individuais, mais difícil será a penetração da borda cortante. As partículas pontiagudas resistem à ação natural de rolamento da lâmina. Estas partículas exigem mais potência para sua remoção do que um volume semelhante de material com bordas arredondadas.

Vácuos – A escassez ou inexistência de vácuos significa que a maior parte ou toda a superfície de cada partícula encontra-se em contato com outras partículas. Isto forma uma liga que deve ser desfeita. O material bem granulado, sem vazios, é geralmente pesado, e difícil de ser removido de seu estado natural.

Teor de Umidade – Na maioria dos materiais, a falta de umidade reforça a liga entre as partículas e dificulta a remoção do material em seu estado natural. Um alto teor de umidade dificulta a operação da lâmina porque o material fica pesado e exige mais força para ser deslocado. O teor ideal de umidade reduz a poeira e fornece melhores condições para operação da lâmina, além de propiciar maior conforto ao operador.

O efeito do congelamento depende do conteúdo de umidade. Quando congelada, a liga do material se reforça à medida que o conteúdo de umidade aumenta e a temperatura diminui. Contudo, se o material estiver totalmente seco, o congelamento não alterará suas características.

Uma indicação da capacidade de penetração da lâmina e carregamento de carga é a relação kW/m da borda cortante. Quanto maior a relação kW/m, mais agressiva a lâmina. A relação kW por m<sup>3</sup> solto indica a capacidade da lâmina para empurrar materiais. Quanto mais alta a relação kW/m<sup>3</sup> solto, maior será a capacidade potencial da lâmina de transporte de material a uma velocidade mais alta.

- Limitações do Trator

O peso e a potência da máquina determinam a capacidade de empuxo. Nenhum trator pode exercer um empuxo superior a seu próprio peso e à potência que seu trem de força pode desenvolver. Várias condições do terreno e do solo na obra limitam a capacidade do trator para usar seu peso e sua potência.

A Figura 27 apresenta as principais lâminas de tratores de esteiras aplicadas no mercado, conforme sua aplicação: produção, propósito geral ou especial.

Figura 27 - Principais lâminas utilizadas no mercado.



Fonte: Manual de Desempenho Caterpillar, 2011.

Existem outras lâminas no mercado, conforme a aplicação desejada, as quais não serão tratadas nesta dissertação.

Outros implementos podem ser adaptados ao trator de esteiras, como, por exemplo, o escarificador ou “ripper”, montado na sua parte traseira.

Figura 28 - Trator com Lâmina e escarificador.



Fonte: Apresentação Tratores de Esteira – Sotreq/Caterpillar – Janeiro/2012.

Consta de um ou mais dentes reforçados, providos de pontas cortantes, utilizadas para romper os solos muito compactos, inclusive os de segunda categoria, para depois serem transportados por uma lâmina comum.

A operação de escarificação pode também aumentar a produtividade dos tratores de esteira, pois facilita a penetração da lâmina durante o transporte do material.

Dispõe da ação de pistões hidráulicos que forçam os dentes sobre o solo, aumentando a eficiência do implemento (penetração).

### 2.3.5 Estimativa de produção dos tratores de esteiras

- Produtividade dos tratores de esteira

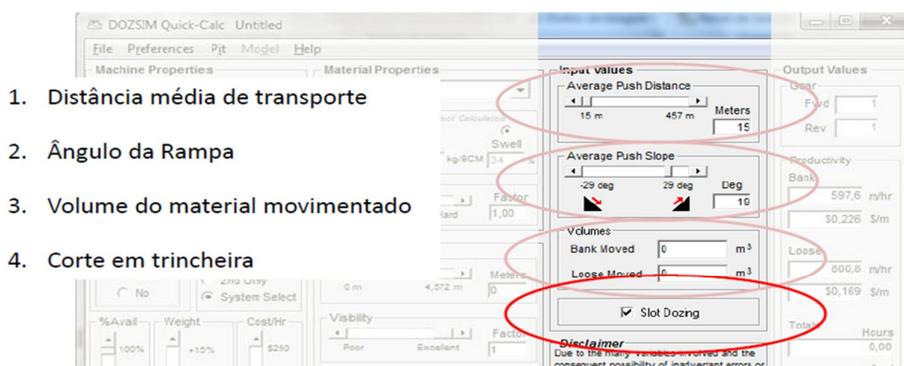
A estimativa de produção dos equipamentos de terraplanagem não é um processo preciso, pois além de depender de diversos parâmetros de difícil determinação ainda existem outros fatores aleatórios que influenciam de forma decisiva no desempenho das máquinas.

Assim, para os cálculos de estimativa de produção, somos obrigados a recorrer, muitas vezes, a julgamentos ou opiniões pessoais baseadas em experiências anteriores para a obtenção de resultados corretos, se comparados posteriormente com a realidade. Então, o histórico da produção e o acompanhamento rigoroso da aplicação destes equipamentos, se tornam fundamentais no correto dimensionamento dos mesmos.

Deve-se ressaltar que, se utilizarmos os processos de cálculo indicados nesta dissertação, corrigidos quando necessário pela experiência anterior, chegaremos a resultados muito próximos da realidade. Também utilizaremos os “softwares” da Caterpillar do Brasil para fazermos as estimativas de produção e custo, para tratores de esteira, utilizaremos o DOZSIM e para os equipamentos de transporte, utilizaremos o FPC.

DOZSIM Software - Ferramenta da CAT que simula a produtividade de Dozers (Tratores de esteiras e pneus). Este software contempla parâmetros como perfil, distância de transporte, eficiência do operador, influência da disponibilidade e características do material a ser movimentado.

Figura 29 - Variáveis de entrada - DOZSIM Software.



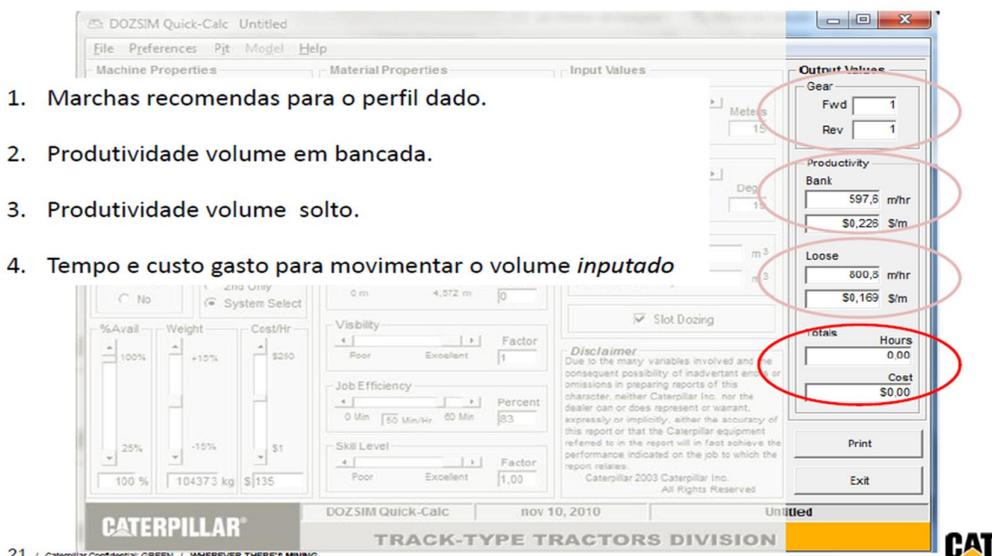
O corte em trincheira pode aumentar a produtividade em média 5%.

- Aprisiona material e minimiza a força de corte para manter a lâmina cheia.
- Diminui o espalhamento do material pelos lados da lâmina.



Fonte: Apresentação DOZSIM Software, Caterpillar, 2012.

Figura 30 - Variáveis de saída - DOZSIM Software.

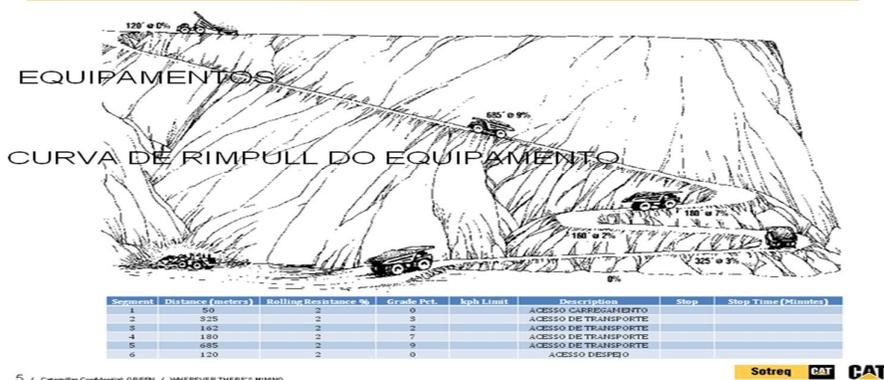


Fonte: Apresentação DOZSIM Software, Caterpillar, 2012.

*Fleet Production and Cost Analysis (FPC) Software* - Ferramenta da CAT que contempla a curva de retardo e *Rimpull* de todos os equipamentos de transporte e máquinas de carregamento, com objetivo de simular tempos de ciclo, produtividade e a influência de parâmetros como distância de transporte, eficiência do operador, utilização física, disponibilidade, resistência ao rolamento e declividade do terreno. Com esta ferramenta é possível identificar a frota ideal para determinada movimentação de material e quais os parâmetros podem oferecer a melhor relação em termos de produtividade.

Figura 31 - Variáveis de entrada (FPC).

#### INPUT – PERFIL DA DIST MEDIA DE TRANSPORTE



Fonte: Apresentação FPC Software, Caterpillar, 2012.

Figura 32 - Variáveis de saída (FPC).

Hauler Cycle Time		Loader Cycle Time	
1793F LASR		1793F LASR	
Load with Exchange (Min)	4.30	Loader Model (CM)	994HL
Haul (Min)	5.70	Loader Quantity (CM)	1
Dump and Maneuver (Min)	1.00	Bucket Capacity (CM)	17.53
Return (Min)	0.25	Loader Fill Factor (%)	100.00
Potential Cycle Time (Min)	11.24	Loose Density (Mtons/CM)	2.373
Wait on Slow Hauler (Min)	0.00	Mtons per Pass	41.73
Wait to Load (Min)	0.00	System Passes per Hauler	6.00
Additional Bunching (Min)	0.00	Hauler Payload (Mtons)	250.38
Wait to Dump (Min)	0.00	% of Max GVW	105.25
TMPH Wait (Min)	0.00	Hauler Volume (LCM)	105.51
Total Cycle Time (Min)	11.24	% of Body Fill	62
Bunching	0.00	Loader Cycle Time (Min)	0.70
Haul Start kph	0.00	Fast Bucket Dump (Min)	0.10
Haul End kph	0.00	Hauler Exchange Time (Min)	0.70
Return Start kph	0.00		
Return End kph	0.00		

Caterpillar Confidential: GREEN / WHEREVER THERE'S MINING

Sotreq CAT CAT

Fonte: Apresentação FPC Software, Caterpillar, 2012.

As máquinas de terraplanagem executam em seu trabalho quatro operações básicas, que podem ocorrer em sequência ou, às vezes, com simultaneidade parcial, a saber:

- escavação ou corte;
- carga lâmina;
- transporte;
- descarga e espalhamento.

Há alguns equipamentos que realizam todas essas operações básicas. Como exemplo podemos citar o trator de esteiras que executa as três primeiras simultaneamente para, em seguida, descarregar e espalhar o material escavado. Há outros, porém, que apenas efetuam parte das operações indicadas. As unidades escavocarregadeiras, como a própria designação indica, apenas executam as duas primeiras. Para completar as outras duas operações, temos que empregar outro equipamento independentemente: a unidade transportadora.

### 2.3.5.1 Tempos e movimentos elementares: Ciclo e tempo de ciclo

O trabalho dos equipamentos de terraplanagem, feito através das citadas operações básicas, se repete através do tempo, de forma cíclica, isto é, termina uma sequência de operações, inicia-se a seguinte, na mesma ordem anterior. As quatro operações básicas constituem, pois, um ciclo de operações que se repete num certo espaço de tempo.

Ciclo é o conjunto das operações que um equipamento executa num certo lapso de tempo, voltando, em seguida, à posição inicial para recomencá-las. Tempo de ciclo é o

intervalo decorrido entre duas passagens consecutivas da máquina por qualquer ponto do ciclo. Convencionou-se que o tempo de ciclo seja medido a partir do instante em que o equipamento inicia a escavação até o momento em que retorna a essa posição inicial. É claro que a fixação do início da medida do tempo de ciclo é arbitrária, e poderia ser feita em qualquer fase do ciclo. Analisando-se as quatro operações básicas que constituem o ciclo, verifica-se que este pode ser decomposto numa sequência de movimentos elementares repetidos através dos ciclos consecutivos.

A esses movimentos elementares correspondem tempos elementares que podem ser observados e medidos num grande número de ciclos. Será possível, então, aplicar os métodos de simplificação do trabalho idealizados por Taylor, analisando-se cuidadosamente os movimentos e tempos elementares em que pode ser decomposto o ciclo de operação para se tentar a eliminação dos tempos de parada desnecessários, também chamados tempos parasitas, que aumentam o período de ciclo reduzindo, em consequência a produtividade.

Observando-se os tempos elementares num grande número de ciclos, verifica-se que alguns deles se mantêm mais ou menos constantes para um determinado tipo de equipamento, enquanto outros são muito variáveis, pois dependem diretamente das distâncias percorridas. Os primeiros são denominados tempos fixos ( $t_f$ ) e os outros tempos variáveis ( $t_v$ ).

Entre os tempos fixos temos os tempos de carga, descarga e manobras, por serem constantes, independentemente das distâncias percorridas, num grande número de ciclos repetidos. Os tempos variáveis são tempos de transporte carregado ou vazio (retorno), que dependem essencialmente das distâncias percorridas.

### ***2.3.5.2 Tempos de ciclo mínimo e efetivo***

Tempo de ciclo mínimo é a somatória de todos os tempos elementares, de que resulte o menor tempo de ciclo, em que a tarefa pode ser executada.

Tempo de ciclo mínimo.

$$t_{c \min} = \sum t_f + \sum t_v \quad (8)$$

Tempo de ciclo efetivo é aquele gasto realmente pelo equipamento para executar o ciclo de operação, computados os tempo de parada ( $t_p$ ) que ocorrem necessariamente no decurso de muitos ciclos.

$$t_{cef} = \sum t_f + \sum t_v + \sum t_p \text{ ou}$$

$$t_{cef} = t_{c \min} + \sum t_p \quad (9)$$

Tempo disponível é o tempo em que temos o equipamento a nossa disposição para executar a tarefa no prazo, ou seja, o turno de trabalho diário, mensal ou periódico qualquer fixado. É importante assinalar que só os tempos de parada que ocorrem durante o período de trabalho são considerados no tempo de ciclo efetivo.

### 2.3.5.3 Produção de um equipamento

Produção do equipamento (Q) é o volume escavado, transportado e descarregado na unidade de tempo, representado pelo produto do volume solto da lâmina (C), pelo número de ciclos (f) efetuados na unidade de tempo (frequência).

$$Q = C \times f \quad (10)$$

Mas a frequência, sendo o inverso do período – tempo de ciclo, no caso -, temos:

$$f = \frac{1}{t_c}$$

$$Q = C \times \frac{1}{t_c} \quad (11)$$

A produção máxima ou teórica do equipamento seria:

$$Q_{\max} = C_{\max} \times \frac{1}{t_{c \min}} \quad (12)$$

A produção efetiva seria:

$$Q_{ef} = C_{\max} \times \frac{1}{t_{cef}} \quad (13)$$

#### 2.3.5.4 Rendimento da operação ou fator de eficiência

Chama-se rendimento da operação ou fator de eficiência (E) à relação:

$$E = \frac{Q_{ef}}{Q_{\max}} \quad (14)$$

Temos, porém:

$$E = \frac{C_{\max} \times \frac{1}{t_{cef}}}{C_{\max} \times \frac{1}{t_{c\min}}} = \frac{t_{c\min}}{t_{cef}} \quad (15)$$

Portanto, o rendimento da operação seria a relação, em geral inferior à unidade, entre o tempo de ciclo mínimo e o de ciclo efetivo.

$$E = \frac{t_{c\min}}{t_{cef}} = \frac{t_{c\min}}{t_{c\min} + \sum t_p}$$

Ou

$$E = \frac{1}{1 + \frac{\sum t_p}{t_{c\min}}} \quad (16)$$

Assim o rendimento dependerá dos valores assumidos pelos tempos de paradas  $Stp$ :

- se  $Stp = 0$ , teremos  $E = 1$  ou 100% e o tempo de ciclo seria mínimo ( $t_{c\min}$ ).
- se  $Stp \neq 0$ , teremos  $E < 1$  ou 100% e o tempo de ciclo seria o efetivo ( $t_{cef}$ ).

Portanto, o rendimento da operação é afetado diretamente pelos tempos de paradas, concluindo-se que o aumento de produção será conseguido pela diminuição destes. Daqui em diante, sempre nos referiremos à produção efetiva, que é aquela que realmente nos interessa na prática. Ela é, em geral, expressa em volume medido no corte, com sua massa específica natural ( $\gamma_n$ ), porque a terraplanagem normalmente é paga pelo volume geométrico do corte.

### **2.3.5.5 Fórmula básica da produção de um equipamento**

Expressão que indica a produção de qualquer máquina de terraplanagem:

$$Q_{ef} = C \times \varphi_1 \times \frac{1}{t_{cmin}} \times E \quad (17)$$

Onde

$Q_{ef}$  = produção efetiva, medida no corte ( $m^3/h$ );

$C$  = capacidade da caçamba ou lâmina, em volume solto ( $m^3$ );

$\varphi_1$  = fator de empolamento ou de conversão de volumes;

$t_{cmin}$  = tempo de ciclo mínimo (horas ou minutos ou segundos);

$E$  = coeficiente de rendimento da operação ou fator de eficiência.

As unidades mais empregadas são:

### **2.3.5.6 Aumento de produtividade**

Analisando-se a fórmula básica da produção de um equipamento, tendo em vista o aumento da produtividade, verificamos que existem três parâmetros que influem na produção:

Capacidade da caçamba ou lâmina: É evidente que para conseguir maior produção, haverá necessidade do enchimento total da lâmina e tipo de lâmina, desde que a carga total não ultrapasse a carga máxima prevista pelo fabricante.

Tempo de ciclo mínimo: Outro fator que, será visto e que influi na produção dos tratores de esteira é o tempo de ciclo mínimo, consistindo na soma dos tempos fixos e dos variáveis. Estes dependerão das distâncias percorridas. Entretanto, para que seja realmente mínimo, é necessário que não haja paradas e que os movimentos elementares que o constituem sejam executados com a menor duração possível, correspondendo às velocidades máximas desses equipamentos.

Assim, qualquer movimento elementar como escavação, descarga, transporte etc., que não seja executado dentro de tempos considerados mínimos, ou seja, com velocidades menores do que as consideradas ideais, significará uma pequena perda de tempo que poderia ser evitada, correspondendo a um pequeno tempo de parada parasita. Desde que os movimentos elementares sejam efetivamente executados com os tempos elementares mínimos, o tempo de ciclo será mínimo, resultando em produção máxima.

Coeficiente de rendimento ou fator de eficiência E.

Este é o parâmetro da fórmula geral de produção, que pode ser afetado de forma mais direta pelo supervisor da obra, no sentido de aumento da produção, ao contrário do que ocorre nos dois fatores citados anteriormente, nos quais a influência daquele é menos expressiva.

O coeficiente de rendimento ou fator de eficiência exprime, em última análise, a relação entre o número de horas efetivamente trabalhadas e o número de horas que o equipamento ficará à disposição da obra para a execução de uma tarefa, ou seja, o turno de trabalho admitido.

$$E = \frac{\text{n}^\circ \text{ de horas de trabalho efetivo do equipamento}}{\text{n}^\circ \text{ de horas disponíveis do equipamento}} \quad (18)$$

Sabe-se que uma máquina poderá executar certo número de ciclos, durante algumas horas, sem que haja paradas. Entretanto, com o decorrer do tempo, haverá forçosamente o aparecimento de paradas provenientes de causas as mais diversas, de maneira que, na realidade e desde que o número de horas de observação seja grande, teremos sempre  $E < 1$ .

Entre as inúmeras causas de parada, a grande maioria é facilmente identificável:

- a) defeitos mecânicos do equipamento;
- b) más condições meteorológicas (chuvas e visibilidade);
- c) más condições do solo – piso inconsistente ou escorregadio;
- d) falta de habilidade ou imperícia do operador, acidentes;
- e) organização deficiente dos serviços;
- f) esperas devidas a outros equipamentos ou interferências com outras atividades;
- g) tipo de equipamento.

Trata-se, evidentemente, de fatores totalmente aleatórios que exercem individualmente influência negativa no desempenho dos equipamentos, mas que só podem ser levados em conta de forma global. Para condições normais, com esses fatores adversos, admite-se que,

para máquinas de esteiras, em cada 60 minutos do equipamento à disposição temos 50 minutos de trabalho efetivo, ou seja:

$$E = \frac{50}{60} = 0,83$$

Os dados fornecidos pelo manual de produção da Terex-GM oferecem valores diferentes, conforme as condições vigentes classificados em três categorias:

Condições favoráveis: solos poucos compactos; pistas bem conservadas e secas; carga em declive; supervisão constante e eficiente.

$$E = \frac{55}{60} = 0,92$$

Condições médias: solo medianamente compactos; pistas de material solto, secas; carga em nível; supervisão intermitente.

$$E = \frac{50}{60} = 0,83$$

Condições desfavoráveis: Materiais compactos ou muito úmidos; área de operação restrita; pistas úmidas e escorregadias; carga em meia-encosta ou em aclives; supervisão deficiente.

$$E = \frac{40}{60} = 0,67$$

Das considerações até agora feitas, resulta que o fator de eficiência de operação E é fator de suma importância na produção dos equipamentos e, por consequência, no custo dos serviços. Assim, a rentabilidade financeira de uma empresa que se dedica à terraplanagem mecanizada está ligada inteiramente a esse fator E.

A atitude do supervisor da obra pode influir de maneira decisiva no aumento ou diminuição do rendimento global, ao procurar eliminar, na medida do possível, os tempos de parada, reduzindo-os a um mínimo. Por outro lado, a estimativa e adoção do valor E influem

no dimensionamento da equipe a ser determinada para o cumprimento dos prazos dos cronogramas, de maneira que o planejador da obra deve procurar admitir valores realistas baseados na experiência e no bom senso. Caso contrário, muito provavelmente, esses prazos e os custos serão facilmente ultrapassados.

Os principais fatores adversos que influem no fator de eficiência E, são o estado mecânico dos equipamentos e/ou o tempo meteorológico. Posto isto, numa condição onde os equipamentos estejam muito desgastados e/ou estações do ano sujeitas a freqüentes precipitações pluviométricas, os valores médios globais anteriormente indicados podem ser ainda bastante reduzidos.

Como orientação é apresentado a Tabela 1, onde se leva em consideração, simultaneamente, as condições mecânicas dos equipamentos e as de trabalho, resultando em diversos valores de E.

Tabela 1 - Condições de trabalho vs. condição de eficiência mecânica.

Condições de trabalho	Condição de eficiência mecânica			
	Excelente	Boa	Média	Ruim
Excelente	0,84	0,81	0,76	0,7
Boa	0,78	0,75	0,71	0,65
Média	0,72	0,69	0,65	0,6
Ruim	0,63	0,61	0,57	0,52

Fonte: Sales Promotion Manual – Construction Machinery, boletim da “Komatsu Ltd. – Tokyo – Japan”.

Constata-se que os fabricantes admitem como valor máximo de  $E = 0,83$  ou  $E = 50/60$ , que corresponde ao trabalho efetivo de 50 minutos para cada hora (ou 60 minutos) disponíveis de operação.

$$E = \frac{50}{60} = 0,83$$

Essa perda de 10 minutos por hora corresponde a tempos de parada considerados inevitáveis, causados por diversos fatores:

- a) paradas devidas ao operador do equipamento;
- b) espera por outros equipamentos em ciclos combinados;
- c) manobras indispensáveis (posicionamento);
- d) movimentação dentro da obra;
- e) troca de turno, execução de verificações de rotina;

- f) aguardo (espera) para início da operação ou aguardando ordens.

Nessa perda de 10 minutos não estão computados as paradas para manutenção em oficina ou a paralisação devido à chuva. Os valores decrescentes da tabela são devidos as paradas para manutenção que são aleatórios ou paradas devidas à chuva e suas conseqüências. Neste último caso, pode-se avaliar o efeito no desempenho da obra, pelo conhecimento prévio de fatores locais, isto é, a precipitação pluvial mensal, em mm, obtida dos órgãos meteorológicos, para qualquer região do país.

Segundo Barros (1996), pesquisas levadas a efeito, em obras de campo, mostram a influência dessas precipitações no desempenho da produção da obra, ao longo dos diversos meses do ano, a saber:

- a) chuvas até 100mm mensais afetam E em até 15% de paradas;
- b) chuvas de mais de 200mm mensais afetam E em mais de 50%;
- c) chuvas entre 100 e 200mm: a paralisação pode ser admitida como proporcional aos valores acima indicados;
- d) as chuvas até 5mm por dia não interferem na produção.

Para melhor interpretação dos resultados, convém indicar as condições gerais de trabalho existentes:

- a) topografia acidentada com rampas muito variáveis;
- b) variedade de solos, incluindo-se os saturados;
- c) regime de chuvas com grandes precipitações durante meses de verão;
- d) região povoada e com estabelecimentos industriais;
- e) grande número de interferências: redes elétricas, adutoras, travessias de vias locais;
- f) numerosas obras de drenagem superficial e subterrânea;
- g) liberação dos trechos por etapas.

Pode-se constatar as seguintes observações:

- 1) as elevadas perdas resultantes de problemas administrativos, devidos provavelmente à presença das interferências locais mencionadas, mas podem ser menores ou mesmo inexistentes em outras condições de trabalho;

2) as paradas devidas às chuvas e/ou solos úmidos e às condições de eficiência mecânica dos equipamentos têm grande influencia no desempenho produtivo das máquinas, respondendo por cerca de 30 a 40% dos tempos ociosos das equipes.

Nota-se que nas paradas mecânicas, as maiores esperas eram devidas à demora na aquisição de peças de reposição, fato que normalmente não é mencionado entre as causas de paralisação dos equipamentos. Esse fato demonstra a importância dos almoxarifados nas obras e do setor de aquisição de peças de reposição.

A conclusão mais importante é que, na ausência de dados próprios obtidos da experiência de cada um, constata-se a necessidade da adoção de fatores de eficiência mais baixos do que os normalmente indicados nos manuais, especialmente quando se trata de obras de longa duração ou quando os trabalhos forem executados em plena estação chuvosa.

Otimização da produtividade:

As operações do ciclo de terraplanagem podem ser encaradas sob o aspecto do estudo de tempos e movimentos (“motion – time study”), no sentido de se conseguir economia ou maior velocidade nos movimentos indispensáveis.

Assim, podem ser estabelecidos alguns princípios gerais para o aumento e otimização da produtividade dos equipamentos (tratores):

1) aproveitar, sempre que possível, a existência de rampa, quer na escavação, que na fase transporte, para aumentar a velocidade do equipamento, com economia da potência consumida na operação (economia de combustível);

2) utilizar, de preferência, velocidades constantes em trechos retos para eliminar as resistências de inércia. Com a mesma finalidade, evitar as acelerações e desacelerações bruscas, que consomem energia e, portanto, combustível;

3) quando houver ciclos combinados de duas máquinas, haverá a necessidade de se operar dentro da condição de sincronismo, para que se eliminem esperas desnecessárias; as unidades básicas, das quais depende a produção (trator), devem ser máquinas bem dimensionadas à tarefa e, sobretudo, em bom estado mecânico, para não interferirem na produção, que poderá ser paralisada em caso de sua falta temporária.

### ***2.3.5.7 Estimativa de produção dos tratores de esteiras***

Para o cálculo da produção de qualquer equipamento deve-se determinar o tempo de ciclo que, por sua vez, depende das velocidades desenvolvidas em qualquer trecho do trajeto. A determinação das velocidades será sempre feita na condição  $\sum R - m\gamma = 0$ , que corresponde

a velocidade uniforme e máxima. Isso ocorre quando o conjugado motor  $C_m$  é igual ao conjugado resistente  $C_r$  ( $C_m = C_r$ ).

Segue demonstração do enunciado acima:

O movimento de um equipamento que se desloca para a frente em trajetória retilínea, sobre terreno plano, não necessariamente horizontal, obedece à segunda lei de Newton, e temos:

$$E_r - \sum R = m\gamma$$

$E_r$  = esforço trator na roda motriz

$\sum R$  = somatório das resistências opostas ao movimento

$m$  = massa da máquina

$\gamma$  = aceleração

Três hipóteses podem ocorrer:

1)  $E_r - \sum R = m\gamma > 0 \quad \gamma = dv/dt > 0$  aceleração

2)  $E_r - \sum R = m\gamma = 0 \quad \gamma = dv/dt = 0$  velocidade uniforme e máxima

3)  $E_r - \sum R = m\gamma < 0 \quad \gamma = dv/dt < 0$  desaceleração

Na hipótese 1:  $\gamma = dv/dt > 0$  temos a aceleração da máquina com aumento da velocidade.

Na hipótese 2:  $\gamma = dv/dt = 0$  a velocidade será constante (movimento uniforme) e atingirá o valor máximo ( $V_{max}$ ) e temos:

$$E_r - \sum R = 0$$

$$E_r = \sum R$$

Conclui-se que o movimento uniforme ocorre quando os esforços resistentes igualam às forças motrizes, isto é, o conjugado motor é igual ao conjugado resistente ( $C_r = C_m$ ).

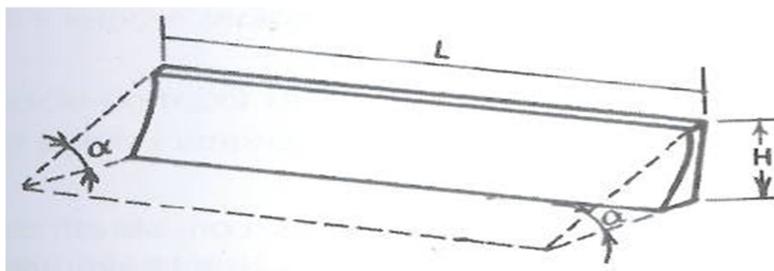
Na hipótese 3 as forças resistentes superam as forças motrizes e teremos a desaceleração do trator (ou frenagem).

Para a estimativa de produção de um trator provido de lâmina, usa-se a fórmula básica já citada anteriormente.

$$Q = C \times \frac{1}{t_{c\min}} \times E \quad (19)$$

Haverá a necessidade de se calcular a capacidade da lâmina, ou seja, a quantidade de terra solta acumulada a sua frente, após o corte.

Figura 33 - Elementos que influem na capacidade da lâmina.



Fonte: Ricardo e Catalani, 2007.

Será também, estimado o tempo de ciclo mínimo gasto pelo trator para escavar, transportar e descarregar o material.

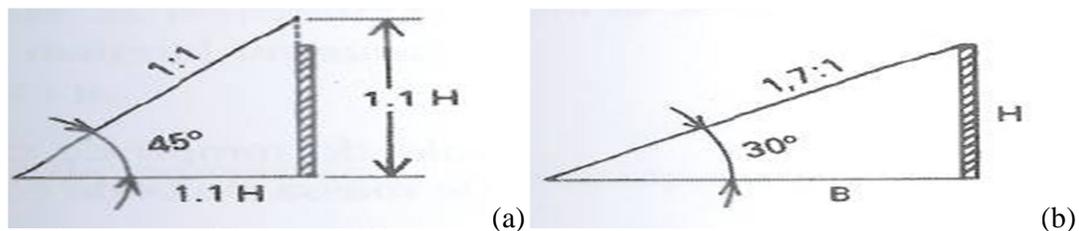
- Determinação de capacidade solta da lâmina:

Para se avaliar a capacidade de uma lâmina de largura  $L$  e altura  $H$ , há vários processos aproximados.

Entretanto, qualquer que seja o material, será preciso que se conheça, ainda que aproximadamente, o ângulo de talude natural do material solto  $\alpha$ .

Para solos argilosos, teremos  $\alpha = 45^\circ$  ou 1:1. Para solos arenosos, admite-se que  $\alpha = 30^\circ$  ou 1,7:1.

Figura 34 - Ângulo de talude natural para solos argilosos e arenosos, respectivamente.



Fonte: Ricardo e Catalani, 2007.

$$H/B = \operatorname{tg} 30^\circ = 0,58 \text{ ou } B = H/0,58$$

$$C = V = H/0,58 \cdot H/2 \cdot L = 0,86 H^2L$$

$$C = 0,86 H^2L \text{ (solos arenosos)}$$

Para solos argilosos: Neste caso, a altura do volume de terra pode superar a altura H da lâmina em 10%, em razão da coesão do material.

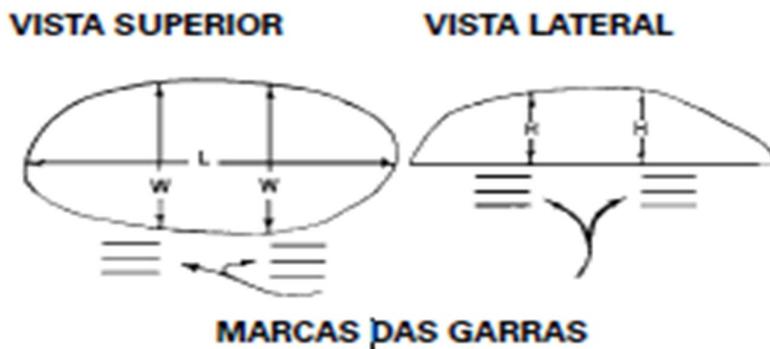
$$C = (1,1 H)^2/2 = 0,6 H^2L$$

$$C = 0,6 H^2L \text{ (solos argilosos)}$$

Outro processo bastante prático, e de resultados mais corretos, consiste em escavar uma carga completa da lâmina, levando-a uma área plana. Em seguida, levanta-se a lâmina, empurrando o material.

Isso formará um montículo de terra com a forma em planta e perfil abaixo representados.

Figura 35 - Estimativa da capacidade da lâmina.



Fonte: Manual de Desempenho Caterpillar, 2011.

Faz-se a medida de diversas espessuras e alturas procurando-se as médias:

$$W = (W1 + W2) / 2$$

$$H = (H1 + H2) / 2$$

Tem-se:

$$C = \frac{3}{8} W \times H \times L \text{ (solto)} \quad (20)$$

- Determinação do tempo de ciclo mínimo

Em corte e aterro, feitos com trator de lâmina, a máquina executa inúmeras operações de corte, transporte e espalhamento do material, com distâncias de transporte muito diferentes, desde as mais curtas até as mais longas. Os tempos variáveis de ida e retorno são calculados em função dessa distância média  $D$ . Durante o ciclo do trator de lâmina, isto é, durante a escavação, transporte e descarga (espalhamento), os esforços tratores para vencer as resistências opostas ao movimento são bastante desiguais.

O ciclo pode ser dividido em três partes:

- Escavação ou corte

Nesta fase as resistências oferecidas ao deslocamento da máquina são provenientes do corte do material pela faca da lâmina e dos atritos que ocorrem entre as partes da máquina e o solo, bem como da própria carga de material que se acumula à frente da lâmina.

Essas resistências, elevadas e difíceis de serem quantificadas, serão contrabalançadas pelo esforço trator (ou torque) das rodas motrizes. Entretanto, há a limitação do esforço trator máximo pela condição de aderência, isto é, se as forças ativas que impulsionam a máquina superam a força de aderência entre as esteiras e o terreno, estas irão patinar, prejudicando ou até impossibilitando o movimento da máquina.

Assim o esforço trator que pode ser aplicado à esteira será:

$$E_{\text{máx}} \leq f \cdot P_m$$

Onde:

$f$  = coeficiente de aderência entre as sapatas da esteira e o solo;

$P_m$  = peso aderente =  $P_t$  = peso total da máquina;

$E_{\text{máx}}$  = esforço trator máximo aplicado sem patinamento.

Em terra solta temos  $f = 0,60$ . Para o solo natural, ainda não escavado, o valor pode chegar a 0,90. Assim, um valor médio razoável pode ser estabelecido em  $f = 0,70$ .

Pode-se então determinar  $E_{\text{máx}}$  e, com esse valor, indicar a velocidade de escavação pelo diagrama tração x velocidade. A distância percorrida pelo trator para escavar e carregar a lâmina é em média 15m, o que permite calcular o tempo de carga. Normalmente usa-se a 1ª marcha, que produz os esforços tratores elevados, compatíveis com as altas resistências presentes durante o corte.

$$t_{carga}^{(min)} = \frac{15^m}{V_{1a}^{(m/min)}} \quad (21)$$

- Transporte do material

Durante o transporte, concluída a escavação, o material fica solto e a lâmina apenas rasante em relação ao solo, de modo que as resistências diminuem bastante, sendo reduzidas ao atrito de escorregamento da massa de material empurrado sobre o terreno natural, bem como o atrito interno dentro da massa em movimento  $\mu$ .

Esse valor pode ser calculado pela expressão:

$$C \cdot \gamma_s \cdot \mu = P_t \cdot f \quad (22)$$

$$\mu = \frac{P_t \cdot f}{C \cdot \gamma_s}$$

Onde:

C = capacidade da lâmina em volume solto;

$\gamma_s$  = massa específica do solo solto;

$\mu$  = coeficiente de atrito da carga;

$P_t$  = peso total do máquina;

f = coeficiente de aderência;

k = coeficiente de rolamento.

Em termos práticos, é avaliado em 1,3 t/t e a resistência oferecida no transporte será:

$$\sum R = C \cdot \gamma_s \cdot \mu + k P_t$$

A velocidade da máquina ao empurrar o material (transporte) ( $v_{tr}$ ) será também determinada pelo diagrama do esforço trator x velocidade e o tempo de transporte será:

$$t_{transp} = \frac{D - 15^m}{V_{tr}} \quad (23)$$

Sendo D a distância média de transporte.

- Retorno da máquina sem carga

As resistências opostas ao movimento na volta do trator seriam

$$\sum R = P_t (k + 10 i) = E_r$$

Onde:

K = coeficiente de rolamento do trator;

P<sub>t</sub> = peso total do trator;

i = rampa (active).

A velocidade retorno, v<sub>r</sub> será calculada pelo diagrama tração x velocidade e o tempo gasto;

$$t_r = \frac{D}{V_r} \quad (24)$$

t<sub>r</sub> = tempo de retorno;

D = distância média de transporte;

V<sub>r</sub> = velocidade retorno.

Assim os tempos variáveis totais seriam:

$$\sum t_v^{(min)} = t_{carga} + t_{transp} + t_{ret} = \left[ \frac{15^{(m)}}{V_{1a} (km/h)} + \frac{(D - 15)^{(m)}}{V_t (km/h)} + \frac{D^{(m)}}{V_r (km/h)} \right] \times 0,06 \quad (25)$$

Sendo t<sub>v</sub> = em minutos

D em metros

V em km/h

0,06 fator de unidades

O tempo de ciclo mínimo, somando-se os tempos fixos, será:

$$t_{min} = \sum t_f + t_{carga} + t_{transp} + t_{retorno}$$

Os tempos fixos referem-se a duas mudanças de direção (reversão) e duas mudanças de marchas, de avante à ré e vice-versa.

Para tratores com transmissão mecânica, adota-se  $\sum t_f = 0,3$  min e para transmissão “Power-shift” = 0,05 min.

Os tempos de ciclo devem ser calculados para o trajeto em nível, ou seja, terreno horizontal. Quando o equipamento trabalha em declives aparece, a assistência de rampa, que impulsiona a máquina fornecendo-lhe um esforço trator adicional que, evidentemente, tende a incrementar a produção pelo aumento do volume transportado pela lâmina. Por outro lado, a velocidade de retorno diminuirá, já que a máquina nessa situação deverá vencer a resistência da rampa, o que significa maior tempo de ciclo e, em consequência, menor produção.

A experiência mostra que o aumento de volume escavado supera a perda de produção, o que fica patente na tabela de correção da produção em função do declividade, pois com o aumento desta, a produção cresce até a rampa de 30%, permanecendo quase invariável a partir desse ponto.

Tabela 2 - Incremento de produção - Manual de Produção Caterpillar.

Rampa média (%)	Incremento da produção ( $\Delta Q$ )
0	1
5	1,07
10	1,12
15	1,18
20	1,22
25	1,25
30	1,26

Fonte: Ricardo e Catalani, 2007.

### Cálculo da produção

#### 1º Processo

Para calcular-se a produção de um equipamento de lâmina, trabalhando em rampa favorável, procede-se à estimativa normal ( $i=0$ ) e, em seguida, aplica-se o incremento de produção.

#### 2º Processo

Pode-se estimar a produção determinando-se as velocidades durante a escavação, o transporte e o retorno vazio pelas fórmulas anteriormente enunciadas.

#### 3º Processo

Para estimativas de produção menos precisas, mas válidas para qualquer trator de lâmina, é usado o gráfico a seguir e que mostra o aumento do tempo de ciclo com a distância e aumento da rampa:

As tabelas foram organizadas com as seguintes hipóteses de cálculo:

- duas mudanças de marchas:  $t = 0,20$  min;
- velocidade avante (primeira marcha):  $v = 1,9$  km/h;
- velocidade retorno:

Tabela 3 - Rampa VS velocidade

Rampa média (%)	velocidade (km/h)
0	10,6
+10	9,0
+20	7,8
+30	5,3
+40	4,2

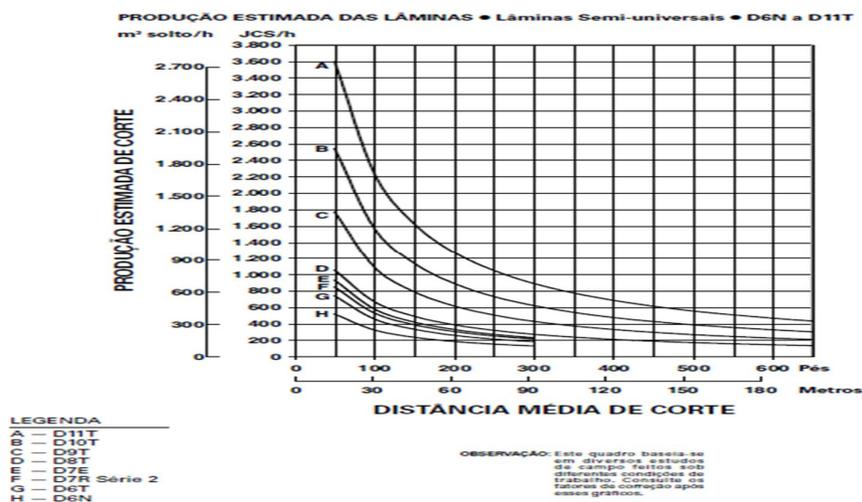
Fonte: Ricardo e Catalani, 2007.

Este processo aplica-se para estimativas de anteprojeto, onde se deseja a ordem de grandeza da produção sem grande precisão.

No caso de desejarem-se valores mais rigorosos, recomenda-se o uso do 2º processo.

A seguir é apresentada a estimativa de produção dos tratores de esteira da Caterpillar com lâmina SU – D6N a D11T.

Figura 36 - Produção ( $m^3/h$ ) x distância (m).



Fonte: Manual de Desempenho Caterpillar, 2011.

Este gráfico está baseado em inúmeros estudos de campo e sob variadas condições de trabalho. A produção de um trator de lâmina Caterpillar pode ser calculada através das curvas de produção e dos fatores de correção que serão apresentados:

$$Q_{ef} \text{ (m}^3\text{/h)} = Q_{m\acute{a}x} \times \text{fatores de corre\c{c}\~{a}o}$$

As curvas fornecem a produ\c{c}\~{a}o m\acute{a}xima para as l\~{a}minas reta (l\~{a}mina S) e universal (l\~{a}mina U) e s\~{a}o baseadas nas seguintes hip\~{o}teses:

- fator de efici\~{e}ncia  $E = 100\%$  ( $Q_{m\acute{a}x}$ );
  - tempos fixos para m\~{a}quinas com transmiss\~{a}o “Power-shift” = 0,05 min;
  - a m\~{a}quina preenche a l\~{a}mina em 15 m, em seguida empurra a carga para despej\~{a}-la com tempo de descarga igual a 0;
  - densidade do solo  $\gamma_s = 1,37 \text{ m}^3$  (empolado);
  - coeficiente de tra\c{c}\~{a}o (esteiras): 0,5 ou mais;
  - l\~{a}mina de comando hidr\~{a}ulico;
  - marchas: de escava\c{c}\~{a}o: 1<sup>a</sup> avante, empurramento: 2<sup>a</sup> avante, retorno: 2<sup>a</sup> \~{a} r\~{e}.
- Fatores de corre\c{c}\~{a}o das condi\c{c}\~{o}es de trabalho:

Tabela 4 - Fatores de corre\c{c}\~{a}o.

<b>Operador</b>	
Excelente	1,00
Regular	0,75
Fraco	0,60
<b>Material</b>	
Solto	1,20
Penetra\c{c}\~{a}o dif\~{i}cil com:	
L\~{a}mina inclin\~{a}vel com cilindro hidr\~{a}ulico	0,80
L\~{a}mina inclin\~{a}vel sem cilindro hidr\~{a}ulico	0,70
Corte em caix\~{a}o (trincheira)	1,20
Opera\c{c}\~{a}o lado a lado	1,15 - 1,25
<b>Visibilidade e efici\~{e}ncia operacional</b>	
P\~{o}, chuva ou neblina	0,80
fator de efici\~{e}ncia 50/60	0,84
fator de efici\~{e}ncia 40/60	0,67
<b>Recursos do equipamento</b>	
Transmiss\~{a}o direta	0,80
L\~{a}mina angul\~{a}vel (A)	0,50 - 0,75
L\~{a}mina amortecedora (C)	0,50 - 0,75
L\~{a}mina Reta (S)	1,00
L\~{a}mina (material leve) (U)	1,20

Fonte: Ricardo e Catalani, 2007.

- Incremento de produ\c{c}\~{a}o em declives:  
Consultar Tabela 2, onde \~{e} indicado o aumento de produ\c{c}\~{a}o com a m\~{a}quina operando em declive.

### **3. METODOLOGIA APLICADA - ESTUDO DE CASOS – MINAS DE FERRO DE CARAJÁS**

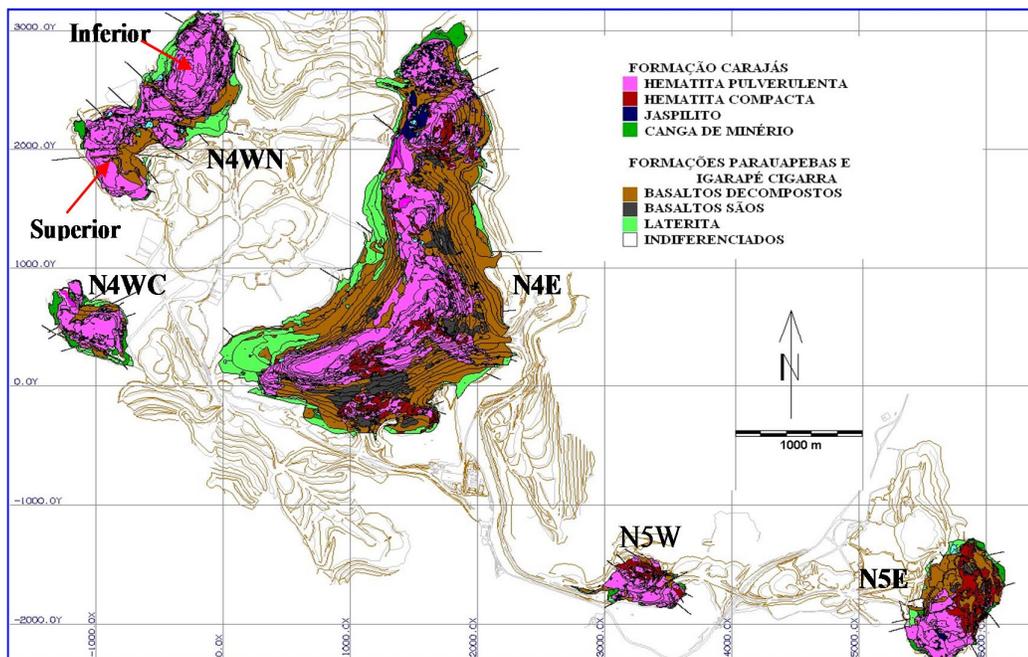
#### **3.1 ESTABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DOS TALUDES**

A Vale em 2007 contratou a empresa Geoestrutural Consultoria e Projetos para fazer os estudos de estabilidade e dimensionamento dos taludes nas minas de ferro em Carajás como é aconselhado pelos especialistas do ramo. A mina de N4E atingirá profundidade de aproximadamente de 500m, e hoje já está com profundidade superior a 300m. Este desafio demanda muito conhecimento e experiência para definir o ângulo de talude geral e o fator de aceitação ou fator de segurança para garantir a operação segura dos equipamentos e das pessoas que trabalham no local.

Este relatório apresentou os estudos de Estabilidade e o Dimensionamento dos taludes da cava de exaustão concebida pela Vale para as minas N4E, situada no complexo das minas de ferro em Carajás, de propriedade da Vale. Neste caso, será apresentado apenas os principais resultados do estudo, tais como: setorização das classes de maciço, análises de estabilidade e critérios de aceitação. Este estudo foi concebido conforme preconizado no estado da arte, capítulo 2.

Em decorrência de a mina N4E estar inserida no mesmo domínio geológico que as minas N4WN-N4WC e N5E, também está afetada por condicionantes similares que ocorrem nessas minas. Dessa forma, como há similaridade geomecânica e hidrogeológica, foi inevitável manter a mesma forma de abordagem, termos descritivos, hipóteses, premissas e considerações similares ao das minas N4WN-N4WC e N5E. A figura 37 ilustra a distribuição espacial das minas de ferro em Carajás, onde se nota a mina N4E.

Figura 37 - Minas de Ferro no complexo Carajás.



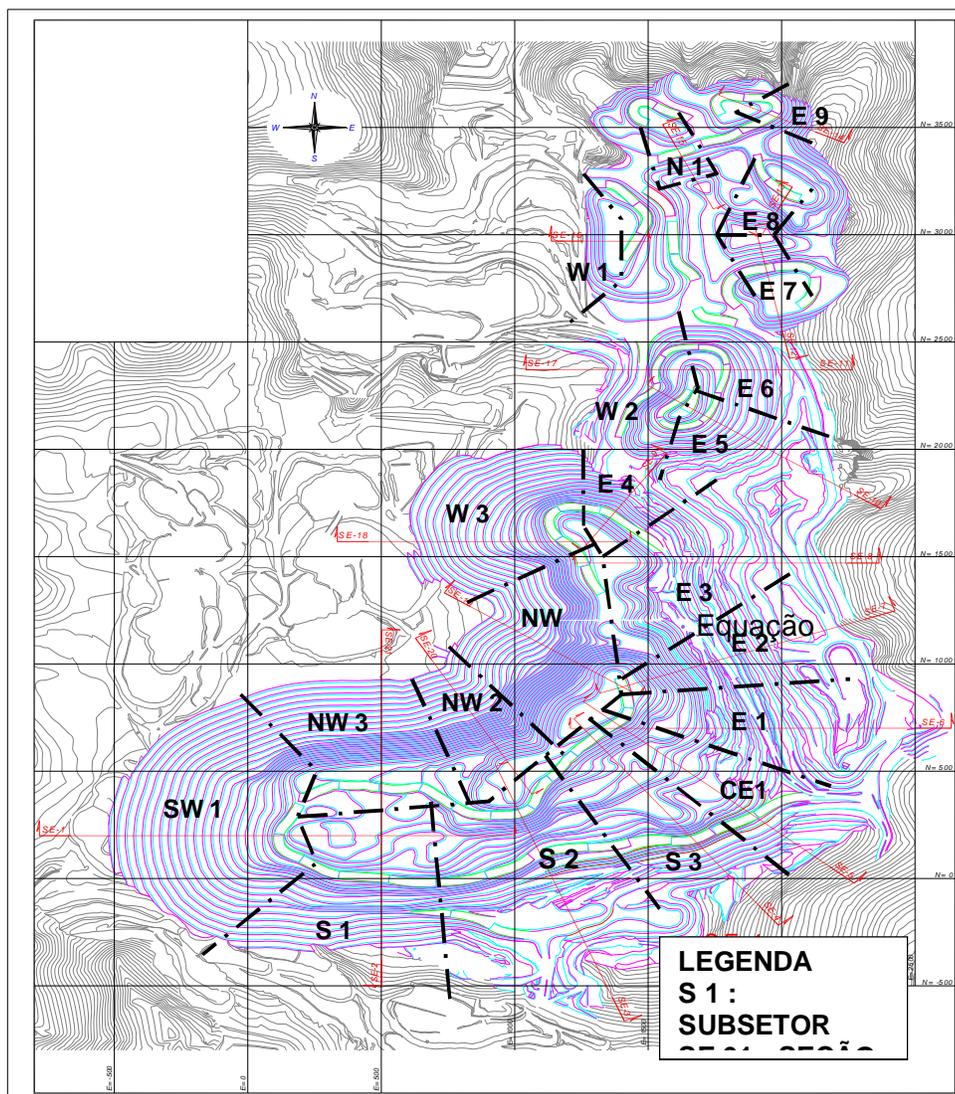
Fonte: Mina N4E – Estudos de Estabilidade – Geoestrutural – Junho 2007

### 3.1.1 Modelo geomecânico

#### 3.1.1.1 Classificação do maciço e setorização

Considerando os atributos gerais admitidos na setorização, quanto ao traçado da cava em planta, porte dos taludes, distribuição dos litotipos e classes, sistema de falhas Embaúbas, condicionantes e mecanismos de ruptura, a cava foi dividida em sete macros setores, designados de Setor Sudeste e Leste (Lapa), Central, Norte, Oeste, Noroeste e Sudoeste (Capa). Visando incorporar particularidades locais, os setores foram divididos em subsetores, referidos por seções típicas e representativas do maciço. A Figura 38 apresenta a distribuição em planta.

Figura 38 - Setorização da Cava – Mina N4E.



Fonte: Mina N4E – Estudos de Estabilidade – Geoestrutural – Junho 2007.

### 3.1.2 Análises de estabilidade

As análises de estabilidade foram executadas para os taludes de bancada e para o talude geral da cava final proposta pela Vale.

#### 3.1.2.1 Talude de Bancada

A geometria do talude dos bancos (altura e inclinação) e a largura mínima da berma operacional condicionam a inclinação máxima do talude geral passível de ser praticada. Esta consideração pode ser visualizada nas relações que constam na Figura 3.

Com base nas premissas definidas, a Tabelas 5 consolida os resultados das análises. Para o mecanismo de ruptura circular foi utilizado o método do equilíbrio limite de Bishop, programa Slide.

Tabela 5 - Resultados das Análises de Bancada.

TALUDE INCL. $\square\square\square$	ALTURA DO BANCO : H = 15 m							
	FATORES DE SEGURANÇA							
	Ruptura Circular					Ruptura Planar		
	Metabásica Classe VI		Hematita Mole Classe VI	Metabásica V    IV		Hematita Laminada Classe V e IV		
	(a)	(b)				$\square\square = 36^\circ$	$\square\square = 40^\circ$	$\square\square = 47^\circ$
40	1,99	1,49	2,33			5,01		
45	1,82	1,33	2,12			2,87	4,06	
50	1,72	<b>1,23</b>	1,97	2,20		2,25	2,52	5,85
60	1,54	<b>1,05</b>	1,76	1,87	2,67	1,75	1,72	1,90
70	<b>1,23</b>		1,36	1,54	2,17	1,53	1,43	1,35
80			<b>1,22</b>	1,35	1,90	1,36 (1,44)	<b>1,24</b> (1,31)	<b>1,10</b> (1,15)

Fonte: Mina N4E – Estudos de Estabilidade – Geoestrutural – Junho 2007.

NOTAS :

(1) Metabásica

- Classe VI

- Coluna (a) : Parâmetro de projeto :  $c = 50 \text{ KPa}$  ;  $\square = 25^\circ$  ;  $\square_{\text{sat}} = 20 \text{ KN/m}^3$

- Coluna (b) : Parâmetro reduzido :  $c = 20 \text{ KPa}$  ;  $\square = 25^\circ$  ;  $\square_{\text{nat}} = 15 \text{ KN/m}^3$

- Classes III e II : Considerado desnecessário executar análise, pois na classe IV foram obtidos fatores de segurança elevados.

- Juntas da família J2 limitam em  $50^\circ$  a inclinação dos taludes nos Setores W1 a W3, NW1 e SW1 em qualquer classe de maciço.

- Para os demais setores da cava, valem os resultados da tabela

(2) Hematita Laminada Classe V e IV

- Mergulho do polo máximo da foliação.

- Resultados válidos para os Setores S2 a S3, CE1, E1 a E4, onde a foliação condiciona mecanismo de ruptura planar.

- ( ) : Resultado entre parênteses se refere à condição drenada, sem água na fenda de tração e no plano basal definido pela foliação.

- Para os demais setores da mina, adotado o resultado da hematita mole classe VI, por conservadorismo.

(3) Hematita Mole Classe VI : Resultados válidos para todos os setores da cava.

(4) Hematita Classe III e II : Considerado desnecessário executar análise, pois na classe VI foram obtidos Fatores de Segurança elevados.

A Tabela 3.1.4 indica que os taludes dos bancos na metabásica classe VI são estáveis até a inclinação de  $60^0$ , quando se trata da envoltória intermediária de resistência ( $2^0$  nível) considerada no projeto. Já, para os taludes dos Subsetores W1 a W3, NW1, SW1 a família secundária de juntas (J2) limita a inclinação do talude dos bancos em  $50^0$ . Para a envoltória reduzida ( $1^0$  nível – deteriorada), o talude de  $60^0$  não é estável. Entretanto, para a envoltória reduzida, o talude de  $50^0$  é considerado aceitável em todos os setores.

### ***3.1.2.2 Talude Geral e critérios de aceitação (fator de segurança - FS)***

A cava final proposta pela Vale foi tomada como ponto de partida para as análises de estabilidade do talude geral.

Esta etapa teve o objetivo de avaliar as condições de estabilidade dos taludes gerais da cava final proposta pela CVRD, para verificar se atendem critérios usuais de segurança aceitos em mineração. Em termos descritivos, para a definição das condições de segurança e estabilidade dos taludes, foram admitidas faixas de variação do Fator de Segurança (FS) relacionadas às cores branca, amarela e vermelha, abaixo indicadas. Desta forma, para os taludes julgados inaceitáveis ( $FS < 1,20$ ), foram executadas as análises da 2ª Etapa na busca da geometria estável.

- Condição Favorável :  $FS > 1,30$  (**branca**);
- Condição Aceitável :  $1,20 < FS < 1,30$  (**amarela**) ;
- Condição Inaceitável :  $FS < 1,20$  (**vermelha**).

Tabela 6 - 2a Etapa – alternativa II : resultados das análises.

SETOR	SUBSETOR	SEÇÃO	SUP. CRÍTICA	FS
SUDESTE	S - 2	SE – 03 Arrimo FF	Interm.-Inferior	1,2
	S - 3	SE – 04 Arrimo FF Abat. Tal. MB	Superior – interm.	1,65
			Intermediária	1,27
			Inferior	1,31
S - 4	SE – 05 Arrimo FF	Global	3,3	
LESTE	E - 2	SE – 07 Arrimo FF	Inferior –Interm.	1,46
			Global	1,2
	E - 5	SE – 10 Arrimo FF	Inferior – Interm.	1,24
			Global	1,26
	E - 7	SE – 12 Abatimento MB	Superior – Interm.	1,25
	E – 8	SE – 13 Arrimo FF Piv. Topo Tal.	Global	1,25
E – 9	SE – 14 Arrimo FF - Pé	Global	1,21	
NOROEST E	NW - 2	SE – 19 Abatim. Talude Pivota Interm. Ascendente e Descendente	Superior	1,27
			Superior – Interm.	1,21
			Intermediária.	1,32
			Inferior - Pé	1,64
	NW - 3	SE – 20 Abatim. Talude Pivota Interm. Ascendente e Descendente	Global	1,28
			Superior	1,42
			Superior –Interm.	1,22
	NW – 4	SE – 21 Pivota Interm. Ascendente e Descendente	Global	1,68
			Superior	1,23
			Superior – Interm.	1,21
		Interm. - Inferior	1,74	
		Global	1,29	

Fonte: Mina N4E – Estudos de Estabilidade – Geoestrutural – Junho 2007.

As inúmeras situações onde os fatores de segurança estão entre 1,20 a 1,30 podem ser assumidas, pois ainda atendem critérios aceitáveis de estabilidade em mineração. Entretanto, as análises indicaram que nesses casos, a condição de saturação do maciço é o fator mais relevante que deve ser investigado, numa próxima fase de projeto dos taludes da mina N4E.

### 3.1.3 Resumo – Dimensionamento

Com base nos resultados apresentados, segue a Tabela 7 com a sugestão de geometria para a cava final. A Tabela 7 serviu de base para a elaboração dos Mapas de Ângulos.

Tabela 7 - Alternativa II – arrimo – geometria dos taludes.

SETOR (SEÇÃO)	□ <sub>g</sub>	Metabásica VI				Metabásica V/IV/III			Hematita VI / V		
		□ <sub>i</sub>	□ <sub>i</sub>	□ <sub>c</sub>		□ <sub>i</sub>	□ <sub>i</sub>	□ <sub>c</sub>	□ <sub>i</sub>	□ <sub>i</sub>	□ <sub>c</sub>
				(a)	(b)						
S1 (SE-02)	36	36	50	60	50	36	50	80			
S2 (SE-03)	34	31	41	60	50				40	57	80
S3 (SE-04)	27	35	48	60	50	30	40	80	35	48	80
									30	40	80
S4 (SE-05)	26	31	40	60	50	39	55	80	45	65	80
									40	57	80
									26	33	80
E1 (SE-06)	28	26	37	60	50				45	65	80
									40	57	80
									31	41	
E2 (SE-07)	34	30	40	60	50				39	55	70
									43	62	70
E3 (SE-08)	34	34	46	60	50				34	46	70
E4 (SE-09)	35	30	40	60	50				45	65	70
E5 (SE-10)	29								44	63	80
									30	40	
E6 (SE-11)	30	33	45	60	50						
E7 (SE-12)	30	35	48	60	50				45	65	80
E8 (SE-13)	37								37	52	80
* E9 (SE-14)	30								44	63	80
N1 (SE-15)	31	34	46	60	50	38	53	80			
W1 (SE-16)	44			50	50			50	44	63	80
W2 (SE-17)	33	26	33	50	50			50	45	65	80
									58	85	80

(77)

W3 (SE-18)	25	26	37	50	50			50	37	52	80
NW1 (SE-19)	40	27	35	50	50	43	62	50			
NW2 (SE-20)	37	25	32	60	50	50	73	80	50	73	80
							(66)				
						41	58				
NW3 (SE-21)	32	26	37	60	50	37	52	80			
SW1 (SE-01)	25	26	37	50	50			50	42	60	80

Fonte: Mina N4E – Estudos de Estabilidade – Geoestrutural – Junho 2007

NOTAS :

\*E9 (SE-14): na hematita corresponde ao ângulo geral acima da rampa na base do talude, pois a ampliação do banco EL 535m e a subida do piso da EL 505m para a EL 520 m gera um ângulo geral abatido (30°).

( ) : Talude de banco para berma com 6,0 m de largura.

50 Talude limitado pelo mergulho da família de junta J2 (N20°E/50°SE)

□ O Litotipo e classe de maciço não ocorrem na seção geomecânica adotada

- Metabásica Classe VI

**Coluna (a)** : Parâmetro de projeto :  $c = 50 \text{ KPa}$  ;  $\phi = 25^\circ$  ;  $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ KN/m}^3$

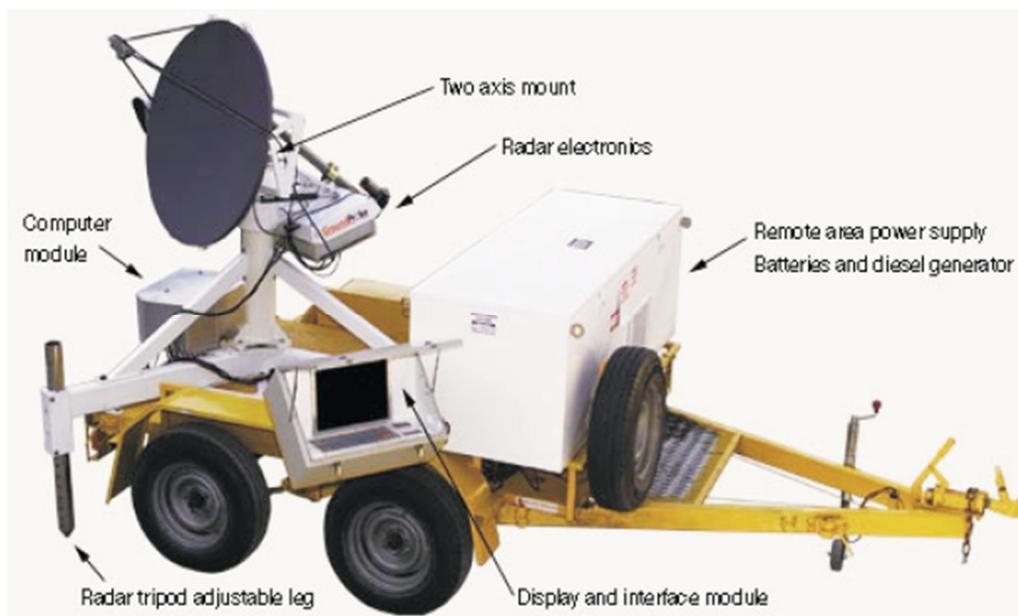
**Coluna (b)** : Parâmetro reduzido :  $c = 20 \text{ KPa}$  ;  $\phi = 25^\circ$  ;  $\gamma_{\text{nat}} = 15 \text{ KN/m}^3$

### 3.1.4 MONITORAMENTO DOS TALUDES DAS MINAS

Nas minas de ferro de Carajás é usado o “Georadar” (radar para controle e monitoramento de taludes *on-line*) que foi desenvolvido para acompanhar remotamente as deformações e/ou movimentos dos taludes continuamente. O sistema pode detectar e alertar os movimentos na superfície do talude com precisão de milímetros, e com confiabilidade e resolução. A vantagem do radar para controle de estabilidade de taludes sobre outras técnicas de monitoramento é que proporciona cobertura completa da área, sem a necessidade de reflectores montados ou equipamentos sobre a superfície a ser monitorada. Além disso, as ondas de radar penetram através de chuva, poeira e fumaça para dar medições confiáveis, 24 horas por dia. A técnica de medição via radar não necessita de um suporte altamente estável,

exigido pelos outros sistemas tradicionais de controle, tornando mais fácil para se deslocar de um local para outro. O sistema é auto-alimentado e projetado para manutenção mínima.

Figura 39 - Georadar e seus componentes principais.



Fonte: Radar para Monitoramento de Taludes, 2003.

As imagens dos movimentos ou deslocamentos são registradas através de fotografias digitais que são transferidas a partir do sistema do radar por via de um link com o sistema de telemetria via rádio. Este sistema *software/hardware* fornece aos engenheiros geotécnicos imagens completas dos movimentos e deformações a intervalos de tempo pré-definidos. O histórico do movimento e/ou deformação de qualquer ponto ou área selecionados podem ser apresentados em tempo real. Desde que seja definido limites de movimento e/ou deformação, este aciona alarmes de alerta conforme os códigos estabelecidos.

Este sistema é usado em várias minas de carvão na Austrália. O alto nível de precisão do monitoramento e área de cobertura ampla do talude fornece uma melhor compreensão geodinâmica, o que conduz a tempos de aviso extra. Esta tecnologia permitiu uma mudança radical na gestão de riscos nas minas de ferro de Carajás e proporcionou maior segurança às operações de mina.

### **3.1.5 Considerações finais**

Nos ajustes recomendados nos Mapas de Ângulos, as posições de crista e de pé indicadas deverão ser rigorosamente obedecidas, para assegurar a estabilização dos taludes, segundo as alternativas apresentadas. Para garantir este rigor na configuração do talude é necessário a reconfiguração do mesmo, pois os equipamentos aplicados na lavra não permitem este controle na forma do talude de bancada e conseqüentemente no talude geral.

Recomenda – se a prática de um programa de acompanhamento técnico do avanço das escavações, para aferir os modelos e hipóteses assumidas neste relatório, formando um banco de dados para, se houver necessidade, estudar e implantar eventuais ajustes de projeto no futuro.

Recomenda-se o monitoramento on-line do talude onde houver deformações para acompanhamento da velocidade e/ou aceleração da movimentação.

### **3.1.6 Reconfiguração de talude – estudo de caso 1**

Para atender às recomendações da empresa de consultoria especializada em estabilidade de taludes contratada pela Vale, Geoestrutural, em 2007, onde uma das solicitações é a seguinte: “as posições de crista e de pé indicadas deverão ser rigorosamente obedecidas, para assegurar a estabilização dos taludes, segundo as alternativas apresentadas no estudo”. Para se atender a esta solicitação é necessário a aplicação de técnicas de reconfiguração do talude, pois os equipamentos utilizados na lavra (escavação e/ou carregamento) são muito grandes, não possibilitando este grau de acabamento do talude geral. Os ângulos são apresentados na Tabela 7.

Nas minas de ferro de Carajás optou-se pela execução da reconfiguração de taludes com a aplicação de trator de esteiras (D11 CAT) e retro-escavadeiras de pequeno porte (D345 CAT).

A seguir, serão apresentadas as reconfigurações dos taludes das minas de N4E e N4WN – Cava II, como exemplos, e os resultados atingidos em segurança operacional, financeiro e impactos na imagem da empresa perante à comunidade e aos órgãos reguladores.

Os ganhos com a reconfiguração de talude são:

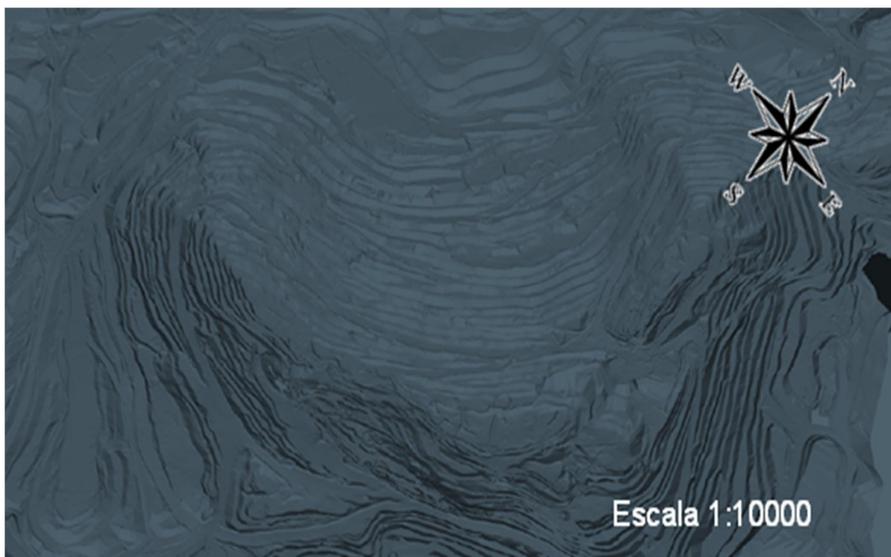
- 1- garantia da recuperação da reserva de minério medida e provada;
  - 2- melhoria da estabilidade do talude, maior fator de segurança (FS);
  - 3- melhoria da acessibilidade aos bancos (bermas conforme projeto);
  - 4- melhoria da drenagem superficial;
  - 5- controle das erosões;
  - 6- redução da necessidade de bombeamento, menor consumo de energia;
  - 7- garantia dos acessos operacionais, largura e segurança;
  - 8- redução da probabilidade de queda de blocos e de acidentes;
  - 9- redução da probabilidade de ruptura e/ou colapso do talude;
  - 10-retorno financeiro;
  - 11-melhoria da imagem da empresa;
  - 12-confiança do mercado.
- Geometria,  
Estrutural  
e  
Operacional**
- Econômico  
e  
Regulatório**

A seguir serão apresentados os ganhos financeiros e estruturais de forma clara e objetiva.

### ***3.1.6.1 Reconfiguração do Talude da Mina de N4E***

Na Figura 40 é apresentada a geometria da cava em 29/03/2011, onde se observa a irregularidade das faces dos bancos, talude geral variando sem a caracterização de cada setor, acessos estrangulados, bancos descontínuos, falta de direcionamento das drenagens superficiais, deslizamentos, etc...

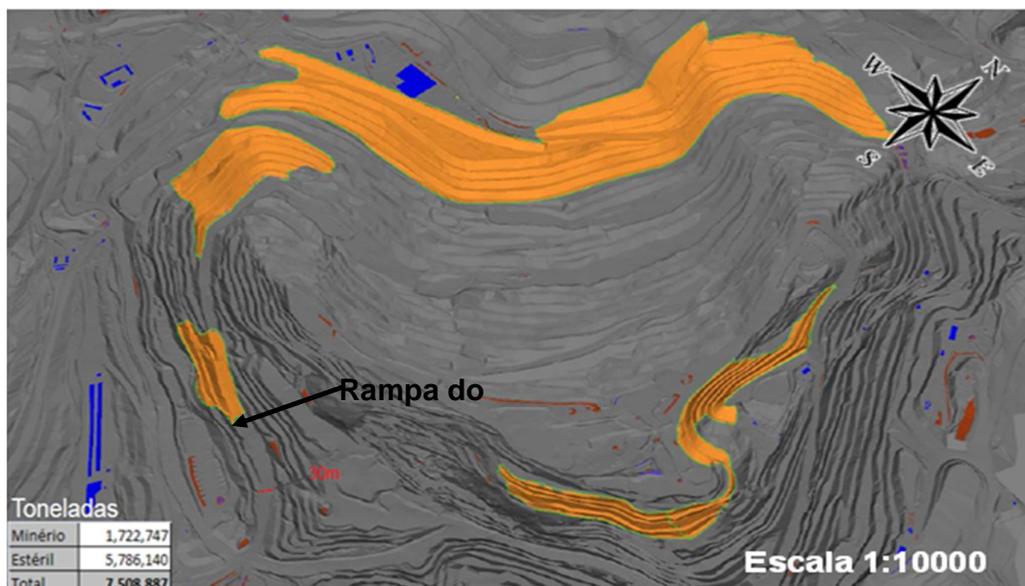
Figura 40 - Geometria da cava de N4E em 29/03/2011.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

Na Figura 41 é apresentado a geometria da cava em 30/11/2012, em laranja observa-se os locais que foram executados a reconfiguração do talude, a regularização das faces dos bancos, a adequação do talude geral conforme a caracterização de cada setor, a execução de acessos atendendo à legislação, a manutenção de bancos contínuos, o direcionamento das drenagens superficiais, que como resultado direto proporcionam a redução do risco de deslizamentos e/ou queda de blocos.

Figura 41 - Geometria da cava de N4E em 30/11/2012.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

A seguir é apresentado de forma clara e objetiva os ganhos financeiros e estruturais:

- Resultado financeiro - maior recuperação de minério:

Para explicar os ganhos gerados com a reconfiguração do talude, parte-se do princípio de que, se não fosse executada esta atividade, o minério gerado não seria recuperado, ou seja: ficaria no talude, não gerando produção.

Outro indicador aqui abordado será a **Margem Ebitda** (antes dos impostos) que representa a geração de caixa média por tonelada de concentrado de ferro (preço de venda, menos os custos de produção e transporte) vendida num determinado período, dependendo do preço de mercado.

Legenda - Convenções:

G = Ganho (US\$)

P = Perda (US\$)

R = Recuperação em Massa no Beneficiamento (92%)

REM = Relação Estéril/Minério (1,18)

ROM = Minério (t)

E = Estéril (t)

ME = Margem Ebitda (US\$43,70/t)

VP = Valor Presente (US\$)

i = Taxa de juros de mercado (%)

n = Meses ou Anos para o minério ser beneficiado

Fórmula Estéril:

$$G \text{ ou } P = \frac{ME \times R \times E}{REM} \quad (26)$$

Cada 1,18 toneladas de estéril que é lavrada (extraída), libera uma tonelada de minério de ferro nas minas de Carajás em média, este seria o ganho e a perda seria o oposto, ou seja: cada 1,18 toneladas de estéril que deixamos de lavar, reduz nosso caixa na mesma proporção.

Fórmula Minério:

$$G \text{ ou } P = ME \times R \times ROM \quad (27)$$

Cada tonelada de minério de ferro das minas de Carajás gera caixa de US\$43,70.

Valor Presente:

$$VP = \frac{(G \text{ ou } P)}{(1 + i)^n} \quad (28)$$

Aplicando-se esta fórmula, pode-se calcular o ganho ou a perda num determinado período a valor atual.

Cálculo do caixa gerado na Cava de N4E:

ROM = 1.722.747 t;

ME = US\$43,70/t;

R = 92%;

Como houve geração de minério com a atividade de reconfiguração do talude, houve a geração de caixa correspondente, aplicando-se a equação (27):

$$G \text{ ou } P = ME \times R \times ROM \quad (27)$$

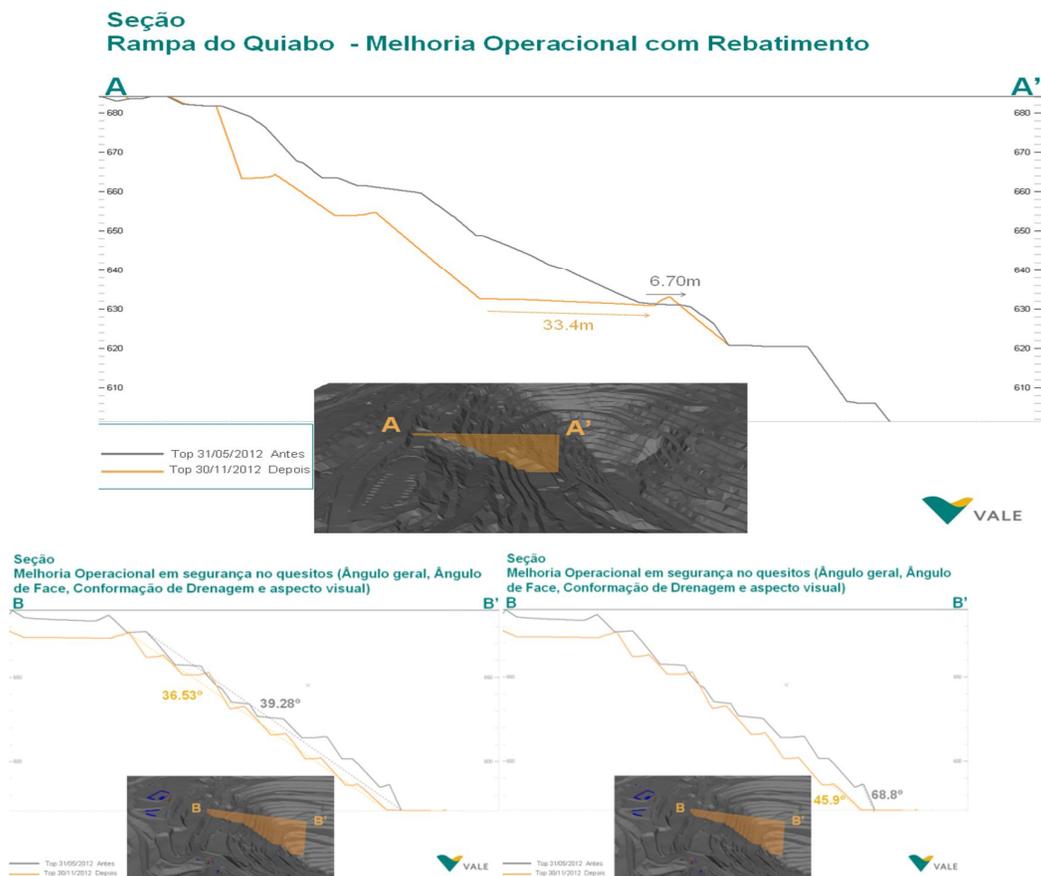
$G = 43,70 \times 0,92 \times 1.722.747$

$G = \text{US\$}69.261.320,39$

Se não fosse a operação de reconfiguração do talude, este minério não seria recuperado.

- Resultado estrutural – Fator de segurança:

Figura 42 - Perfis da cava de N4E antes e depois da reconfiguração do talude.

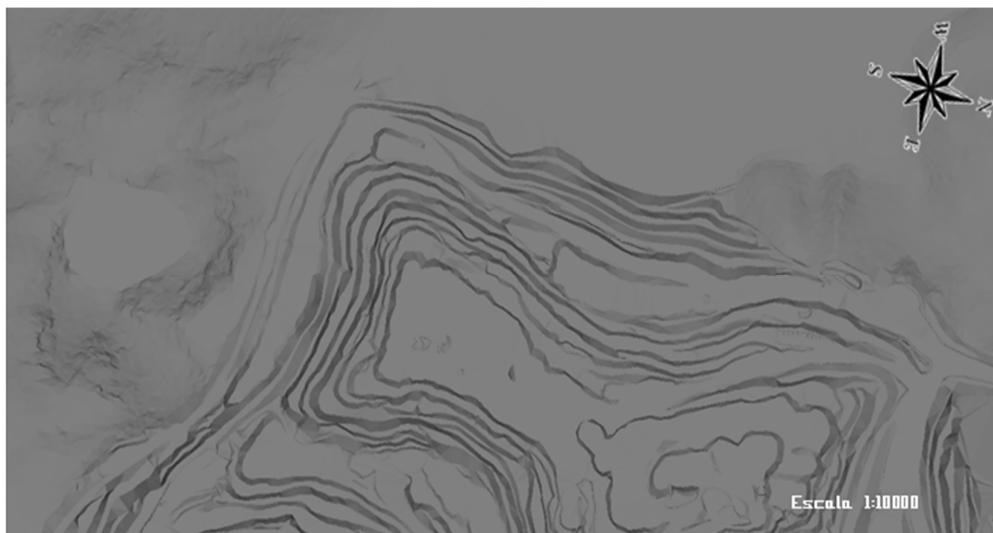


Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

### 3.1.6.2 Reconfiguração de talude da Mina de N4WM – Cava II

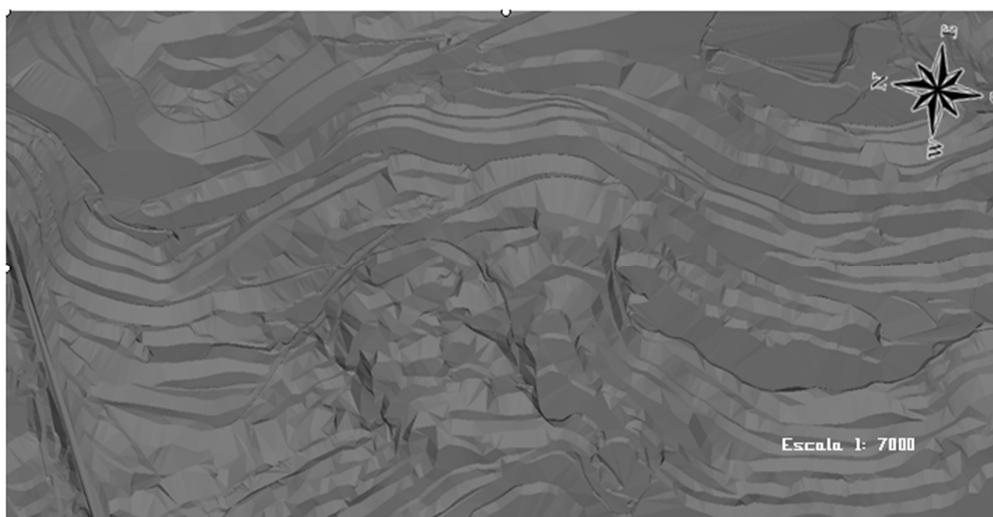
Nas Figura 43 e Figura 44 é apresentada a geometria da Cava II em 30/12/2010, onde observa-se a irregularidade das faces dos bancos, talude geral variando sem a caracterização de cada setor, acessos estrangulados, bancos descontínuos, falta de direcionamento das drenagens superficiais, deslizamentos, etc...

Figura 43 - Mina N4WN – Cava II em 30/12/2010.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

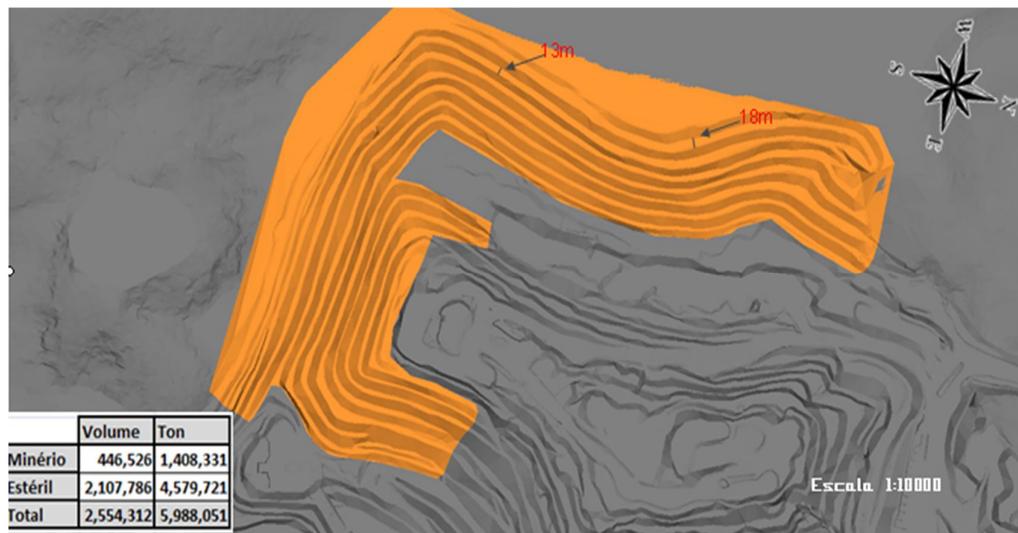
Figura 44 - Mina N4WN – Cava II – Abaixo do Mirante em 30/12/2010.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

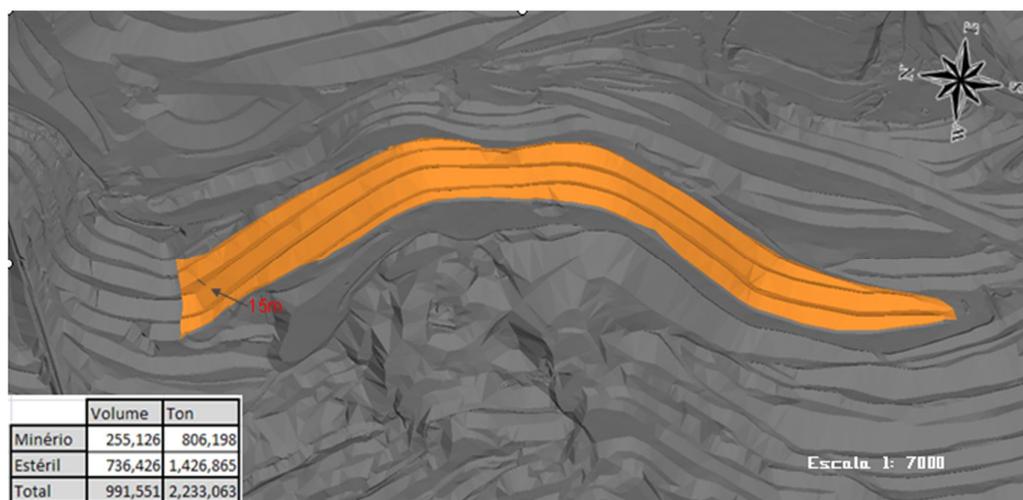
Nas Figura 45 e Figura 46 são apresentados a geometria da cava II em 30/11/2012, onde observa-se nos locais que foram executados a reconfiguração do talude, a regularidade das faces dos bancos, talude geral variando conforme a caracterização de cada setor, acessos atendendo à legislação, bancos contínuos, direcionamento das drenagens superficiais, redução do risco de deslizamentos e/ou queda de blocos.

Figura 45 - Mina N4WN – Cava II em 30/11/2012.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

Figura 46 - Mina N4WN – Cava II – Abaixo do Mirante em 30/11/2012.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

Cálculo do caixa gerado na Cava II de N4WN:

ROM total (t) = 2.214.529

ME = US\$43,70/t;

R = 92%

Equação 27

$G \text{ ou } P = ME \times R \times ROM$

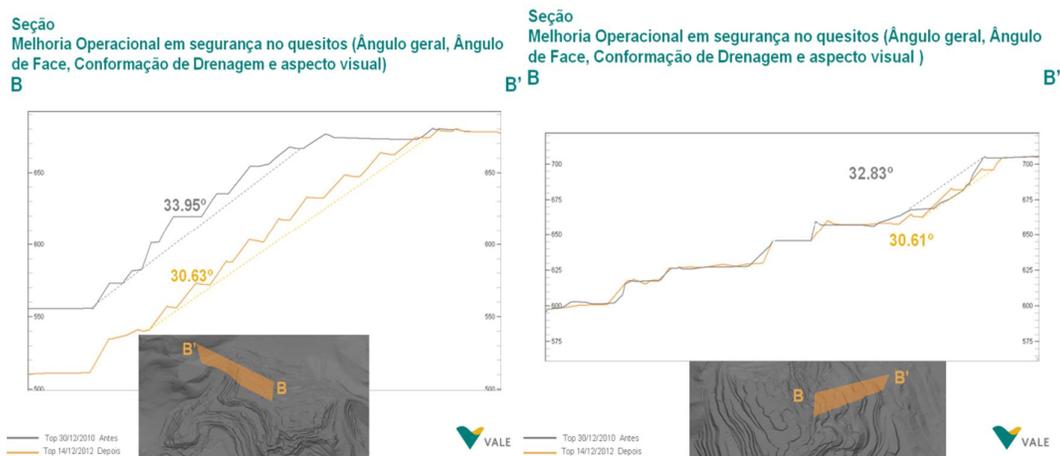
(27)

$G = 43,70 \times 0,92 \times 2.214.529$

G = US\$89.032.923,916

- Resultado estrutural – Fator de segurança:

Figura 47 - Perfis da Mina N4WN antes e depois da reconfiguração do talude.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

- Redução da probabilidade da queda de blocos e de acidente:

Figura 48 - Acidente material com queda de bloco dia 19/03/2012.



Fonte: Relatório de análise de acidente, 2011.

Este acidente gerou apenas danos materiais, mas poderia resultar em até fatalidade do operador da pá carregadeira. A ação de prevenção mais eficiente contra este tipo de acidente é a reconfiguração do talude para reduzir a probabilidade de queda de blocos ou deslizamentos de materiais, pois promove a limpeza e estabilização da superfície do talude.

Como foi apresentado nos dois exemplos abordados nas duas cavas parcialmente reconfiguradas das seis grandes cavas das minas de ferro de Carajás que gerou um ganho

financeiro de aproximadamente 290 milhões de dólares, além dos outros ganhos reais também provados no estudo de caso.

### 3.1.7 Utilização de trator de esteira e/ou retro-escavadeira na reconfiguração de talude – estudo de caso 2

Figura 49 - Face do banco de lavra reconfigurada.



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

- Método Atual

Observou-se que no método anterior de reconfiguração de talude, os dois equipamentos aplicados estavam subutilizados. O trator operava paralelamente ao talude gerando produção muito baixa e a retro-escavadeira trabalhava apenas na reconfiguração (“penteando”) do talude gerado pelo trator. Nesta operação o trator é responsável 100% pela produção.

Figura 50 - Método Atual – Trator trabalhando na reconfiguração da talude.



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

Problemas:

- lâmina quase sempre vazia, gerando baixa produtividade;
- distribuição irregular do material na parte frontal da lâmina;
- desgaste irregular das bordas e cantos da lâmina;
- desgaste acelerado da embreagem lateral e freio;
- desgaste irregular das esteiras;
- risco de batidas, dois equipamentos trabalhando próximos (trator e retro-escavadeira);
- risco de deslizamento de material do talude na lateral do trator;
- operador trabalha semi-transversal no assento do trator, gerando cansaço – posição não ergonômica;
- havia situações mais graves de má aplicação do trator, mostrado na Figura 51;



Figura 51 - Trator “riscando talude”.



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

- esta operação causa danos aos retentores do eixo pivô;
- a barra equalizadora recebe impacto ao colidir com o chassis.

Observação: esta operação era realizada antigamente por tratores com roda motriz baixa e lâmina apropriada.

Figura 52 - Método atual – Retroescavadeira “penteando”.



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

**Problemas:**

- retro-escavadeira produz muito pouco material, somente o gerado pela reconfiguração do material da face do banco (conformando a face do banco);
- retro-escavadeira não realiza trabalho, pois não desloca o material até a praça de carregamento do mesmo, pela carregadeira ou escavadeira;
- retro-escavadeira nesta situação atende de 1 a 3 tratores D11, os quais ficam responsáveis pela produção da atividade.

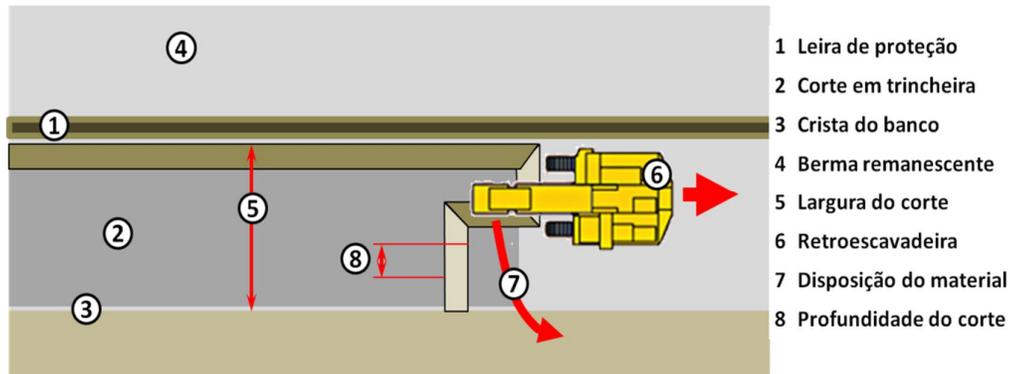
- **Método Proposto**

A retro-escavadeira se torna responsável pela produção na operação, mas em determinadas condições o trator participa na produção ou faz o transporte do material, devido à distância até a praça de carregamento, ou por estar num banco acima da praça de carregamento, exige o tombamento do material até o banco onde está ocorrendo a operação de carregamento pela pá carregadeira ou escavadeira.

O método proposto foi padronizado para facilitar a replicação do processo e o treinamento – O novo procedimento operacional passou a integrar o Padrão 6679 do Sistema de Padronização Vale (SISPAV).

Na Figura 53 é apresentado em planta a disposição dos elementos e a retroescavadeira utilizada na atividade:

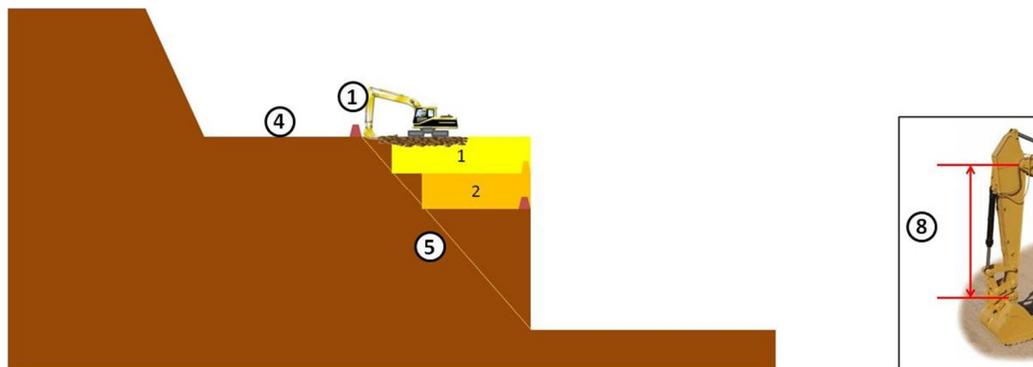
Figura 53 - Vista em planta dos elementos da reconfiguração de talude com retro-escavadeira.



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

Na Figura 54 é apresentado em perfil a sequência das atividades:

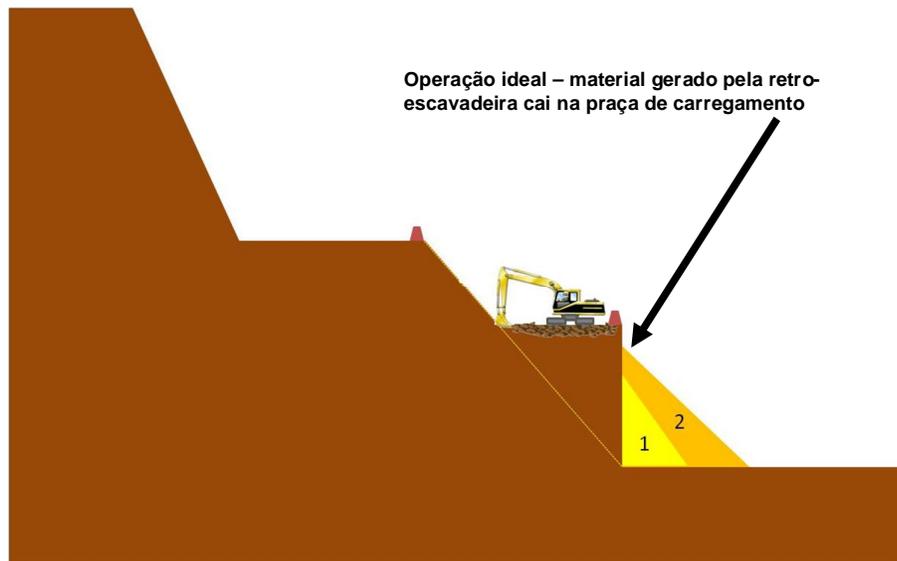
Figura 54 - Vista em perfil da sequência das atividades de reconfiguração com retro-escavadeira.



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

Na Figura 55 é apresentada uma etapa intermediária, mostrando como ocorre o processo e a deposição do material gerado pela retro-escavadeira possibilitando a continuidade da operação, caindo na praça de carregamento, ou seja: está trabalhando no mesmo banco onde está acontecendo a operação de carregamento. Deve-se manter uma distância de 50 a 100 m da praça de carregamento para evitar risco de colisão contra o caminhão que realiza a operação de transporte do material.

Figura 55 - Operação ideal de reconfiguração de talude.



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

Pontos de atenção:

1- para se ter a máxima eficiência deste novo método é necessário sincronismo e disciplina entre a operação de carregamento realizada pela escavadeira ou pela pá carregadeira e a operação de reconfiguração do talude realizada pela retro-escavadeira para que as duas ocorram no mesmo banco e com uma distância de segurança de 50 a 100m para evitar o risco de colisão entre os equipamentos envolvidos ( retro-escavadeira e caminhões);

2- rigoroso acompanhamento topográfico, para não haver alargamento excessivo da berma que não permita a produção direta da retro-escavadeira ou largura inferior, que não gere uma plataforma com largura suficiente para a operação segura da mesma, ou avance além do *pit*, provocando problema estético ou estrutural no talude.

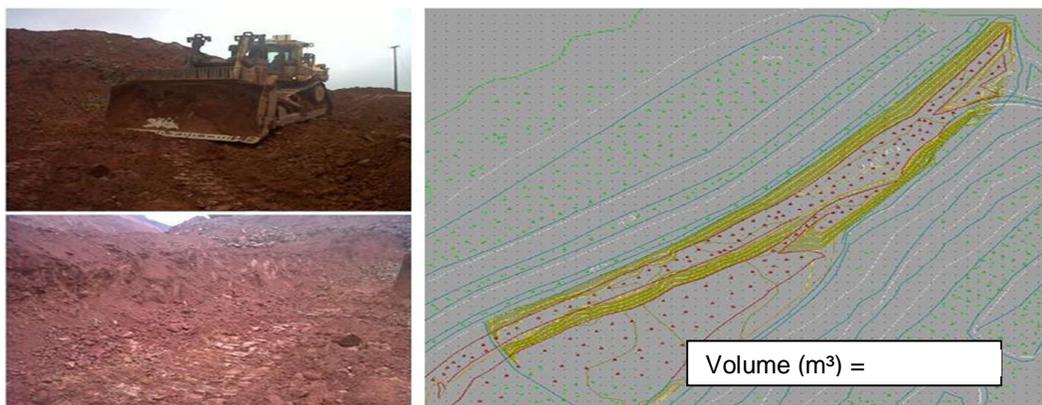
- Estudo comparativo entre os dois métodos

As medições da produção do trator D11 e retro-escavadeira foram realizadas no período de 15 a 27/11/2012.

Método Atual

As medições da produção do trator foram realizadas na Mina N4WN, no banco 640, praça da Escavadeira 0904, conforme ilustração apresentada na Figura 56.

Figura 56 - Produção do trator na reconfiguração de talude.

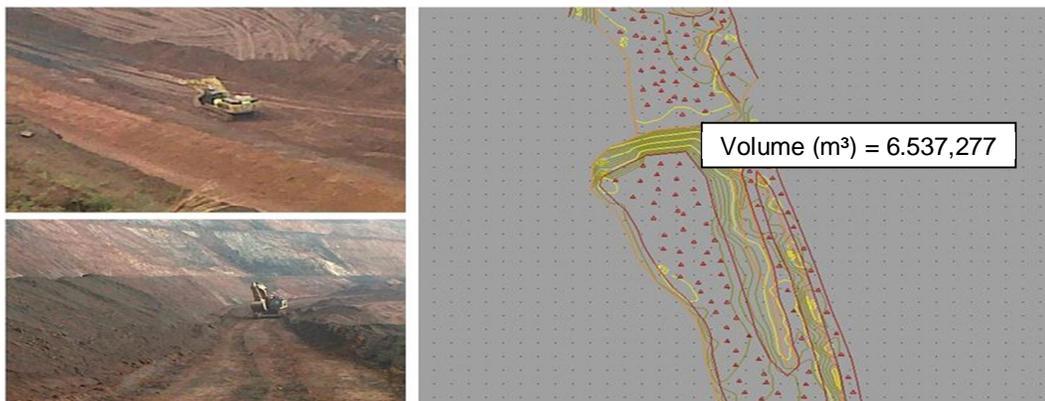


Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

### Método Proposto

As medições da produção da escavadeira foram realizadas na Mina N4WN, no banco abaixo Mirante, na praça da Escavadeira 2005.

Figura 57 - Produção da retro-escavadeira na reconfiguração de talude.



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

A diferença de produtividade entre as metodologias segundo as medições no campo foi 75% superior com vantagem para o sistema considerando a escavadeira como principal equipamento de produção na operação de reconfiguração de talude.

Tabela 8 - Produção do trator de esteira e retro-escavadeira.

<b>Método Anterior</b>	<b>N4WN</b>	<b>Método Atual</b>	<b>N4WN</b>
<b>Trator de Esteira</b>		<b>Retro-escavadeira</b>	
Volume Desmontando	11.821,50	Volume Desmontando	6.537,00
Horas Trabalhadas (h)	71,9	Horas Trabalhadas (h)	22,7
<b>Produtividade (m<sup>3</sup>/h)</b>		<b>Produtividade (m<sup>3</sup>/h)</b>	
<b>164,5</b>		<b>288,2</b>	

Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

Na Tabela 8 observa-se a comparação de produtividade entre o método antigo e o atual (proposto e aplicado). No método antigo a produção era inferior e consumia um trator e uma retroescavadeira. O método atual, além de produzir mais, utiliza somente a retroescavadeira. Esta melhoria de desempenho também se traduz num custo muito inferior ao método antigo.

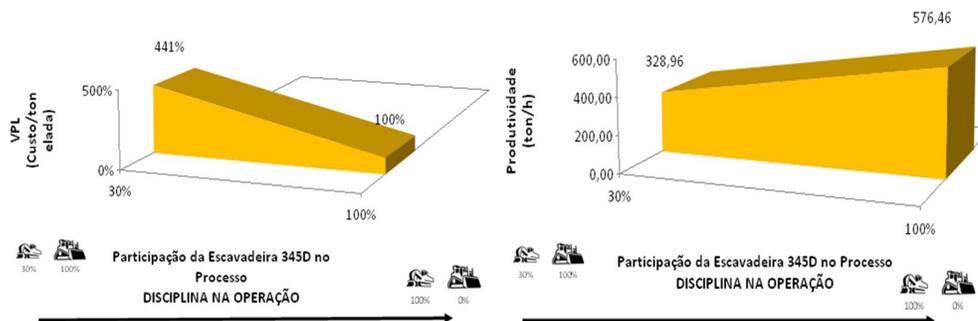
Para efeito de comparação dos resultados, buscou-se estabelecer a relação de custo por tonelada produzida à medida que a participação da retroescavadeira aumentava para demonstrar o aumento da efetividade da operação.

Para determinar o custo do trator D11T e da retroescavadeira 345D, buscou-se os custos horários de combustível, material de desgaste e operação os quais foram fornecidos pela Engenharia de Operação Vale (consumos horários) e os custos das peças durante os 9 anos de operação dos equipamentos com o fabricante, neste caso a Caterpillar, através do distribuidor nacional Sotreq (curva de peças). Para efeito comparativo os custos CAPEX (capital) e OPEX (operação) foram lançados no fluxo de caixa durante os 9 anos e atualizados através da função VPL. Este valor foi dividido pela produção durante os 9 anos de operação dos equipamentos para estabelecer o custo médio de cada equipamento por tonelada produzida.

Os gráficos foram construídos para demonstrar a evolução do custo e da produtividade, conforme a participação de cada equipamento, neste caso do trator D11T e da retroescavadeira 345D.

Nos gráficos da Figura 58 são apresentados os resultados comparativos com o aumento da participação da retroescavadeira de 30% para 100% na atividade de reconfiguração do talude e a consequente redução da participação do trator de esteira de 100% para 0%, ou seja: até a não participação do trator de esteira nesta atividade.

Figura 58 - Evolução do custo e da produção (trator x retroescavadeira).



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

Observa-se que com aumento da participação da retroescavadeira o custo diminui e a produtividade aumenta, pois o trator trabalha em condição não adequada ao seu máximo desempenho, ou seja: lâmina parcialmente vazia e carga não uniforme (produção equivalente à DMT > 100m). A retroescavadeira está próxima de seu máximo desempenho, giro próximo de 90 graus, por este motivo apresenta maior produtividade horária, menor custo operacional e de capital.

## 3.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DAS CAMADAS DO PAVIMENTO DAS ESTRADAS NAS MINAS DE FERRO DE CARAJÁS

### 3.2.1 Introdução

Este trabalho desenvolve a aplicação de um procedimento considerando melhores práticas para construção de estradas de mina. O procedimento desenvolvido por Masetti, 2011 e posteriormente aplicado em um manual de boas práticas para construção de pistas e acessos internos desenvolvido pela Vale S/A (Manual de Estradas de Mina, Fev/2011). Dentro dessa proposta, serão apresentados os conceitos básicos utilizados para implementação da metodologia e posteriormente os resultados obtidos a partir da aplicação ao estudo de caso de Carajás.

Passos da análise e quantificação das camadas dos pavimentos das estradas como é preconizado por Thompson (1996), o projeto estrutural é constituído por um processo de composição do arranjo mais econômico das camadas do pavimento (considerando sua espessura e tipos de materiais disponíveis), que seja compatível com o material in situ e com o volume de tráfego previsto para a vida útil das estradas. O autor agrupa as atividades de um

projeto estrutural em 4 etapas distintas, conforme apresentado no capítulo 2 dessa dissertação e agora aplicadas ao caso de estudo:

### ***3.2.1.1 Análise e caracterização das propriedades estruturais dos materiais disponíveis***

Os cinco materiais disponíveis e mais abundantes nas minas de ferro de Carajás são: máfica decomposta, máfica sã, jaspelito, canga e hematita mole. Nenhum destes materiais tiveram suas propriedades mecânicas determinadas com a finalidade de aplicação nas estradas das minas. As aplicações mencionadas a seguir foram definidas baseando-se nas observações práticas de campo e resultados comparativos de desempenho de cada material.

Nas minas de Carajás utiliza-se a hematita mole de baixo teor e a canga laterítica como revestimento das estradas, por apresentarem:

- disponibilidade e proximidade das estradas;
- adequada trafegabilidade em condições climáticas variadas;
- baixa resistência ao rolamento, na estação seca;
- baixa penetração de água para a camada de base;
- diminuição de poeira excessiva no período seco;
- diminuição de piso escorregadio no período chuvoso;
- baixo custo e redução da necessidade de manutenção;
- os dois materiais apresentam baixa capacidade de suporte na estação chuvosa.

Na Figura 59 é demonstrada a utilização da canga laterítica como material de revestimento de estrada.

Figura 59 - Aplicação funcional da canga laterítica no revestimento de pistas.



Fonte: Foto de inspeção de pistas, 2012.

A máfica decomposta (80% do estéril) que é o outro material fino e plástico disponível nas minas e que tem comportamento quase oposto à hematita mole ou a canga laterítica, ou seja:

- disponibilidade e proximidade das estradas;
- baixa trafegabilidade no período chuvoso, ou seja: se degrada e liquefaz facilmente com a chuva, perdendo sua capacidade de suporte;
- geração de poeira excessiva no período seco (muita argila fina);
- alta resistência ao rolamento devido à deformação (afundamento) e plasticidade;
- geração de piso escorregadio no período chuvoso;
- alto custo devido à necessidade de manutenção constante.

Figura 60 - Comportamento funcional da máfica decomposta no revestimento de pistas.



Fonte: Foto de inspeção de mina, 2012.

A máfica sã (10% do estéril) é excelente para ser aplicada como base do acesso, por apresentar as seguintes características quando fragmentada:

- alta capacidade de suporte e trafegabilidade quando fragmentada abaixo de 1m de diâmetro e em camada com espessura de 2m;
- promove a estabilização do revestimento da estrada, reduzindo a deformação da máfica decomposta que é o substrato predominante sob as estradas e não ruptura da camada;
- redução da resistência ao rolamento, pois fornece suporte e sustentação ao revestimento – reduz a deformação;
- distribuição das tensões e solicitações devido ao tráfego e peso dos equipamentos de transporte sobre o revestimento da estrada;
- baixa abrasividade, provocando menor desgaste dos pneus, quando em contato;
- baixo custo, pois está presente no estéril interno à cava projetada ou muito próxima à mesma.

A Figura 61 mostra o comportamento da máfica sã como base das estradas (camada de 2 m de espessura)

Figura 61 - Comportamento estrutural da Máfica Sã.



Fonte: Foto dos trabalhos de construção das camadas (base) do pavimento das estradas, 2012.

O jaspelito (5 a 10% do estéril) tem as características similares à máfica sã. A única diferença é que quando em contato com os pneus, por ser extremamente abrasivo e cortante, podendo provocar redução da vida útil dos pneus quando exposto à superfície do acesso.

### ***3.2.1.2 Previsão de desempenho estrutural - Modelos analíticos***

Em Carajás foi aplicado método de carga de roda ou simplesmente CBR que foi dimensionado a partir do ábaco contendo curvas com os valores de CBR dos materiais ensaiados contra a espessura da camada para vários carregamentos de roda. Diferentes curvas empíricas foram desenvolvidas ao longo dos anos para aplicações específicas, compondo o ábaco da Figura 13.

Em particular, o caso em estudo utiliza somente a camada de base e o revestimento por ser simples e os materiais utilizados serem encontrados na cava projetada ou nos limites da mesma, como preconizado por Thompson (1996).

A seguir são apresentados os dimensionamentos dos pavimentos das estradas, considerando os dois extremos da argila muito plástica e os passos do processo para os caminhões de 400 ton (CAT 797 F) e 240 ton (CAT 793 C e D), respectivamente:

A Tabela 9 mostra o cálculo do dimensionamento das camadas de base e revestimento do pavimento das estradas para os caminhões CAT 797 F (400 ton. de carga).

Tabela 9 - Dimensionamento do pavimento para caminhão CAT 797 F.

Caminhão de capacidade de carga de 400 ton		
Peso no eixo traseiro	67%	
Peso no eixo dianteiro	33%	
Peso do Caminhão	253,70 t	
Peso da Carga	370,00 t	
Peso total	623,70 t	
Conversão de ton para libra	2.200,00 lb	
Peso no eixo traseiro do caminhão	919.333,80 lb	<b>4.095,21 kN</b>
Peso no eixo dianteiro do caminhão	452.806,20 lb	
Carregamento Máximo por Pneu		
Eixo Traseiro	229.833,45 lb	
Eixo dianteiro	226.403,10 lb	
<b>Considera-se a maior carga de roda, ou seja:</b>	<b>229.833,45 lb</b>	
Conversão de polegas para cm	2,53 cm	
Curvas CBR	47,5 pol para carga de 115.000lb	
Pelas Curvas CBR não há carga de roda tão alta, então vamos fazer a extrapolação e duplicar o valor e também pela prática de campo.		
<b>Espessura total das camadas:</b>	<b>240,35 cm</b>	<b>= 2,4 m</b>
Em Carajás as condições da argila ou máfica decomposta são ainda piores ou seja: sua capacidade de sustentação é muito baixa (sub-leito)		
Curvas CBR - Pior situação	65	
<b>Espessura total das camadas:</b>	<b>328,9 cm</b>	<b>= 3,3 m</b>

Fonte: Dimensionamento da espessura das camadas do pavimento das estradas, CBR, 2012.

A Tabela 10 mostra o cálculo do dimensionamento das camadas de base e revestimento da estrada para caminhões CAT 793 C e D (240 ton de carga).

Tabela 10 - Dimensionamento do pavimento para caminhão CAT 793 C e D.

Caminhão de capacidade de carga de 240 ton		
Peso no eixo traseiro	67%	
Peso no eixo dianteiro	33%	
Peso do Caminhão	167,80 t	
Peso da Carga	216,00 t	
Peso total	383,80 t	
Conversão de t para libra	2.200,00 lb	
Peso no eixo traseiro do caminhão	565.721,20 lb	<b>2.520,03 kN</b>
Peso no eixo dianteiro do caminhão	278.638,80 lb	
Carregamento Máximo por Roda		
Eixo Traseiro	141.430,30 lb	
Eixo dianteiro	139.319,40 lb	
<b>Considera-se a maior carga de roda, ou seja:</b>	<b>141.430,30 lb</b>	
Conversão de polegas para cm	2,53 cm	
Curvas CBR	35 pol para carga de 70.000lb	
Pelas Curvas CBR não há carga de roda tão alta, então vamos fazer a extrapolação e duplicar o valor e também pela prática de campo.		
<b>Espessura total das camadas:</b>	<b>177,1 cm</b>	<b>= 1,8m</b>
Em Carajás as condições da argila ou máfica decomposta são ainda piores ou seja: sua capacidade de sustentação é muito baixa (sub-leito)		
Curvas CBR - Pior situação	50 pol	
<b>Espessura total das camadas:</b>	<b>253 cm</b>	<b>=2,50 m</b>

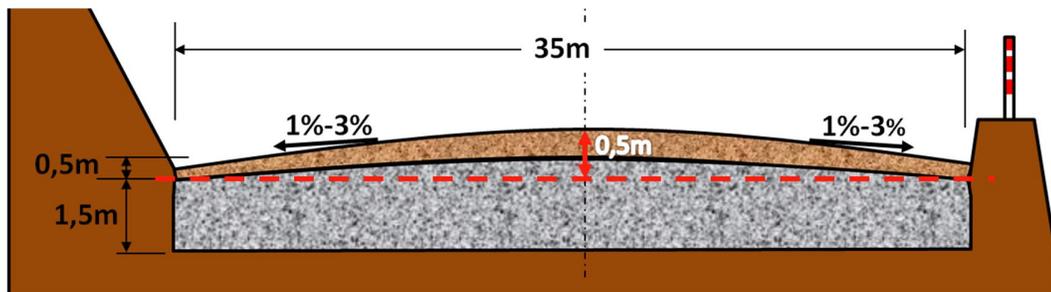
Fonte: Dimensionamento da espessura das camadas do pavimento das estradas, CBR, 2012.

Observa-se que pelo dimensionamento apresentado, a espessura total variou de 1,8 m a 3,3 m, dependendo do caminhão considerado. Mas, através da prática de campo, verificou-se que a espessura de 2,5 m nas laterais e 3,2 m no centro apresenta excelente resultado, quando a estrada é construída na estação seca.

### 3.2.1.3 Recomendação de projeto estrutural e geométrico formal– Padronização

Após a execução do dimensionamento, foi concebido o padrão de construção de estradas (EPS 001977) com vida útil superior a 6 meses e construída durante a estação seca, que será apresentada a seguir, conforme Figura 62:

Figura 62 - Padrão de pavimento das estradas.



Fonte: Padrão de construção de estradas, EPS 001977, 2013.

A criação deste padrão tem demonstrado bons resultados e simplicidade no entendimento dos operadores durante a execução do mesmo.

### 3.2.1.4 Implementação e monitoramento do procedimento

A implementação do padrão foi feita através do treinamento dos operadores e divulgação do padrão através de placas em locais de fácil visualização e onde obrigatoriamente os operadores transitam diariamente, como apresentado na Figura 63

:

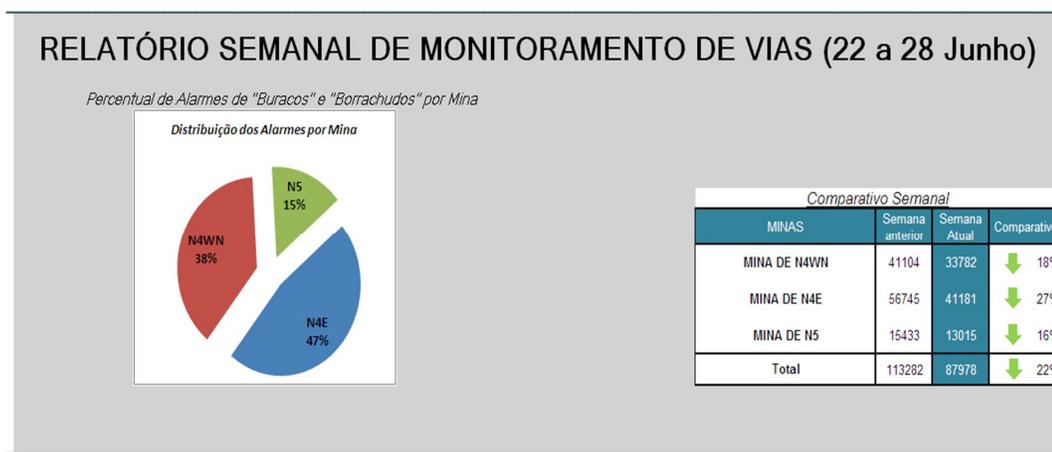
Figura 63 - Placa de sinalização - padrão de construção das estradas.



Fonte: Foto da sinalização vertical das estradas, 2012.

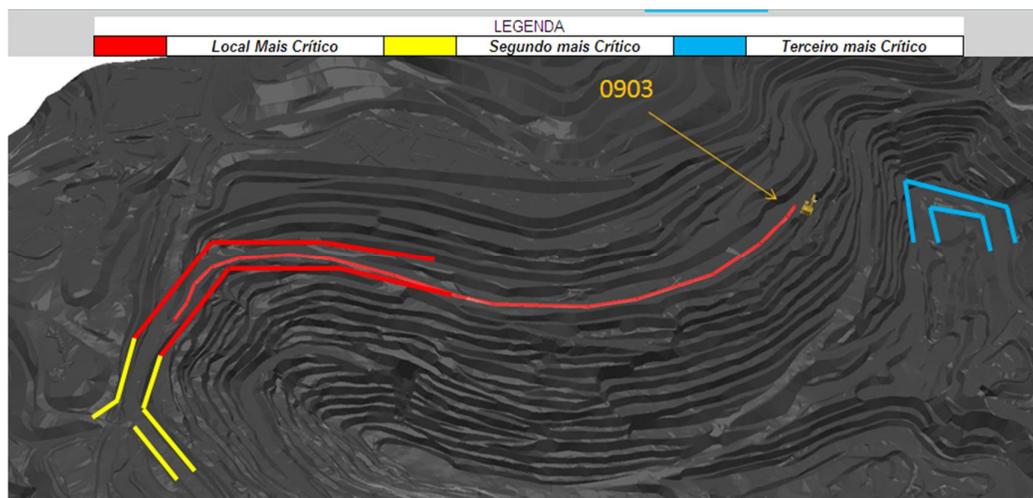
O monitoramento é feito através do sistema de telemetria e através de inspeções semanais das estradas das minas, realizadas pela equipe de manutenção de pneus. Além disso é realizado monitoramento por sistema de coleta de dados através de sensores instalados na estrutura dos caminhões para detecção de impactos devido a problemas nas estradas, tais como: buracos, obstáculos, depressões, saliências e vibrações, devido à corrugação e outros problemas. Quando chove o problema pode ser agravado ou falta de manutenção nas estradas (falta de foco), conforme demonstrado nas Figura 64, Figura 65 e Figura 66:

Figura 64 - Número de alarmes por mina e comparativo entre semanas.



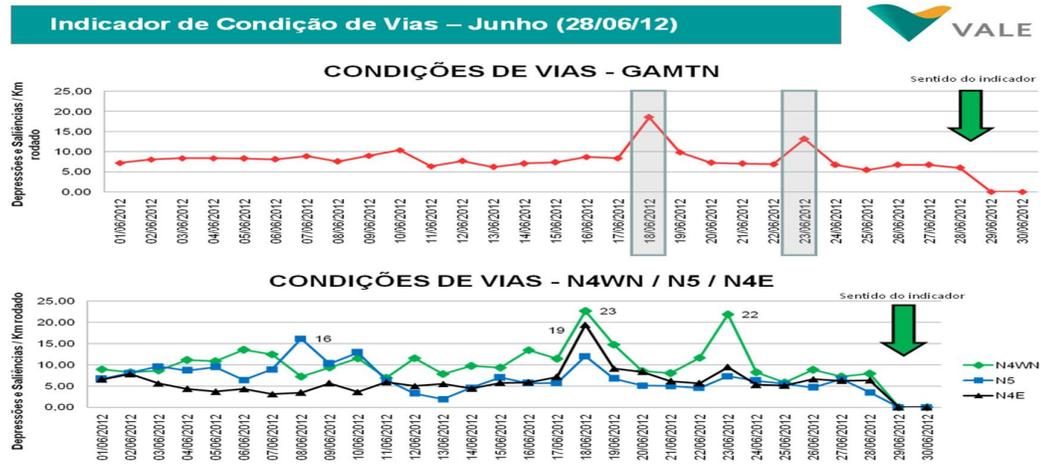
Fonte: Relatório Semanal de Monitoramento de Vias, 2012.

Figura 65 - Criticidade por trecho de estrada.



Fonte: Relatório Semanal de Monitoramento de Vias, 2012.

Figura 66 - Quantidade de alarmes diários.



Fonte: Relatório Semanal de Monitoramento de Vias, 2012.

Há também as inspeções realizadas pela manutenção de pneus em campo com fotos e análise dos problemas, relatório qualitativo de inspeção semanal e comparativo, conforme demonstrado na Figura 67 e 68:

Figura 67 - Fotos do local e a análise comparativa entre semanas, aspectos críticos.

## Rampa do Transportinho



Rampa apresentando boas condições operacionais, com abaulamento correto e boa largura de pista.

Atenção! Pontos com caminhões passando sobre blocos nas leiras.

Fonte: Relatório Semanal de Monitoramento de Vias, 2012.

Figura 68 - Análise comparativa entre semanas.

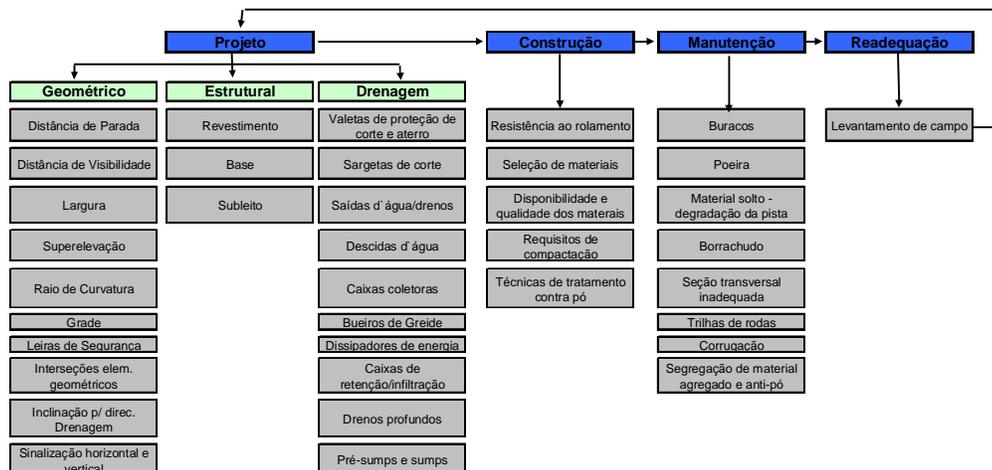
<i>N4WN</i>	<i>Sem. 25</i>	<i>Sem. 26</i>
Zona de Carga 0902	.	ruim
Zona de Carga 0904	regular	regular
Zona de Carga 2102	bom	regular
Acesso da 1302	.	regular
Acesso da 0902	.	bom
Acesso da 0904	regular	regular
Acesso da 2102	bom	bom
Rampa do Arruda	bom	bom
Acesso Dep. Noroeste I	ruim	regular
Acesso Dep. Noroeste II	regular	bom
Rampa Nova (Acesso BSM4)	bom	bom
Acesso Dep. Noroeste I	ruim	regular
Acesso Cava II	regular	regular
Baias BSM IV	bom	bom
Dep. Noroeste II	bom	bom
BSM 4	bom	bom

Fonte: Relatório Semanal de Monitoramento de Vias, 2012.

- Elementos das estradas de Carajás

Na Figura 69 são apresentados de forma esquemática os elementos das estradas das minas de Carajás.

Figura 69 - Elementos das estradas das minas de Carajás.



Fonte: Manual de Estradas Vale, 2011.

## 3.2.2 Projeto das estradas

### 3.2.2.1 Geométrico

Todos os elementos abordados são tratados de forma sistêmica, ou seja: gerenciados em todas as fases das estradas, projeto, construção, manutenção e readequação.

Inclinação para direcionamento transversal da drenagem – abaulamento lateral (1 a 3%):

Figura 70 - Abaulamento transversal das estradas.



Fonte: Relatório Semanal de Monitoramento de Vias, 2012.

O abaulamento reduz em mais de 50% o tempo de exposição da água sobre a pista, quando comparado à estrada com um único sentido de direcionamento lateral, consequentemente reduz a degradação da estrada devido à chuva, na mesma proporção. Reduz também a probabilidade de batidas frontais quando a pista estiver molhada ou escorregadia, pois a tendência de trajetória do caminhão será o direcionamento para as laterais da estrada e não o centro da mesma.

A sinalização é outro elemento muito bem tratado nas estradas, onde a orientação vem sempre junto a um pictograma nas placas. Isto ajuda os operadores a interpretarem a sinalização de forma mais amena e orientativa, mantendo o estado de alerta em alta, conforme Figura 71.

Figura 71 - Sinalização vertical das estradas.



Fonte: Foto de sinalização vertical de pista, 2012.

### 3.2.2.2 Estrutural

A construção das estradas das minas de Carajás é simplificada, constituindo-se de três camadas: revestimento, base e o subleito (*in situ*), não há a sub-base e reforço do subleito. Este elemento foi tratado detalhadamente anteriormente.

### 3.2.2.3 Drenagem

Tratada em todas as fases e contempla todos os elementos. A drenagem é fundamental para reduzir a degradação do revestimento, da base e subleito das estradas pela ação da água. Quanto menor for o tempo de exposição das camadas do pavimento da estrada à ação da água, menor será o dano causado, por isto a drenagem deve ser eficiente tanto superficialmente quanto o mais profunda possível para evitar a saturação das camadas subjacentes, ou seja: base e subleito.

Quanto mais eficiente for a drenagem, menos intervenções de manutenção e adequações posteriores serão necessárias nas camadas de revestimento e sub-base das estradas. Conseqüentemente menor será o custo de manutenção e danos causados aos equipamentos de transporte por problemas estruturais.

## 3.2.3 CONSTRUÇÃO

Todos os elementos construtivos das estradas das minas de Carajás são considerados, tais como: resistência ao rolamento, seleção de materiais, disponibilidade e qualidade dos materiais, requisitos de compactação e técnicas de tratamento contra pó.

### 3.2.3.1 Resistência ao rolamento

É dada pelo afundamento do pneu do caminhão no material de revestimento da estrada (Ricardo e Catalani, 2007) e é expressa pela equação 29:

Equação 29

$$R_r = (20 + 6 * A) P = K * P \quad (29)$$

Onde:

$R_r$  = Resistência ao rolamento (kg);

$A$  = Afundamento do pneu (cm);

$P$  = Peso total do equipamento (t);

$K = (20 + 6 . A)$

Significa dizer que para cada cm de afundamento do pneu do caminhão é necessário mais 0,6% de seu peso em força para vencer a resistência ao movimento.

O caminhão da foto da esquerda tem somente 2% de resistência ao rolamento, que é a energia mínima para iniciar seu movimento, pois como é mostrado, não há afundamento do pneu. Enquanto o caminhão da direita tem uma resistência ao rolamento muito superior, considerando-se 10 cm de afundamento médio, a resistência ao rolamento será de 8%.

Figura 72 - Resistência ao rolamento.



Fonte: Foto de inspeção de pistas, 2012.

Estes exemplos mostram o quanto é importante a construção, manutenção e adequação das estradas das minas para reduzir a resistência ao rolamento, deformações no pavimento e consequentemente reduzir o consumo de diesel, redução dos tempos de ciclo e danos aos equipamentos de transporte.

### 3.2.3.2 *Obstáculos*

Obstáculos são buracos, depressões, blocos, lombadas e outros tipos de resistência ao movimento dos equipamentos de transporte (Ricardo e Catalani, 2007) que é dado pela fórmula abaixo:

Equação 30

$$E = P * \sqrt{\frac{h}{2r}} \quad (30)$$

Onde:

E = Esforço necessário para vencer o obstáculo (t);

P = Peso total do equipamento (t);

r = Raio do pneu do equipamento (m);

h = altura do obstáculo (m).

Conclui-se pela equação 30 que quanto maior for o diâmetro ou raio do pneu do equipamento, menor será o esforço ou energia necessária para transpor o obstáculo. Por este motivo há a tendência de se utilizar equipamentos com pneus maiores na mineração, pois gerará menor consumo de energia.

A equação 30 mostra o quanto é importante a manutenção da superfície de revestimento do pavimento das estradas isenta de obstáculos e com largura padrão para reduzir a energia necessária ao movimento dos equipamentos e melhorar a vida útil dos pneus. Estas deformações provocam a fadiga e/ou cortes da carcaça dos pneus, reduzindo suas vidas drasticamente. Como as estradas estão com o pavimento regular e resistente (alta capacidade de suporte), o obstáculo deformará, desgastará ou mesmo cortará a superfície de menor resistência, ou seja: o pneu.

Figura 73 - Blocos e obstáculos nas estradas.

### Rampa do sabão



□ Rampa apresentando uma boa condição operacional em grande parte, mas apresenta problemas de caminhões passando por blocos em cima das leiras em alguns pontos, podendo causar cortes laterais no pneu.

Fonte: Relatório Semanal de Monitoramento de Vias, 2012.

A seleção de materiais, disponibilidade e qualidade dos mesmos foram tratados anteriormente.

A compactação das camadas do subleito, base e revestimento é realizada pelo tráfego dos equipamentos sobre as mesmas, não sendo necessário equipamentos específicos para esta finalidade.

#### 3.2.3.3 Combate a particulados em suspensão

O combate à poeira nas estradas é realizado por caminhões pipas com adição de produto químico na água (para cada 30.000 litros, utiliza-se 10 litros do produto) e aspersão fixa, canhões de água.

Figura 74 - Aspersão móvel e aspersão fixa.



Fonte: Foto de inspeção de pistas, 2012.

### 3.2.4 MANUTENÇÃO E READEQUAÇÃO

A manutenção e readequação podem ser gerenciados através do monitoramento contínuo pelo sistema de instrumentação instalado nos caminhões, pelas inspeções semanais das pistas e pelo acompanhamento de campo do Supervisor de Infraestrutura, dependendo do estágio de degradação das camadas do pavimento.

A imagem da direita na Figura 75 mostra a construção/readequação da camada de base do pavimento da estrada e a foto da esquerda mostra a necessidade de manutenção da camada de revestimento para evitar danos aos pneus dos caminhões.

Figura 75 - Readequação e manutenção de estrada.

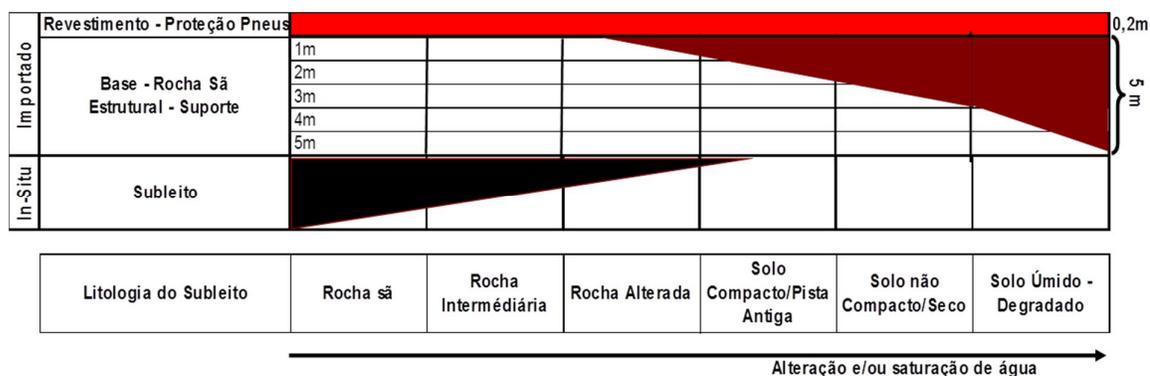


Fonte: Foto de inspeção de pistas, 2012.

Manutenção de oportunidade, ocorre principalmente nas pilhas de estéril quando encontra-se o material adequado para a camada de base ou revestimento do pavimento das estradas durante a lavra. Este material é colocado na estrada e tratado conforme padrão operacional. Este processo permite que o pavimento esteja sempre conforme o padrão em quase toda a extensão das estradas e praças, reduzindo a extensão de pavimento não conforme e custo de construção e/ou manutenção do mesmo.

Na Figura 76 é apresentado de forma gráfica o perfil longitudinal empírico do dimensionamento das camadas estruturais das estradas de Carajás e a correlação com a litologia do subleito. Este perfil é fruto de muita observação de campo e testes conforme litologia do subleito (grau de intemperismo do subleito), saturação de água, qualidade do material utilizado para base e revestimento.

Figura 76 - Perfil longitudinal das camadas estruturais das estradas conforme substrato



Fonte: Vieira e Peroni, 2012.

Outros fatores que influenciam no dimensionamento das camadas do pavimento das estradas:

- 1- sistema de drenagem superficial e das camadas subjacentes (base e subleito);
- 2- regime de chuvas, intensidade e duração;
- 3- época da construção da estrada (tempo de cura – período sem chuva após a conclusão da construção);
- 4- intensidade de tráfego e peso total dos veículos;
- 5- qualidade do material utilizado nas camadas de base e revestimento;
- 6- controle de particulados em suspensão;
- 7- sistema de gerenciamento da manutenção e adequação das estradas.

A Figura 76, demonstra que a única camada que é contínua longitudinalmente nas estradas é a camada de revestimento da estrada. A camada de base da estrada varia conforme os fatores mencionados anteriormente, a litologia do subleito e saturação de água, impactando diretamente no custo de construção, drenagem, readequação e manutenção das estradas.

Outros aspectos importantes, demonstrados:

1- quanto mais profunda a drenagem, mais eficiente, pois além de drenar a água superficial, reduz a saturação das camadas inferiores do pavimento, ou seja: revestimento, base e subleito; reduzindo a degradação de todas as camadas do pavimento. Conseqüentemente reduz o custo de manutenção;

2- após qualquer chuva mais intensa, deve-se verificar e recuperar onde for necessário, o sistema de drenagem das estradas e da mina para evitar transbordamentos, entupimentos e erosões que podem prejudicar a drenagem, causando a degradação das camadas do pavimento das estradas;

3- a construção de estradas durante a estação seca é mais fácil (facilidade no manuseio dos materiais das camadas de base e revestimento), custo menor (50% menos material na camada de base), maior tempo de cura, melhor desempenho da camada de revestimento (menor resistência ao rolamento) e menor deformação das camadas de base e subleito. Conseqüentemente melhor desempenho e menor custo dos equipamentos de transporte;

4- qualidade dos materiais utilizados nas camadas de base (granulometria entre 10 e 100cm de diâmetro) e revestimento (granulometria entre 2 e 10cm de diâmetro) do pavimento, reduz a espessura da camada de base e o custo de manutenção e/ou readequação da estrada, conferindo maior estruturação e menor deformação às camadas do pavimento. A camada de revestimento com granulometria entre 2 e 10cm de diâmetro confere à superfície do revestimento maior aderência dos pneus dos caminhões, reduzindo a geração de lama que causa o deslizamento dos pneus, assegurando maior vida útil dos mesmos.

5- o controle do sistema de supressão de particulados é fundamental no desempenho das estradas e dos equipamentos de transporte. Este deve permitir o controle da umidade da camada de revestimento, evitando o encharcamento da mesma, reduzindo a degradação e custo de manutenção e/ou readequação do pavimento;

6- as pilhas devem ter acesso central ou lateral em cada nível para permitir o lançamento do estéril de forma segura, sistemática, completa e racional, para evitar a necessidade de acesso secundário para complementar algum local que o lançamento não

atingiu a configuração final, minimizando os custos e retrabalho com acessos, permitindo a recuperação ambiental imediata;

7- o treinamento dos empregados e a disciplina operacional são fundamentais para que as estradas tenham boa performance e menor custo otimizado, ou seja: garanta a trafegabilidade e segurança dos equipamentos de transporte, sem gerar danos aos mesmos, reduzindo o retrabalho, a diferença de produtividade e produção entre os períodos de seca e chuva;

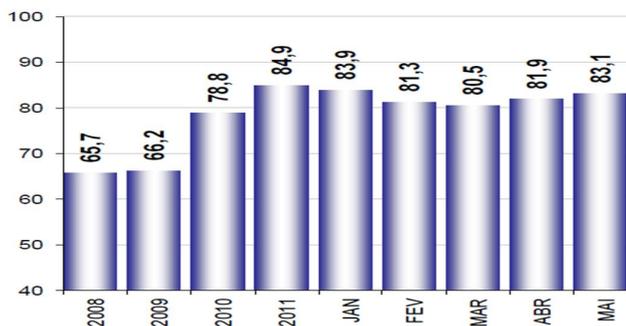
8- a aplicação das motoniveladoras e tratores de pneus reduz no nivelamento das estradas e praças, pois a resistência ao rolamento diminui, devido à menor deformação da camada de revestimento do pavimento. Mas se tornam fundamentais na retirada da lama da superfície das estradas que causa o patinamento dos pneus dos equipamentos de transporte, após as chuvas, acelerando o retorno à operação normal e reduzindo as perdas devido à intempéries. Continuam sendo utilizados na retirada de blocos e obstáculos das estradas.

### **3.2.5 Dimensionamento estrutural das camadas do pavimento das estradas – Estudo de caso 3**

Com a implantação do padrão de dimensionamento das camadas das estradas as perdas de produção reduziram e pela primeira vez, nos últimos 10 anos em Carajás a produção programada foi superada pela produção real durante a estação chuvosa (janeiro a junho/2012), período que foi calculado o ganho potencial e real em comparação ao mesmo período do ano de 2011.

Devem ainda ser considerados aspectos como aumento de disponibilidade física da frota de transporte (redução de manutenção dos caminhões) a partir de 2011, quando se iniciou a implantação do padrão de estruturação das estradas e as melhorias operacionais (melhor aplicação dos equipamentos e condições de operação) que também ocorreram no período analisado. Se estas melhorias não tivessem ocorrido, as melhorias nas estradas não poderiam ser apresentadas, pois se perderiam juntamente a outros problemas, conforme apresentado na Figura 77

Figura 77 - Disponibilidade física (%) da frota de caminhões - 2008 a maio/2012.



Fonte: Relatório de Manutenção de Caminhões, 2012.

O ganho potencial foi baseado na perda de movimentação de estéril no ano de 2011, comparando-se com a produção de 2012 na estação chuvosa, ou seja: nos meses de janeiro a junho de cada ano. Nesta época do ano as condições climáticas impactam mais o desempenho dos equipamentos, tornando a qualidade das estradas decisiva na redução das perdas de produção de forma geral. A equação 26 apresenta a forma como foi quantificado o ganho potencial com a produção de estéril, ou liberação do minério futuro.

$$G \text{ ou } P = \frac{ME * R * E}{REM} \quad (26)$$

$$G \text{ ou } P = \frac{43,70 * 0,92 * 1}{1,18}$$

$$G \text{ ou } P = \text{US\$ } 34,07/\text{t}$$

Onde:

REM = Relação Estéril/Minério (1,18)

ME = Margem Ebitda (US\$43,70/t de concentrado de Fe )

R = Recuperação em Massa = 92%

ROM = Minério (t)

E = Estéril (t)

Ganho (G) = Crédito de Produção (US\$)

Perda (P) = Déficit de Produção (US\$)

i = Taxa de juros de mercado (%)

n = Meses ou anos para o minério ser beneficiado ou vendido

Significa dizer pela equação 26 que, para cada tonelada de estéril extraída ou não extraída, resultará em um ganho ou perda de US\$ 34,07, respectivamente no resultado operacional de Carajás. Se a perda for de minério, o impacto será de US\$43,70 x 0,92 por tonelada, ou seja: o ganho ou perda seria ainda maior.

Tabela 11 - Resultados e comparações entre períodos avaliados.

Ano de Janeiro a junho	2011	2012	2012/2011 ( %)
Movimentação Programada (orçamento - t)	137.975.405,83	134.399.697,81	-2,59
Movimentação Realizada (t)	126.143.107,93	139.624.696,56	10,69
Diferença Mov (Realizada - Programada t)	-11.832.297,89	5.224.998,74	144,16
Hora trabalhadas dos caminhões FE	310.057,14	327.198,31	5,53
Pluviometria (mm)	1.683,20	2.066,50	22,77
Perdas dos Caminhões FE (h)	28.090,22	18.976,02	-32,45
Perdas por mau tempo (h)	15.971,48	11.582,71	-27,48
Perdas Totais (h)	44.061,71	30.558,73	-30,65
Número de Caminhões FE	119,00	121,00	1,68
Produção por caminhão no período (t)	1.060.026,12	1.153.923,11	8,86
Carga média (t/viagem)	225,90	231,76	2,59
DMT (km)	2,72	2,75	1,04
Produtividade Real (t/viagem)	406,84	426,73	4,89
Produtividade Orçada (t/viagem)	422,88	399,02	-5,64

Fonte: Vieira e Peroni, 2012.

Tabela 12 - Equalização dos resultados de 2012 para base 2011.

Equalização da Diferença de Movimentação (t) - Base 2011	Observações
Diferença de Movimentação t (2012 - 2011)	Diferença da Movimentação Total
Equalização do número de caminhões (t)	2011- menos dois caminhões
Equalização da carga por viagem (t)	2011 - menor
Equalização da DMT (km)	2012 - maior

Fonte: Fonte: Vieira e Peroni, 2012.

Tabela 13 - Cálculo do Ganho potencial.

Ganho ou Perda Potencial (US\$)	US\$
Total (t)	10.891.166,45
Outras Movimentações 20% (t)	2.178.233,29
Movimentação em 2012 a maior em relação a 2011 (t)	8.712.933,16
Margem Ebitda (US\$/t de estéril)	34,07
<b>Ganho Total (US\$)</b>	<b>296.849.632,78</b>

Fonte: Vieira e Peroni, Atualizado, 2012.

O ganho real foi calculado, baseando-se na contratação do serviço (no caso específico a empresa de terraplanagem U&M) para executar a produção a maior em 2012, conforme Tabela 14.

Tabela 14 - Cálculo do Ganho real.

<b>Ganho ou perda Real</b>	<b>R\$</b>
Movimentação em 2012 a maior em relação a	10.891.166,45
Menor preço (R\$/m <sup>3</sup> )	6,36
Densidade (t/m <sup>3</sup> )	3,46
Volume (m <sup>3</sup> )	3.147.735,97
<b>Custo com a Terceira (US\$)</b>	<b>10.006.652,59</b>

Fonte: Vieira e Peroni, 2012.

Conversão: US\$1,00 = R\$2,00

Pode concluir que o ganho a ser atingido está entre estes dois valores extremos mínimos. Outra forma de cálculo é o número de caminhões que se ganha (equivalência) com a melhoria da produção, conforme Tabela 15

Tabela 15 - Cálculo dos Caminhões equivalentes.

<b>Caminhões Ganhos</b>	<b>Unidades</b>
Diferença de Movimentação (base 2011 - t)	10.891.166,45
Produção dos caminhões de janeiro a	1.153.923,11
<b>Caminhões Ganhos (unidades)</b>	<b>9,44</b>

Fonte: Vieira e Peroni, 2012.

Na Tabela 16 é apresentada a distribuição da pluviometria dos últimos 13 anos. Observa-se que nos anos de 2009 e 2012 foram os anos de maior precipitação pluviométrica do período analisado. Outro aspecto importante a ser observado na tabela é que a estação chuvosa em Carajás normalmente é de seis meses, mas pode variar entre cinco e sete meses chuvosos. Este aspecto reforça ainda mais a importância da construção, manutenção e adequação das estradas nas minas de Carajás, caso a estação chuvosa seja de sete meses, o impacto na produção será muito significativo neste ano de chuvas mais severas, se as estradas e praças não seguirem as diretrizes estabelecidas no padrão aqui estudado. Este impacto dificilmente poderá ser recuperado na estação seca mais curta. Outro aspecto importante é que não existe recuperação de perda, pois a dimensão tempo não retorna. A real dimensão do resultado é que de fato, na estação seca poderia se produzir ainda mais e não recuperar a produção perdida, aumentando assim a efetividade do processo produtivo.

Tabela 16 - Pluviometria dos últimos 13 anos de Carajás.

		PLUVIOMETRIA DA ESTAÇÃO DE N4E													
ANO		99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12	12-13
Estação Chuvosa	NOV	131,9	215,6	218,3	26,4	217,4	90,1	114,0	120,5	51,5	320,0	127,5	252,2	191,3	
	DEZ	343,5	325,6	213,7	227,2	124,9	155,7	365,0	149,0	98,0	300,5	371,0	208,9	265,8	
	JAN	325,2	316,4	412,5	355,1	202,2	77,6	217,5	129,5	219,5	193,5	327,5	442,8	970,0	
	FEV	498,2	262,2	125,0	420,0	403,6	194,1	352,5	466,0	201,5	511,5	216,1	368,6	366,0	
	MAR	424,9	294,9	361,7	258,3	248,7	223,9	413,5	288,5	283,0	597,0	267,0	299,6	442,0	
Estação Seca	ABR	288,1	201,0	81,7	181,1	226,8	67,8	424,0	220,0	271,5	445,0	338,0	244,4	124,5	
	MAI	39,6	145,9	67,4	86,7	107,7	59,1	216,5	48,0	140,5	614,5	69,0	289,8	90,5	
	JUN	36,3	21,8	39,3	39,6	11,0	6,1	1,0	24,5	3,5	19,0	51,5	38,0	95,0	
	JUL	80,1	34,8	20,0	0,0	52,4	1,2	39,0	14,0	4,5	21,5	3,0	11,0	68,5	
	AGO	18,0	20,7	1,5	65,1	79,1	0,0	11,0	12,0	70,5	108,5	18,5	12,4	10,5	
SET	170,9	45,2	30,8	28,8	34,2	82,0	18,0	0,5	55,5	57,5	25,5	0,4	25,0		
OUT	60,5	166,4	61,8	76,7	61,2	43,5	150,0	35,5	153,5	89,0	130,5	238,8	57,0		
TOTAL Estação Chuvosa		2011,8	1615,7	1412,9	1468,1	1423,6	809,2	1886,5	1373,5	1125,0	2367,5	1647,1	1816,5	2359,6	0,0
TOTAL Estação Seca		405,4	434,8	220,8	296,9	345,6	191,9	435,5	134,5	428,0	910,0	298,0	590,4	346,5	0,0
> 150 mm/mês		6	7	4	5	5	3	7	3	5	7	5	8	5	

Fonte: Relatório de Pluviometria, GABAN/Vale, 2013.

Todas estas melhorias na produção das minas no ano de 2012 comparativas ao ano de 2011 foram atingidas com a pluviometria 22% superior em 2012 no período de janeiro a junho. Mesmo assim, as perdas em 2012 foram em torno de 30% menores, proporcionando uma melhoria de desempenho geral.

As fotos demonstram que a água, associada às tensões geradas pelo contato dos pneus dos caminhões e deficiências na drenagem ou chuvas prolongadas ou problemas de controle de poeira, aceleram o processo de degradação da camada do revestimento do pavimento. Este problema aumenta a resistência ao rolamento, reduz a velocidade do tráfego e a vida útil dos pneus dos caminhões, pois os colocam em contato com os blocos da camada de base do acesso. Este processo provoca deformações e/ou cortes nos pneus, reduzindo suas vidas úteis e também reduz a produtividade dos equipamentos de transporte.

Figura 78 - Problemas na camada de revestimento do pavimento das estradas.



Fonte: Fotos de inspeção de mina, 2012.

### ***3.2.5.1 Influência da qualidade das estradas no custo da produção – Resistência ao rolamento***

Foi abordada a importância do dimensionamento estrutural das camadas do pavimento, as quais, se bem dimensionadas e construídas, reduzem a resistência ao rolamento, por tornar a pista de rolamento mais estruturada, com menor deformação durante o tráfego dos caminhões, conseqüentemente menor penetração dos pneus na camada de revestimento. Mas não basta fazer uma boa camada de base das estradas, a camada de revestimento é fundamental na redução da resistência ao rolamento.

Independente de lavra a céu aberto ou subterrânea, acessos mal concebidos e mal conservados aumentam significativamente os custos, pois causam: perda de produção, reparo e substituição de componentes, redução da vida útil dos pneus, aumento do consumo de combustível, fadiga aos operadores, danos à estrutura dos equipamentos de transporte e riscos à segurança.

Figura 79 - Impactos dos acessos na vida útil dos pneus.



Fonte: Relatório Influência da Resistência ao Rolamento na Produtividade e Custo, Sotreq/Cat,2013

Os acessos influenciam diretamente a produção, por este motivo devem ser projetados e conservados de maneira adequada. As condições dos acessos influenciam no perfil de velocidade, consumo de combustível, vida útil do pneu, fadiga de equipamentos e componentes, segurança e produtividade. Mesmo uma pequena redução no tempo de ciclo

pode afetar significativamente a produtividade dos caminhões. Portanto, reduzindo a resistência ao rolamento, tem-se como resultado a redução do custo por tonelada.

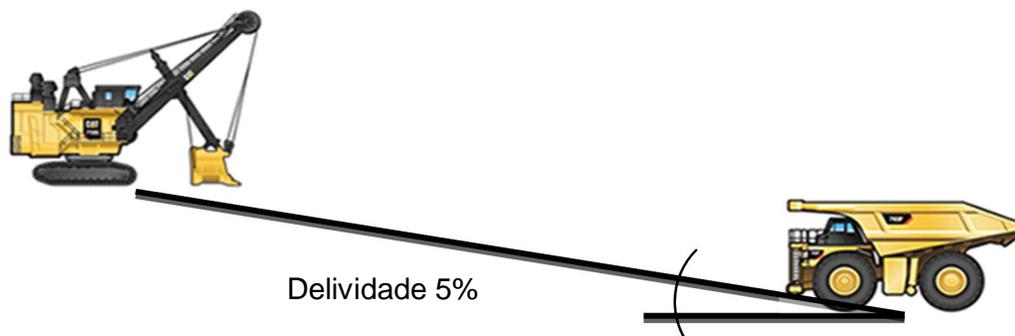
Figura 80 - Impacto da qualidade das estradas na produção e custo.



Fonte: Relatório Influência da Resistência ao Rolamento na Produtividade e Custo, Sotreq/Cat,2013

Caso simulado no *software Fleet Production and Cost Analysis (FPC)* para demonstrar a influência da resistência ao rolamento no custo da produção do caminhão 793F CAT – Rampa com 5% de declividade, variação da resistência ao rolamento de 0 a 6%.

Figura 81 - Impactos da resistência ao rolamento.



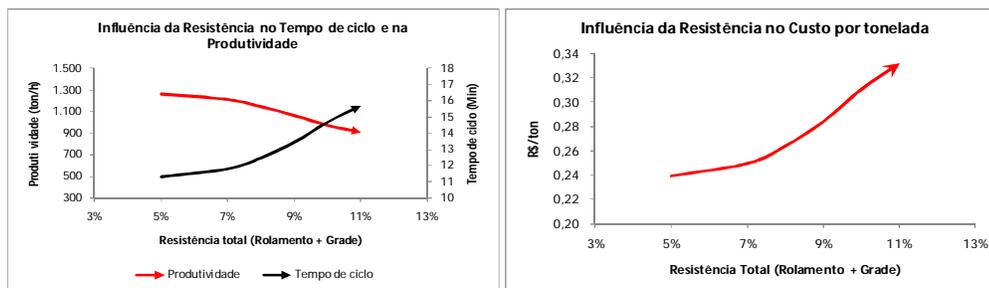
Fonte: Relatório Influência da Resistência ao Rolamento na Produtividade e Custo, Sotreq/Cat,2013

Tabela 17 - Resistência total VS tempo de ciclo VS produtividade VS custo R\$/t.

Grade	Resistencia Rolamento	Resistencia Total	Tempo de ciclo	Produtividade	VPL (BRL/TON)
5%	0%	5%	11	1.270	139%
5%	2%	7%	12	1.218	133%
5%	3%	8%	13	1.152	126%
5%	4%	9%	13	1.070	117%
5%	5%	10%	15	979	107%
5%	6%	11%	16	916	100%

Fonte: Relatório Influência da Resistência ao Rolamento na Produtividade e Custo, Sotreq/Cat,2013

Figura 82 - Impacto da resistência total ao rolamento na produção e custo.



Fonte: Relatório Influência da Resistência ao Rolamento na Produtividade e Custo, Sotreq/Cat,2013

Comprova-se que numa estrada com rampa de 5% de inclinação, a medida que é aumentado a resistência ao rolamento, todos os indicadores sofrem impacto negativo, ou seja: pioram.

As qualidades construtivas das estradas causam impactos em: custos operacionais, produção, fadiga dos operadores, vida útil dos pneus, estruturas do chassi, produtividade dos equipamentos de transporte e carga, clima organizacional, imagem da empresa e na alimentação da usina. Estes aspectos tornam as estradas fundamentais na sustentabilidade do negócio mineração, por este motivo devem ter tratamento específico e sistemático.

### 3.3 APLICAÇÃO DOS TRATORES DE ESTEIRA NO EMPILHAMENTO DO ESTÉRIL

Para abordar os ganhos de produtividade dos tratores de esteira na disposição de estéril, deve-se apresentar dois fatores importantíssimos na construção de estradas nas pilhas de estéril e na operação dos tratores de esteira no empilhamento do estéril, que são: a altura do banco e distância de parada do caminhão (eixo traseiro) até a crista do banco.

Quanto mais alto for o banco de disposição de estéril, menos estradas são construídas, mas, maior será a distância de parada do caminhão para basculamento da carga até a crista do banco, conseqüentemente menor produção do trator de esteira. Quanto menor a altura do banco na pilha de estéril, maior será a demanda de estradas, mas, menor será a distância de parada do caminhão para basculamento da carga até a crista do banco, conseqüentemente maior produção do trator de esteira no empilhamento.

Estes dois elementos devem ser balanceados para não comprometer a segurança da operação (queda de caminhão e/ou trator durante a operação) ou custo do empilhamento do estéril.

### **3.3.1 Definição da altura do banco da pilha de estéril**

#### **3.3.1.1 Localização**

Os estudos apresentados a seguir, se referem a todas as pilhas de estéril do Complexo Minerador de Carajás.

#### **3.3.1.2 Objetivo**

Este estudo tem o objetivo de apresentar os diversos fatores de segurança com base nas diversas geometrias operacionais de disposição de estéril. Apresentando de forma clara os riscos envolvidos em cada geometria praticada.

#### **3.3.1.3 Avaliação**

Para a realização dos estudos de estabilidade foram modeladas quatro geometrias operacionais, todas apresentando ângulo de face igual de 34° (próximo ao ângulo de repouso) e com alturas variáveis, sendo 20, 30, 40 e 50 metros as alturas de banco avaliadas. Além dos taludes operacionais foi realizado o estudo de estabilidade de um talude rebatido, com 26,6° e 20 metros de altura.

Os estudos de estabilidade seguem as recomendações da NBR 13.029/2006, que indica que taludes individuais tenham no mínimo um fator de segurança igual ou superior a uma unidade e meia ( $FS > 1,50$ ), isto para taludes finais. Para os taludes operacionais a referida norma não é clara quanto ao fator de segurança a ser adotado, ficando desta forma a avaliação crítica a cargo da empresa responsável pelo empreendimento. Entretanto, esta definição não é relevante levando-se em consideração a metodologia de disposição de estéril recomendada pela VALE na forma do **PRO-00008-0** (ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA IMPLANTAÇÃO DE PILHAS DE ESTÉRIL), que recomenda a disposição pelo método ascendente, ou seja, construção de baixo para cima. Desta maneira os bancos inferiores das pilhas devem ser imediatamente rebatidos após a conclusão dos mesmos. A construção por este método, entre outros fatores positivos, minimiza o tempo de exposição dos taludes com ângulos operacionais, tornando aceitável desta forma à adoção de um fator de segurança inferior a 1,50 para estes taludes operacionais (provisórios).

Para a realização dos estudos de estabilidade nas alternativas propostas foi utilizado o *software SLIDE v.5.0*, da empresa canadense Rocscience Inc. O *SLIDE v.5.0* é um *software* que utiliza a teoria do equilíbrio limite para o cálculo do fator de segurança em taludes de solo e/ou rocha. Foram pesquisadas superfícies circulares de ruptura adotando-se o método de Bishop, que admite o equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo.

Um dos maiores desafios da geotecnia moderna de pilhas de estéril heterogêneo é a definição de um único parâmetro de resistência ao cisalhamento (coesão,  $c'$  e ângulo de atrito,  $\phi'$ ), assim como o peso específico,  $\gamma$ , do mesmo na umidade natural.

Diante deste contexto foram realizadas análises estatísticas considerando uma variação dos parâmetros de resistência característicos dos materiais estéreis provenientes das minas de N4 e N5, conforme apresentado na Tabela 18 abaixo;

Tabela 18 - Parâmetros Geotécnicos (material inconsolidado).

LITOLOGIA	$\gamma$ KN/m <sup>3</sup>	$c'$ KN/m <sup>2</sup>	$\phi'$
Estéril (mínimo)	20	5	26°
Estéril (média)	20	10	28°
Estéril (máximo)	20	15	30°

Fonte: Leopoldo, 2009.

$\gamma$  = Peso específico;  $c$  = coesão;  $\phi$  = ângulo de atrito.

### 3.3.1.4 Resultados e Recomendações

A tabela 19, apresenta, de forma resumida, os fatores de segurança calculados para as diversas geometrias.

Tabela 19 - Resumo dos resultados

Etapa	Geometria		Fator de Segurança			Risco de Ruptura
	Ângulo de Face	Altura (m)	Mínimo	Média	Máximo	
Operacional	33°	20	1,00	1,22	1,45	0,00%
Operacional	33°	30	0,93	1,11	1,29	6,91%
Operacional	33°	40	0,90	1,06	1,22	18,02%
Operacional	33°	50	0,88	1,03	1,17	30,64%
Acabado	26,6°	20	1,25	1,51	1,76	0,00%

Fonte: Leopoldo, 2009.

Com base nos resultados apresentados na

Tabela 19 e na política de segurança da VALE, fica comprovado geotecnicamente que taludes operacionais e acabados com altura igual a 20 metros são estáveis e seguros. Ficam evidenciados também os riscos de uma eventual ruptura no caso de disposições em alturas superiores a 20 metros.

Ressaltamos que este estudo foi realizado considerando apenas as análises entre bancos, devendo as análises globais das pilhas serem realizadas individualmente, vale ressaltar também que não foram consideradas condições severas, ou seja, com a presença de nível d'água, sendo os materiais considerados em sua umidade natural.

Diante do descrito anteriormente, é de fundamental importância que o método construtivo das pilhas de estéril sejam rigorosamente seguidos, eliminando desta forma riscos desnecessários. Não foram considerados neste estudo os riscos inerentes ao processo operacional (basculamento + espalhamento) nas pontas de aterro, mas é certo que: quanto maior a altura do talude maior será a tendência do material constituinte do aterro aumentar o grau de inconsolidação, sendo o risco de acidentes no ato da disposição diretamente ligada à altura dos taludes.

Também vale ressaltar que a disposição de estéril de forma ascendente e controlada contribui consideravelmente para a minimização de riscos geotécnicos, como a formação de zonas de alagamento sobre a pilha, processos erosivos por falta de geometria drenada, carregamento excessivo de finos para jusante da pilha, rupturas localizadas por saturação, rupturas motivadas por processos erosivos, impacto visual, perda de condição operacional no período chuvoso, entre outros.

Além da minimização dos riscos geotécnicos a formação ascendente e controlada dos depósitos permite um controle geotécnico mais apurado, pois, possibilita a instalação de instrumentos de controle (PZ's, INA's, etc), retaludamento e revegetação dos bancos inferiores, minimizando de forma significativa as manutenções constantes nos bancos e a amortização dos custos para desativação da pilha ao longo dos anos, pois, se seguido o projeto executivo, ao se completar o último banco da pilha ela estará pronta para a desativação.

### **3.3.2 Ponto de descarga do caminhão na pilha de estéril**

#### ***3.3.2.1 Objetivo***

Este estudo tem o objetivo de apresentar os riscos geotécnicos para distâncias distintas de basculamento nas cristas das pilhas de estéril de Carajás. Apresentando de forma clara os riscos envolvidos em cada situação estudada.

### 3.3.2.2 Avaliação

Para a realização dos estudos de estabilidade foram modeladas seis geometrias operacionais, todas apresentando ângulo de face igual a 33° (próximo ao ângulo de repouso) e com alturas fixa de 20 metros. A diferença entre as geometria é a distância de basculamento dos caminhões “fora estrada”, distância variando de 8 metros a 2 metros. Para este estudo foi considerado um caminhão tipo 793 de 200t.

Para a realização dos estudos de estabilidade nas alternativas propostas foi utilizado o software *SLIDE* v.5.0, da empresa canadense *Rocscience Inc.* O *SLIDE* v.5.0 é um software que utiliza a teoria do equilíbrio limite para o cálculo do fator de segurança em taludes de solo e/ou rocha. Foram pesquisadas superfícies circulares de ruptura adotando-se o método de Bishop, que admite o equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo.

Uma dos maiores desafios da geotecnia moderna de pilhas de estéril heterogêneo é a definição de um único parâmetro de resistência ao cisalhamento (coesão,  $c'$ , e ângulo de atrito,  $\phi'$ ), assim como o peso específico,  $\gamma$ , do mesmo.

Diante desta realidade, foram realizadas análises estatísticas considerando uma variação dos parâmetros de resistência característicos dos materiais estéreis provenientes das minas de N4 e N5, conforme apresentado na Tabela 20 abaixo:

Tabela 20 - Parâmetros Geotécnicos (material inconsolidado).

LITOLOGIA	$\gamma$ KN/m <sup>3</sup>	$c'$ KN/m <sup>2</sup>	$\phi'$
Estéril (mínimo)	20	5	26°
Estéril (média)	20	10	28°
Estéril (máximo)	20	15	30°

Fonte: Leopoldo, 2009.

$\gamma$  = Peso específico;  $c$  = coesão;  $\phi$  = ângulo de atrito.

### 3.3.2.3 Resultados e Recomendações

A Tabela 21 a seguir apresenta de forma resumida os fatores de segurança calculados para as diversas condições.

Tabela 21 - Resumo dos resultados.

Distância de Basculamento	F.S.			Risco de ruptura
	Mínimo	Média	Máximo	
8 metros	1,00	1,19	1,38	0,00%
7 metros	0,98	1,16	1,34	0,80%
6 metros	0,96	1,14	1,33	3,12%
5 metros	0,93	1,12	1,31	7,33%
4 metros	0,91	1,10	1,29	11,57%
2 metros	0,84	1,03	1,23	36,80%

Fonte: Leopoldo, 2009.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 21 e na política de segurança da VALE, fica comprovado geotecnicamente que basculamentos com distâncias inferiores a 8 metros da crista apresentam riscos operacionais.

### 3.3.3 Aplicação dos tratores de esteira – estudo de caso 4

#### 3.3.3.1 Introdução

A metodologia para apuração das produtividades dos tratores de esteira D11 e D475 nas pilhas de estéril é apresentada na Figura 83.

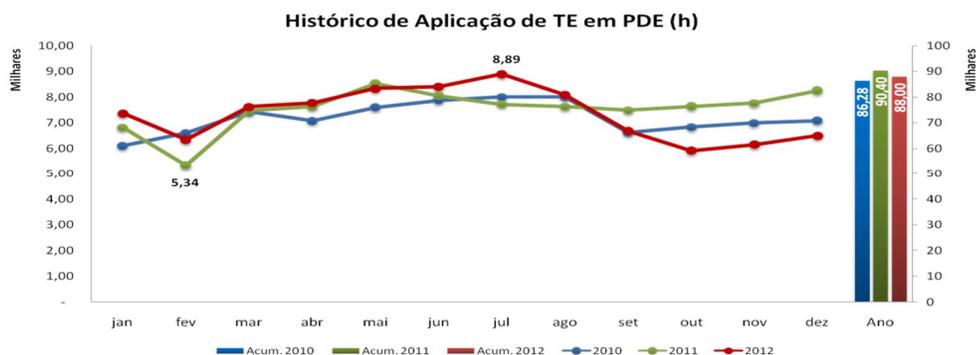
Figura 83 - Metodologia produtividade dos tratores de esteira D11 e D475 nas pilhas de estéril.



Fonte: Relatório Engenharia de Mina, Gestão Econômica e Despacho, 2012.

O gráfico da Figura 84 apresenta o histórico das horas trabalhadas dos tratores de esteira D11 e D475, em pilhas de estéril, nos anos de 2010, 2011 e 2012, mensalmente e anualmente.

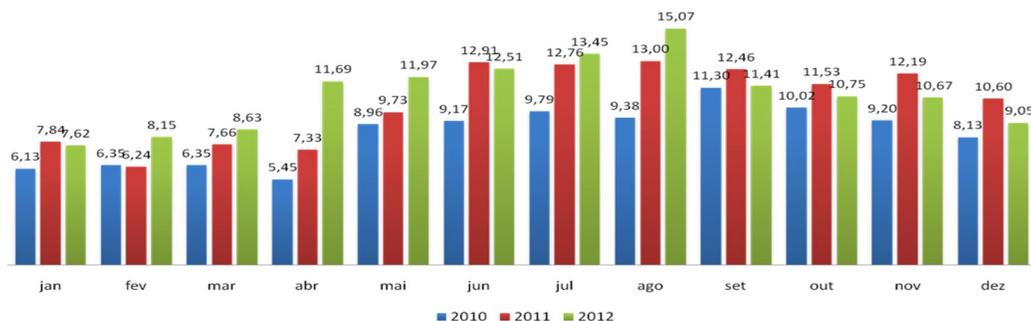
Figura 84 - Histórico das horas trabalhadas dos tratores de esteira D11 e D475.



Fonte: Relatório Engenharia de Mina, Gestão Econômica e Despacho, 2012.

O gráfico da Figura 85 apresenta a produção de estéril em milhões de toneladas nos anos de 2010, 2011 e 2012, mensalmente.

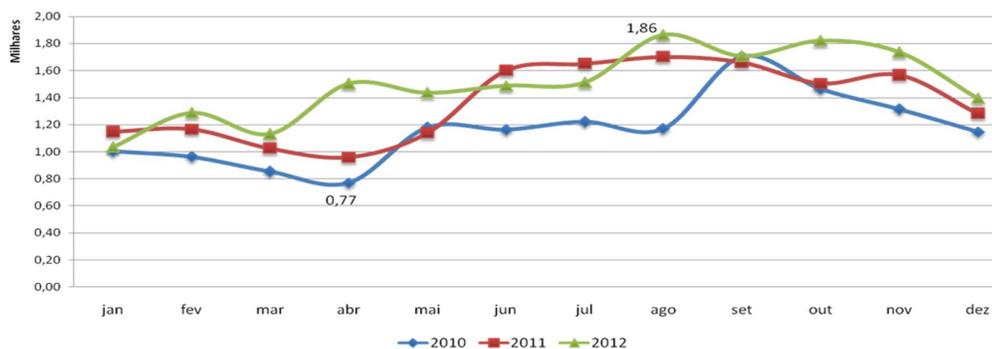
Figura 85 - Movimentação de estéril em milhões de toneladas.



Fonte: Relatório Engenharia de Mina, Gestão Econômica e Despacho, 2012.

O gráfico da Figura 86 apresenta o comparativo da produtividade horária mensal dos tratores D11 e D475, nos anos de 2010, 2011 e 2012. Observa-se que a produtividade em 2012 foi quase que sistematicamente superior a produtividade 2011 e a produtividade em 2010 foi a menor quase que sistematicamente à produtividade de 2010.

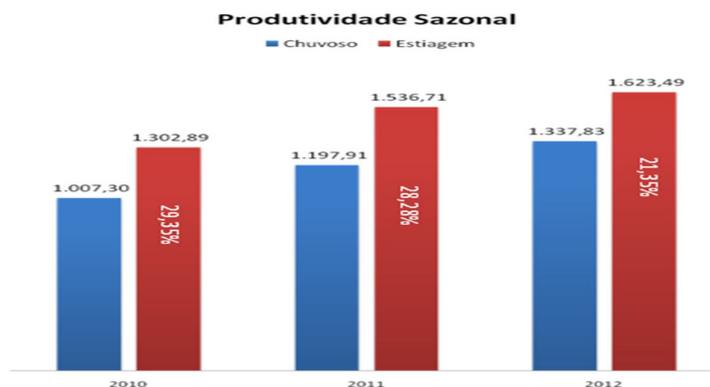
Figura 86 - Comparativo da produtividade horária mensal dos tratores D11 e D475.



Fonte: Relatório Engenharia de Mina, Gestão Econômica e Despacho, 2012.

O gráfico da Figura 87 apresenta a produtividade do trator de esteira na pilha de estéril sazonal ( estação chuvosa e seca), onde a produtividade na estação seca é de 21 a 30% superior à produtividade na estação chuvosa.

Figura 87 - Produtividade sazonal dos tratores.



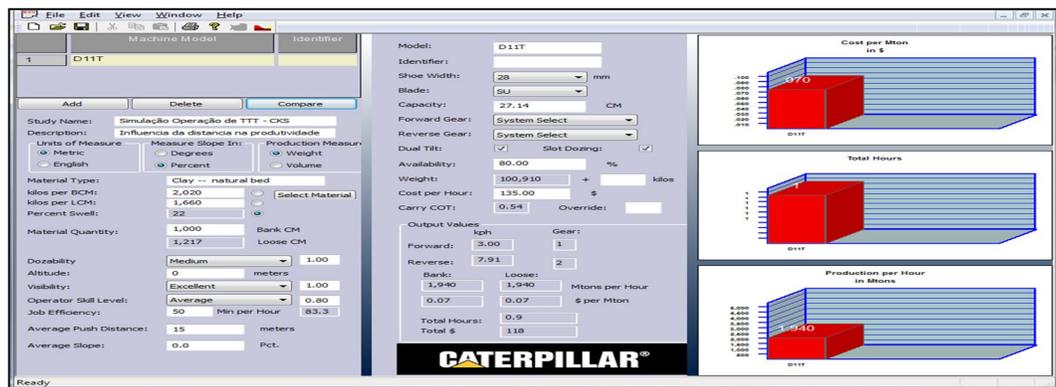
Fonte: Relatório Engenharia de Mina, Gestão Econômica e Despacho, 2012.

A produtividade na estação chuvosa é menor devido à umidade do material que o torna mais fluido, consequentemente aumenta a deformabilidade do mesmo, reduzindo o ângulo de repouso e a capacidade em volume de transporte da lâmina do trator. Aumenta a DMT do trator, aumentando o tempo variável de transporte, pois o caminhão faz a descarga do estéril a uma distância maior da ponta de aterro na pilha, devido à condição operacional. As duas condições se somam, a umidade que reduz o ângulo de repouso do material, mais a distância do local onde o caminhão faz a descarga até a ponta de aterro.

### 3.3.3.2 Influência da Distância na Produtividade do Trator

Para simularmos a influência da distância média de transporte na produtividade do trator utilizamos o DOZSIM, *software* de modelagem desenvolvido pela divisão de tratores da CAT. Na Figura 88, tem-se uma tela do programa com as premissas e a produtividade simulada.

Figura 88 - Tela de Simulação do Software DOZSIM.



Fonte: Caterpillar/Sotreq, 2013.

Como premissas para simular a produtividade, utilizamos os fatores de correção na Tabela 22.

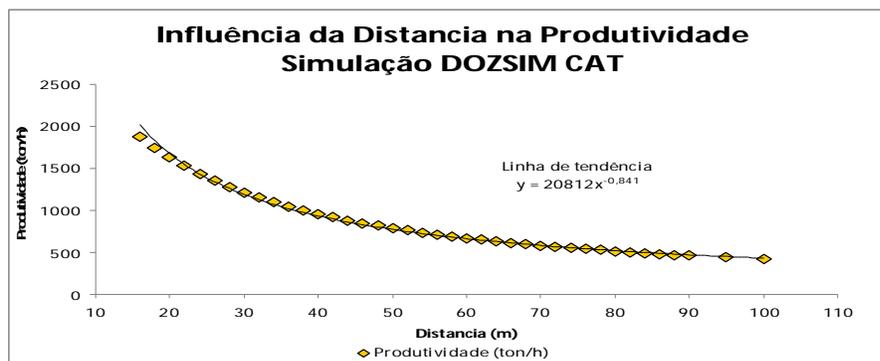
Tabela 22 - Fatores de correção.

Fatores de Correção					
Dozability	Altitude	Visibility	OperatorSkillLevel	JobEfficiency	Availability
Medium (100%)	0-760 m	Excelent	Average (80%)	83%	80%

Fonte: Caterpillar/Sotreq, 2013.

No gráfico da Figura 89, pode-se verificar como o aumento da Distância Média de Transporte (DMT) promove o decréscimo da produtividade. Quando variamos a DMT de 15 metros para 30 metros a produtividade sofre uma redução de quase 40% segundo o DOZSIM.

Figura 89 - Influência da distância na produtividade dos tratores CATD11.



Fonte: Relatório Influência da Distância na Produtividade, Vale Caterpillar/Sotreq, 2013.

Observe que entre a DMT de 15 a 30 m o ângulo de inclinação da curva é bem mais acentuado que nas distâncias maiores, mostrando que cada metro causa impacto significativo na produtividade, neste intervalo simulado. Pode-se observar, na tabela 23, obtida através do simulador DOZSIM – CAT, que entre a DMT de 20 e 38 m a produtividade do trator reduz de 1.632 t/h (1.623 t/h – produtividade no ano de 2012 na estação seca) para 999 t/h (1.007 t/h - produtividade no ano de 2010 na estação chuvosa). Isto mostra que uma diferença de 18 m na DMT, mais a umidade do material devido à chuva, causa um impacto de 61% na produtividade dos tratores D11.

Tabela 23 - Produtividades simuladas conforme a DMT.

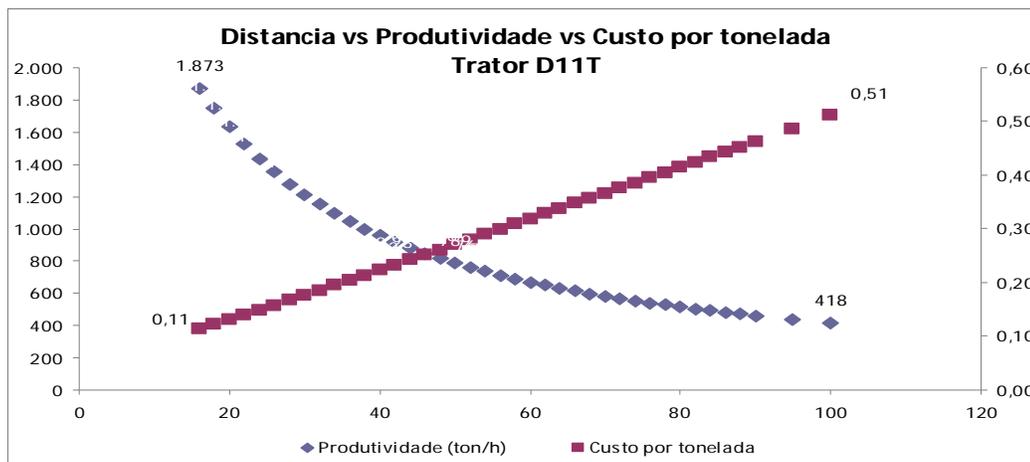
DMT (m)	Prod. (t/h)	DMT (m)	Prod. (t/h)	DMT (m)	Prod. (t/h)
15	1940	32	1151	64	632
16	1873	34	1095	66	615
17	1808	36	1045	68	598
18	1747	<b>38</b>	<b>999</b>	70	583
19	1688	40	957	72	568
<b>20</b>	<b>1632</b>	42	918	74	554
21	1579	44	882	76	540
22	1529	46	848	78	528
23	1481	48	818	80	515
24	1436	50	789	82	504
25	1394	52	762	84	493
26	1353	54	737	86	482
27	1315	56	713	88	472
28	1279	58	691	90	462
29	1244	60	670	95	439
30	1212	62	651	100	418

Fonte: Relatório Influência da Distância na Produtividade, Vale Caterpillar/Sotreq, 2013.

Deve-se também atentar para a distância mínima de parada do caminhão para a descarga até a ponta de aterro na pilha de estéril, como mostrado no item 3.3.2 – Ponto de descarga do caminhão, onde foi estabelecido uma distância mínima de 8 m, local onde o risco de ruptura é zero. Isto mostra que pode-se conciliar produtividade com segurança, desde que seja estudado as variáveis envolvidas em cada processo de forma criteriosa e assertiva.

Para determinar o custo do trator D11T, buscou-se os custos horários de combustível, material de desgaste e operação, os quais foram fornecidos pela Engenharia de Operação Vale (consumos horários) e os custos das peças durante os 9 anos de operação dos equipamentos, com o fabricante, neste caso a Caterpillar, através do distribuidor nacional Sotreq (curva de peças). Para efeito comparativo os custos CAPEX (capital) e OPEX (operação) foram lançados no fluxo de caixa durante os 9 anos e atualizados através da função VPL. O gráfico foi construído para demonstrar a evolução do custo e da produtividade, conforme o aumento da DMT para o trator D11T.

Figura 90 - DMT x Custo x Produção horária dos tratores CAT D11.



Fonte: Relatório Influência da Distância na Produtividade, Vale Caterpillar/Sotreq, 2013.

Pode-se observar na figura 90 que o custo por tonelada empilhada aumenta linearmente com o aumento da DMT, o que demonstra a sensibilidade do custo de disposição de material estéril à distância de transporte.

### 3.4 PONTO ÓTIMO DE DESCARGA NAS PILHAS DE ESTÉRIL – CASO 5

Para se obter o menor custo na disposição do estéril, como será apresentado neste estudo, deve-se balancear a menor DMT para os caminhões que o transportam e a menor DMT para os tratores que executam a disposição do mesmo na pilha.

A operação transporte é responsável por 50% do custo total de lavra, ou seja, deve-se ter muita atenção e zelo pela mesma. A DMT é o aspecto de maior impacto no transporte, por este motivo o controle e/ou redução da mesma deve sempre ser considerado. Outros fatores importantes salientados anteriormente, como a qualidade da pista, que se reflete em resistência ao rolamento, controle de particulado, drenagem, largura, obstáculos e sinalização, também são responsáveis por impactos nos custos operacionais.

Outro aspecto que deve ser considerado é a disposição constante em local apropriado nas pilhas de estéril. Isto só é conseguido, se houverem no mínimo dois pontos distintos para receber a descarga dos caminhões na pilha de estéril de menor DMT, e se, pelos menos, um dos locais estiver sempre em condições operacionais. Quando esta condição não é atendida, os caminhões e/ou os equipamentos de carga ficam parados por falta de alternativa de disposição de material; neste momento, o custo por tonelada produzida de estéril cresce exponencialmente, pois há equipamentos aptos para produzir e não há produção.

Como garantir a menor DMT para os caminhões nas pilhas de estéril:

- deve-se fazer a disposição conforme o plano de disposição de estéril, gerando a menor DMT média, ou seja: o estéril deve ser direcionado para a pilha mais próxima (pilha ótima);
- as estradas de acesso à pilha ótima devem estar em boas condições de rolamento, constantemente para que a disposição ocorra sem interferências, para isto, sugere-se a existência de no mínimo duas estradas de acesso para que permita a garantia de acesso continuamente, pois se uma estiver em manutenção e/ou reparo, a outra deverá estar liberada – garantia de acesso;
- nunca fazer a manutenção e/ou reparo simultaneamente nas duas estradas para eliminar as interferências, melhorar a produtividade dos caminhões e reduzir os riscos de acidentes;
- como o estéril das minas de ferro de Carajás possui mais de 80% de máfica decomposta, é fundamental que a construção da estrada siga as orientações contidas neste estudo (Dimensionamento das camadas do pavimento das estradas nas minas de ferro de

Carajás), principalmente na estação chuvosa. O ideal é fazer as estradas principais sempre dentro do padrão aqui estabelecido e durante a estação seca para que a mesma tenha tempo de cura e menor resistência ao rolamento, mesmo no período chuvoso – qualidade da pista;

- garantia de disponibilidade de material para base e revestimento do pavimento;
- garantia do menor custo e maior produtividade para os caminhões.

Como garantir a menor DMT para os tratores de esteira nas pilhas de estéril:

- garantir o acesso para o caminhão, o mais próximo da crista do banco em operação, ou seja: DMT entre 8 m e 20 m – maior que 8 m para não haver risco de queda do caminhão na ponta de aterro durante a descarga do mesmo e menor que 20 m para não haver impacto negativo na produção do trator (garantia da produtividade);

- mantendo a praça de descarga em boas condições e atendendo a exigência anterior. Para que isto ocorra, a praça deve ser construída conforme o padrão mencionado neste estudo – garantia de qualidade da praça;

- mantendo as praças de descarga do caminhão na pilha ótima em boas condições de rolamento constantemente para que a disposição ocorra sem interferências. Para isto, deve-se ter no mínimo duas praças para que permita a garantia de operação continuamente, pois se uma estiver em manutenção e/ou reparo, a outra deverá estar liberada – garantia de acesso à praça de descarga;

- nunca fazendo a manutenção e/ou reparo simultaneamente nas duas praças para eliminar as interferências, melhorar a produtividade dos tratores e reduzir os riscos de acidentes;

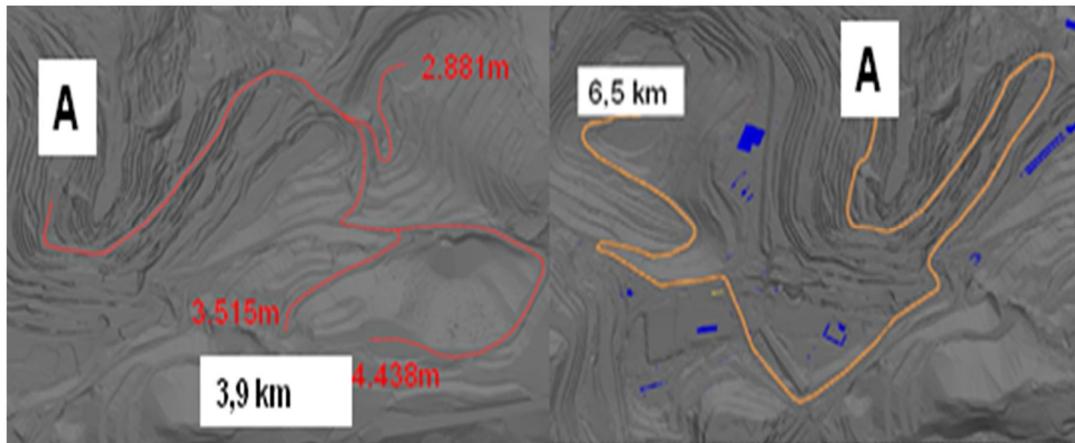
- disponibilizando material para base e revestimento do pavimento;

- disponibilizando tratores nas pilhas de estéril para fazer a disposição, evitando o excesso de material a ser disposto, conseqüentemente aumentando a DMT do trator e reduzindo sua produtividade;

- gerenciando para atingir o menor custo de disposição do estéril.

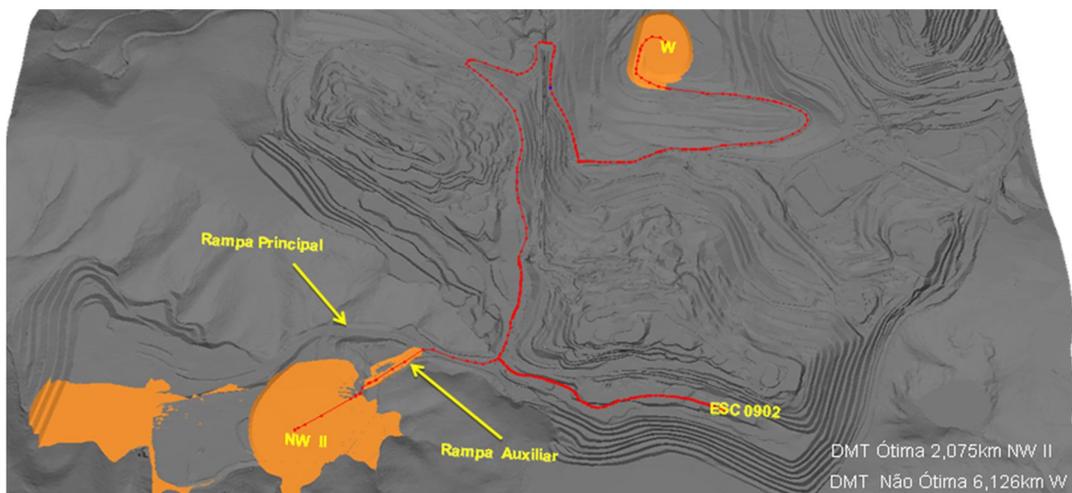
- Estudo de caso

Figura 91 - Pontos ótimos de descarga e não ótimos da aba sul da Mina de N4E.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

Figura 92 - Pontos ótimos de descarga e os não ótimos da Mina de N4WN.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2012.

Tabela 24 - Cálculos de ciclo VS custos VS produtividade.

	Rolling Resistance 2%		Grade pct 5%	
	N4W - D(2,075KM) Ótima	N4W - D(6,126KM) Não Ótima	N4E - D(3,9KM) Ótima	N4E - D(6,5KM) Não Ótima
Hauler Cycle time				
Load with Exchange (Min)	2,25	2,25	2,25	2,25
Haul (Min)	5,92	7,54	11	18,23
Dump and Maneuver (Min)	1,2	1,2	1,2	1,2
Return (Min)	2,45	6,93	4,47	7,34
Potential Cycle Time (Min)	11,82	17,92	18,92	29,03
Productivity (ton/h)	1.218,27	803,57	761,10	496,04
	Diference	↑ 152%	Diference	↑ 153%

Fonte: Relatório Pilha Ótima, Vale, Caterpillar/Sotreq, 2013.

A tabela 24, comprova as vantagens da pilha de estéril ótima, as que são:

- menor DMT para o caminhão;
  - maior produtividade do caminhão;
  - menor custo de transporte;
  - menor DMT para o trator;
  - maior produtividade para o trator;
  - menor custo de disposição;
  - menor distância de locomoção dos tratores, não demandando necessidade do uso de carreta para esta operação;
- menor demanda de carretas para transporte de tratores;
  - menor necessidade de caminhões e tratores;
  - menor necessidade de operadores;
  - prevenção à perda – falta de pilha para disposição de estéril;
  - menor risco de acidente.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 ESTABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DOS TALUDES – RECONFIGURAÇÃO DO TALUDE – ESTUDO DE CASO 1

A reconfiguração de talude mostrou-se viável e sustentável nos aspectos apresentados no estudo de caso: econômico, segurança, social, ambiental e regulatório.

#### 4.1.1 Econômico e recuperação de minério

O resultado financeiro vem da geometria da cava, gerando maior recuperação do minério, conforme configuração de projeto.

A Tabela 25 mostra o minério recuperado e a margem operacional líquida gerada pela comercialização do mesmo, apenas nas áreas onde foi executado a reconfiguração do talude, nas cavas de N4E e Cava II de N4WN, ainda falta mais 60% da área para ser trabalhada (reconfigurada). Significa dizer que o resultado apresentado na tabela é apenas parte do ganho real, pois se esta operação não fosse realizada, este minério não seria recuperado e consequentemente, não geraria a receita que gerou esta margem operacional.

Tabela 25 - Margem operacional líquida – Ebitda.

<b>Cavas Parcialmente Reconfiguradas - N4E e N4WN</b>	
<b>Minério recuperado (t)</b>	<b>3.937.276,00</b>
<b>Margem Ebitda (US\$/t)</b>	<b>43,70</b>
<b>Recuperação em massa</b>	<b>0,92</b>
<b>Ganho (US\$)</b>	<b>158.294.244,30</b>

Fonte: Vieira, 2013.

Este resultado é muito conservador. É a margem oficial utilizada pela Vale, com o preço do minério de ferro de mercado de US\$105.00/t.

#### 4.1.2 Segurança, social, ambiental e regulatório.

Segurança, regulatório e ambiental, possibilita o atendimento à NR 22, referente ao Programa de Gerenciamento de Riscos – PGR, onde é listado os riscos de estabilidade do

maciço e utilização de máquinas, equipamentos e veículos. A reconfiguração do talude possibilita a limpeza da superfície do mesmo, eliminando os riscos de queda de blocos. Permite a execução conforme o projeto e, conseqüentemente, atende à solicitação dos especialistas em estabilidade de talude que fizeram o projeto, neste caso a empresa Geoestrutural. Melhoria do Fator de Segurança (FS) e, conseqüentemente, reduz a probabilidade de ruptura e/ou deslizamento de material do talude.

Outro ganho de difícil mensuração é a configuração das estradas de acesso às praças de carregamento de minério e estéril, aos locais de alimentação da usina e às pilhas de estéril, garantindo a largura das mesmas, conseqüentemente o atendimento à NR22, melhorando a produtividade dos equipamentos de transporte e eliminando o risco de paralisação da lavra ou da produção em qualquer local.

A redução do risco estrutural (queda de blocos, ruptura e/ou deslizamento de material) e a garantia da geometria de projeto garantem o atendimento à NR 22, elimina o risco de autuação por Órgãos Reguladores e melhora a imagem da empresa junto à comunidade e o mercado. Alinhamento da operação aos valores Vale: “a vida em primeiro lugar, agir de forma correta e fazer acontecer”.

Este alinhamento também reduz o tempo gasto na tramitação de documentos para licenciamento de áreas pelos Órgãos Reguladores e melhora o clima da equipe de operação, pois reduz o estresse do empregado.

Os ganhos com a reconfiguração de talude são apresentados de forma resumida a seguir:

- 1- garantia da recuperação da reserva de minério medida e provada;
- 2- melhoria da estabilidade do talude, maior fator de segurança (FS);
- 3- melhoria da acessibilidade aos bancos (bermas conforme projeto);
- 4- melhoria da drenagem superficial;
- 5- controle das erosões;
- 6- redução de bombeamento, menor consumo de energia;
- 7- garantia dos acessos operacionais, largura e segurança;
- 8- redução da probabilidade de queda de blocos e de acidentes;
- 9- redução da probabilidade de ruptura e/ou colapso do talude;
- 10-retorno financeiro;
- 11-melhoria da imagem da empresa;
- 12-confiança do mercado.

**Geometria,  
Estrutural  
e Operacional**

**Econômico  
e  
Regulatório**

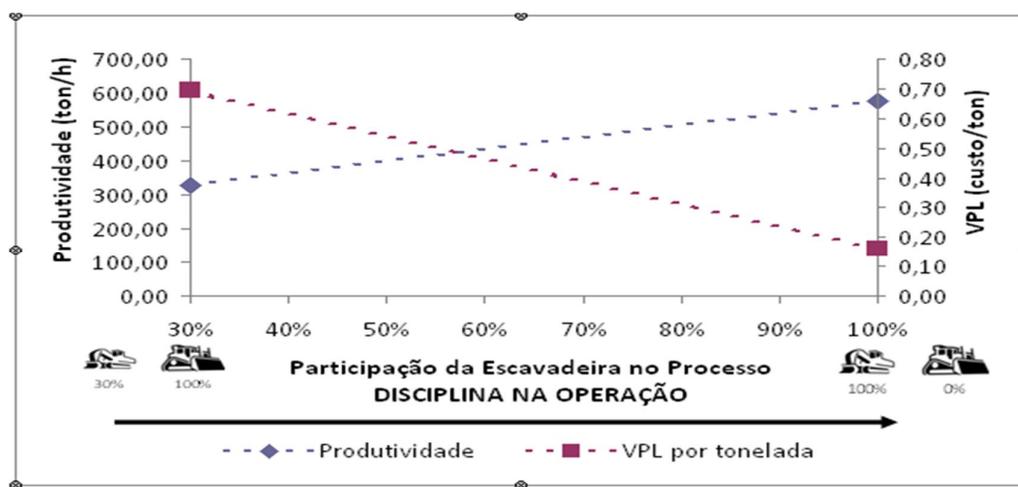
Todos os ganhos mencionados foram obtidos e comprovados através da metodologia proposta por esse estudo, demonstrando que o processo de reconfiguração do talude é sustentável em todas as dimensões apresentadas.

#### 4.2 UTILIZAÇÃO DE TRATOR DE ESTEIRA E/OU RETROESCAVADEIRA NA RECONFIGURAÇÃO DE TALUDE – ESTUDO DE CASO 2

Neste estudo de caso ficou demonstrado que pode-se melhorar o desempenho da operação variando amplamente conforme os equipamentos e/ou combinações aplicados, o método utilizado, a disciplina estratégica, tática e operacional.

A seguir, é apresentado na Figura 93 o intervalo de desempenho que se pode operar e consequentemente sua produtividade e custo por tonelada de forma clara, dependendo da participação da retro-escavadeira na produção desta atividade.

Figura 93 - Produtividade vs custo vs Participação trator/retro-escavadeira.



Fonte: Relatório CI, Vale/Sotreq, Melhoria no Processo de Estabilização de Taludes, 2012.

Outro aspecto importante a ser observado é que quanto mais efetivo é o processo, maior será a tecnologia embarcada e a disciplina necessária para que a execução possa ser a melhor (mais efetiva); mais produtiva e sustentável (menor custo), ou seja: a retro-escavadeira precisa estar no mesmo banco da lavra, não necessitando tombamento do material pelo trator para os bancos inferiores ou de lavra. A largura operacional da berma onde está posicionada a retro-escavadeira deverá ser suficiente para permitir a condição de operação e para sua sustentação estrutural, permitindo o lançamento de sua produção na praça de carregamento.

Rigor no acompanhamento da topografia para não haver avanço no talude de projeto. “Fazer a operação correta, de forma correta, na hora certa (on-time)”.

Observa-se que a operação mais segura, neste caso também é a mais efetiva, pois o trator não trabalha na sua condição de melhor desempenho, mas a retro-escavadeira, trabalha quase na sua máxima capacidade de produção, com giro pouco maior que 90° e de frente para o talude, permitindo ao operador total controle da operação.

A Tabela 26 mostra que há uma diferença de custo por tonelada reconfigurada de R\$0,54, dependendo da participação de trator e/ou retro-escavadeira, gerando uma redução de custo de US\$4.236.818,00 nas áreas analisadas que representam apenas parte do todo e no período também analisado. Ou seja, a redução de custo é muito maior que este valor apresentado na tabela 26, pois o processo de reconfiguração de talude é contínuo durante a vida útil do empreendimento.

Tabela 26 - Comparação custo Trator VS Retro-escavadeira.

<b>Comparação de Custo (Trator - Retro)</b>	
<b>Material Reconfigurado N4E (t)</b>	<b>7.508.887,00</b>
<b>Material Reconfigurado N4WN (t)</b>	<b>8.221.115,00</b>
<b>Material Total (t)</b>	<b>15.730.002</b>
<b>Custo - 100% trator (R\$/t)</b>	<b>0,70</b>
<b>Custo - 100% Retro (R\$/t)</b>	<b>0,16</b>
<b>Diferença de custo (R\$/t)</b>	<b>0,54</b>
<b>Redução de Custo (R\$)</b>	<b>8.473.636</b>
<b>Redução de Custo (US\$)</b>	<b>4.236.818</b>

Fonte: Vieira, 2013.

#### 4.2.1 Dimensionamento das camadas do pavimento das estradas – estudo de caso 3

Este estudo mostra que, o critério, a padronização e o rigor no dimensionamento, projeto e construção de estradas de mina, melhora consideravelmente o desempenho dos equipamentos de transporte, principalmente na estação chuvosa que pode variar de cinco meses a sete meses anualmente em Carajás.

Pode-se observar os ganhos em várias dimensões, tais como: financeira, produtiva, disponibilidade física dos caminhões, segurança, clima organizacional e regulatória.

A seguir são apresentados os ganhos quantificáveis:

- se compararmos com o método convencional utilizado na construção de estradas, com camadas compactadas a cada 20 cm, percebe-se uma grande simplificação, agilidade e efetividade nas fases de projeto, construção e manutenção. Redução na

diversidade de equipamentos aplicados e consequentemente custo. Construção durante todo o ano e não somente na estação seca;

- aumento considerável na capacidade de suporte de carga por eixo. As estradas mineiras de Carjás devem suportar até 400 toneladas por eixo;
- redução nas horas paradas dos caminhões totais de 30% no período de janeiro a junho no ano de 2012 em comparação ao mesmo período de 2011;
- aumento na produção/movimentação total de 10.891.166,45 toneladas no período de janeiro a junho no ano de 2012 em comparação ao mesmo período de 2011;
- ganho potencial de US\$296.849.632,78 considerando a margem EBITDA gerada pela venda do minério liberado com a produção do estéril a maior no período comparativo;
- ganho real de US\$10.006.652,59 considerando como se esta produção fosse executada pela empresa terceira U&M;
- contribuição para a melhoria da disponibilidade física dos caminhões nos anos de 2011 e 2012 em relação ao ano de 2010 de 3%. Posto que a introdução do padrão de pista foi iniciado em julho de 2011, reduzindo a resistência ao rolamento e consequentemente o esforço motor;
- redução do consumo de óleo diesel na frota de caminhões pela redução da resistência ao rolamento das estradas;
- melhoria das condições de segurança, através de melhor trafegabilidade, sinalização e visibilidade;
- redução da diferença de produção entre a estação seca e a chuvosa;
- melhoria no clima organizacional e saúde ocupacional, pela redução do estresse dos operadores com a melhoria das condições das pistas, tais como: controle de particulado, sinalização e trafegabilidade;
- maior agilidade no retorno das operações ao normal depois de chuvas intensas e/ou mau tempo;
- redução da dependência da produção do fator “condições climáticas”.

Este estudo de caso reforça também que a introdução de uma nova metodologia de estradas impacta positivamente a performance dos caminhões na produção e redução de custos, tornando o processo mais sustentável e estável.

Os resultados foram atingidos justamente no ano de maior precipitação pluviométrica (2012), considerando os demais anos acompanhados, demonstrando a eficiência do método de construção, manutenção e readequação das estradas, além do impacto positivo e significativo nos resultados de desempenho dos caminhões.

Como apresentado nesse estudo, tem-se um grande problema/desafio nas estradas de Carajás, a melhoria da qualidade e desempenho da camada de revestimento do pavimento. Não existe um material abundante e de baixo custo disponível que atenda às exigências de comportamento desta camada e a quantidade demandada pela malha viária das operações de mina. Este material deve suportar carga por eixo 10 vezes superior (4095 kN) à carga de suporte máxima das rodovias (441 kN) e ainda atender à temporalidade das estradas nas minas. Este problema afeta diretamente a vida útil dos pneus utilizados nas minas de Carajás. O material ideal deve ter uma granulometria entre 2 e 10 cm de diâmetro, para suportar a carga e não degradar, gerar material fino e/ou lama e, também aumentar a aderência dos pneus, reduzindo o deslizamento e aumentando a vida útil dos mesmos.

Outro aspecto importante é o relativo à sustentabilidade da empresa, pois com estradas melhores, a imagem da empresa e o clima organizacional melhoram. Estes fatores contribuem positivamente para a melhoria das relações com os Órgãos Fiscalizadores e com a sociedade, beneficiando a tramitação de processos de licenciamentos da operação e de novos projetos, fundamentais à continuidade das operações mineiras.

As estradas nas minas de Fe de Carajás são estratégicas para a garantia operacional. O custo de construção de acesso/estrada no período chuvoso nas pilhas de estéril, pode ser o dobro do custo da mesma estrada construída no período de seca.

#### **4.2.2 Influência da qualidade das estradas no custo da produção**

Como demonstrado, não basta ter o dimensionamento correto das camadas do pavimento das estradas, é necessário também que a camada de revestimento tenha baixa resistência ao rolamento e para que isto ocorra, o material da mesma deve ter as seguintes características:

- adequada trafegabilidade em condições climáticas variadas;
- redução da poeira excessiva no período seco;
- redução do piso escorregadio no período chuvoso;
- baixo custo e redução da necessidade de manutenção;

- granulometria entre 2 e 10 cm de diâmetro para maior capacidade de suporte, menor degradação e maior aderência dos pneus.

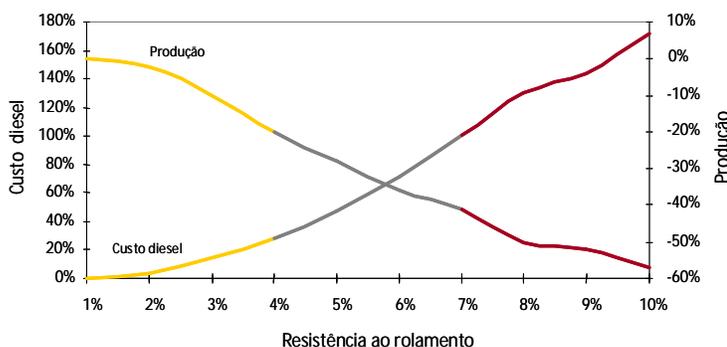
Outros elementos que impactam diretamente a qualidade da camada de revestimento do pavimento:

- drenagem – quanto mais profunda e eficiente (menor tempo de exposição à água), melhor;
- projeto/construção – curvas, superelevação, largura, greide;
- Controle de particulado;
- estruturação da camada de base. Quanto menos finos houver no material, melhor será sua permeabilidade (drenagem) e sua capacidade de suporte (atrito e embricamento) e menor deformação. A granulometria ideal deve estar entre 10 cm e 1,0 m de diâmetro para assegurar maior capacidade de suporte e menor deformação à camada de revestimento;
- manutenção e readequação.

A Figura 94 mostra que o consumo de diesel aumenta e a produção diminui com o aumento da resistência ao rolamento. Por este motivo, torna-se urgente e prioritário o projeto e a construção conforme padrão adequado, manutenção e readequação das estradas e das drenagens em qualquer operação de mineração.

A camada de revestimento do pavimento deve receber cuidado especial para um bom desempenho dos equipamentos de transporte, fadiga dos operadores, custos operacionais, produtividade e sustentabilidade do negócio.

Figura 94 - Relação Custo x produção x resistência ao rolamento.



Fonte: Relatório Influência da Resistência ao Rolamento na Produtividade e Custo, Sotreq/Cat,2013

### 4.3 APLICAÇÃO DOS TRATORES DE ESTEIRA NO EMPILHAMENTO DO ESTÉRIL – ESTUDO DE CASO 4

Este estudo pode ser considerado uma extensão do estudo de caso anterior, por estar diretamente conectado à melhoria que houve nas estradas das minas de Carajás que permitiu a descarga do caminhão mais próxima à crista do banco da pilha, reduzindo a DMT do trator de esteira que executa a disposição do estéril.

A Figura 95 apresenta a produtividade geral de trator de esteira nos anos de 2010 a 2012. A produtividade de 2011 foi 18,34% superior à produtividade de 2010. A produtividade de 2012 foi 8,27% superior à produtividade de 2011, ou seja: a produtividade de 2012 foi 28% superior à produtividade de 2010, com redução na DMT do trator de 12 m.

Figura 95 - Produtividade dos tratores nas pilhas de estéril nos anos de 2010 a 2012.



Fonte: Relatório Engenharia de Mina, Gestão Econômica e Despacho, 2012.

Este aumento gradativo anual na produtividade dos tratores, demonstra também a melhoria gradativa das estradas e praças das minas após a introdução do padrão de pistas.

Novamente, salienta-se que os resultados foram atingidos no ano de maior precipitação pluviométrica (2012) dos anos comparados, mostrando a eficiência do método de construção, manutenção e adequação das estradas e o impacto positivo e significativo nos resultados obtidos pelos tratores nas pilhas de estéril.

A Tabela 27 mostra o impacto da DMT na produtividade e custo por tonelada disposta pelo trator D11T com lâmina SU na pilha de estéril.

Tabela 27 - Produtividade vs custo vs DMT para tratores.

Distância (m)	Produtividade (t/h)	Custo por tonelada (R\$/t)
16	1.873	0,11
18	1.747	0,12
<b>20</b>	<b>1.632</b>	<b>0,13</b>
22	1.529	0,14
24	1.436	0,15
<b>26</b>	<b>1.353</b>	<b>0,16</b>
28	1.279	0,17
30	1.212	0,18
<b>32</b>	<b>1.151</b>	<b>0,19</b>
34	1.095	0,20
36	1.045	0,20
<b>38</b>	<b>999</b>	<b>0,21</b>

Fonte: Relatório Influência da Distância na Produtividade, Vale Caterpillar/Sotreq, 2013.

A tabela 27 mostra que há uma variação grande no intervalo da produtividade e conseqüentemente no custo (R\$/t) para a atividade de disposição do estéril, dependendo da disciplina operacional e das condições da praça de descarga do caminhão que permitirão uma maior ou menor aproximação da crista do banco, mas não menor que 8m, conforme determinado no procedimento.

Figura 96 - Horas trabalhadas dos tratores esteira na pilhas e em outras atividades.

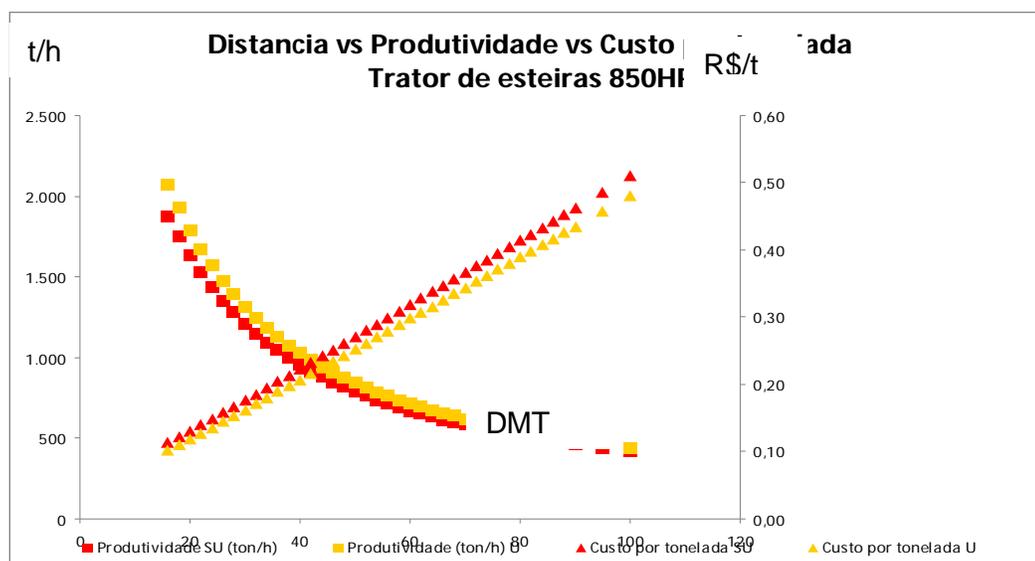


Fonte: Relatório Engenharia de Mina, Gestão Econômica e Despacho, 2012.

Na Figura 96, pode-se observar que 36,94% das horas trabalhadas dos tratores de grande porte, D11 e D475 foram aplicadas nas pilhas de estéril em 2012. Dos 45 tratores de esteira de grande porte orçados para o ano de 2012, foram usados em média 17 tratores na

atividade de disposição de estéril. Se a produtividade média fosse a mesma de 2010, gastaria mais 5 tratores para fazer a mesma atividade, ou seja, teria um custo de capital a maior de R\$19.564.803,95, pois cada unidade custa R\$3.912.960,79. A Figura 96 apresenta ainda que pode-se melhorar este resultado trocando ou modificando a lâmina SU do trator D11T por lâmina U que tem maior volume de transporte, gerando maior produção.

Figura 97 - Comparativo produtividade x custo trator lâmina SU e U.



Fonte: Relatório Influência da Distância na Produtividade, Vale Caterpillar/Sotreq, 2013.

O gráfico da Figura 97 mostra que há uma redução no custo em torno de 8 a 10% quando é colocada a lâmina U no trator D11T para efetuar a atividade de disposição do estéril nas distâncias menores e mais produtivas. Esta simulação foi feita no simulador DOZSIM Caterpillar e não por medições de campo, mas coloca-se aqui como oportunidade para trabalhos de melhoria contínua da operação.

Tabela 28 - Produtividade VS custo VS DMT VS lâmina do trator.

Distancia (m)	Lâmina SU		Lâmina U	
	Produtividade SU (ton/h)	Custo por tonelada SU	Produtividade (ton/h) U	Custo por tonelada U
16	1.873	0,11	2.076	0,10
18	1.747	0,12	1.928	0,11
<b>20</b>	<b>1.632</b>	<b>0,13</b>	<b>1.794</b>	<b>0,12</b>
22	1.529	0,14	1.675	0,13
24	1.436	0,15	1.569	0,14
<b>26</b>	<b>1.353</b>	<b>0,16</b>	<b>1.474</b>	<b>0,14</b>
28	1.279	0,17	1.390	0,15
30	1.212	0,18	1.314	0,16
<b>32</b>	<b>1.151</b>	<b>0,19</b>	<b>1.246</b>	<b>0,17</b>
34	1.095	0,20	1.184	0,18
36	1.045	0,20	1.128	0,19
<b>38</b>	<b>999</b>	<b>0,21</b>	<b>1.077</b>	<b>0,20</b>

Fonte: Relatório Simulado Comparativo Lâmina U e SU, Vale, Caterpillar/Sotreq, 2013.

Este caso mostra que é possível melhorar o processo através da aplicação de nova metodologia e também aliado a esta nova metodologia introduzir novo acessório ou ferramenta, ainda mais adequada, gerando melhor resultado.

A Tabela 29 mostra que a melhoria de produtividade na disposição de estéril em 2012 em relação a 2010, gerou redução de custo em 2012 de R\$7.202.749,46. Com a troca da lâmina SU por U geraria um ganho a mais de R\$1.571.508,97 em 2012.

Tabela 29 - Ganhos com a utilização da lâmina "U".

	2010	2011	2012	Comparações
<b>Produção de Estéril (t)</b>	<b>100.209.934</b>	<b>124.247.154</b>	<b>130.959.081</b>	<b>(C-A) * C</b>
<b>Custo SU (R\$/t)</b>	<b>0,186</b>	<b>0,158</b>	<b>0,131</b>	<b>(7.202.749,46)</b>
<b>Custo U (R\$/t)</b>	<b>0,171</b>	<b>0,145</b>	<b>0,119</b>	<b>(6.809.872,21)</b>
<b>Custo SU (R\$)</b>	<b>18.639.047,72</b>	<b>19.631.050,33</b>	<b>17.155.639,61</b>	
<b>Custo U (R\$)</b>	<b>17.135.898,71</b>	<b>18.015.837,33</b>	<b>15.584.130,64</b>	
<b>Dif. Custo</b>	<b>1.503.149,01</b>	<b>1.615.213,00</b>	<b>1.571.508,97</b>	

Fonte: Vieira, 2013.

A Tabela 30 mostra que o ganho total (Opex + Capex) no ano 2012 foi US\$13.383.776,73 com melhoria de produtividade e redução do custo por tonelada, e a não consequente necessidade de compra de 5 tratores novos.

Tabela 30 - Ganho total com a aplicação da lâmina “U.

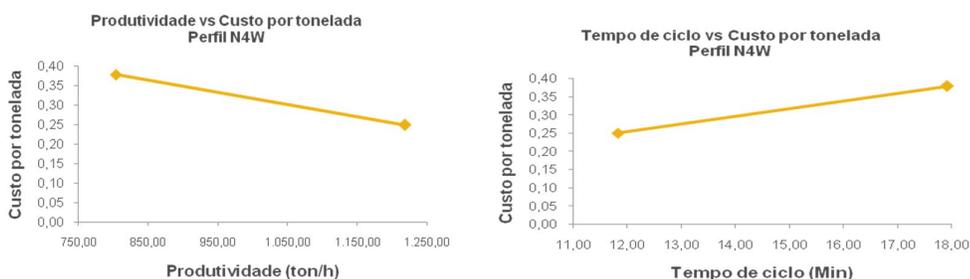
Ano	2012
<b>Redução de custo (R\$)</b>	<b>7.202.749,46</b>
<b>Custo de Capital (R\$)</b>	<b>19.564.804,00</b>
<b>Ganho Total OP + CAPEX (R\$)</b>	<b>26.767.553,46</b>
<b>Ganho Total OP + CAPEX (US\$)</b>	<b>13.383.776,73</b>

Fonte: Vieira, 2013.

#### 4.4 PONTO ÓTIMO DE DESCARGA NAS PILHAS DE ESTÉRIL – CASO 5

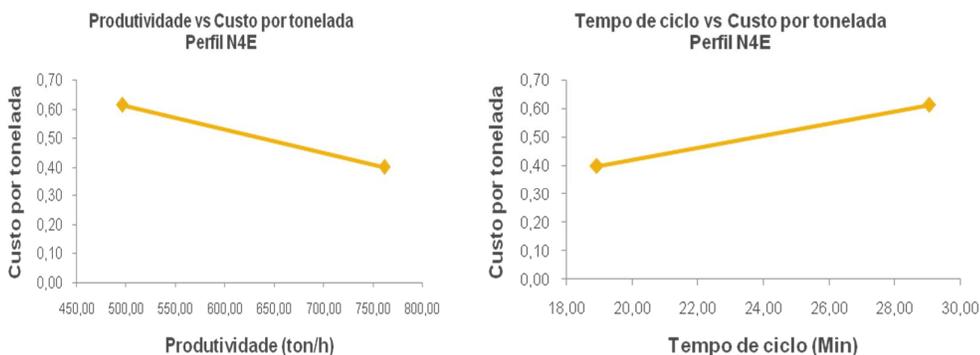
Através da simulação das pilhas ótimas, verificou-se que o aumento da DMT impacta diretamente a produtividade e custo da tonelada transportada.

Figura 98 - Relação custo vs Produtividade vs Tempo de ciclo (DMT) – Mina N4WN.



Fonte: Relatório Pilha Ótima, Vale, Caterpillar/Sotreq, 2013.

Figura 99 - Relação custo vs Produtividade vs Tempo de ciclo (DMT) – Mina N4E.



Fonte: Relatório Pilha Ótima, Vale, Caterpillar/Sotreq, 2013.

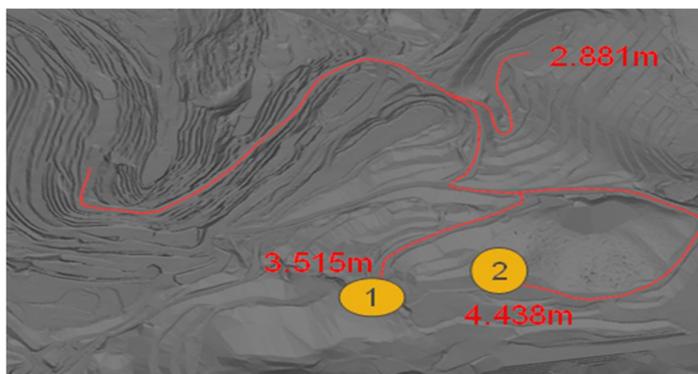
Os gráficos mostram a diferença significativa de custo de transporte entre a disposição na pilha ótima e a não ótima, nos dois exemplos, a diferença fica em torno de 50% superior.

Como o custo de transporte é 50% do custo total de lavra, pode-se então afirmar que o impacto em cada tonelada disposta fora da pilha ótima seria 25% maior no custo total de lavra. Este aspecto se remete novamente ao cuidado que deve-se dar às estradas que dão acesso às pilhas de estéril. Posto ainda que as maiores DMTs são as de estéril, pois no minério, tem-se BSM, REP e Hopper, os quais atendem aos pontos ótimos de alimentação da usina.

O custo da segunda estrada não onera o custo da operação, pois o material a ser utilizado deverá ser oriundo da lavra e não de remanejamento. As estradas que dão acesso às pilhas de estéril geralmente estão fora da cava operacional e podem ser construídas com material de oportunidade, gerado durante a execução normal da lavra e na estação seca, quando a construção das estradas é mais fácil e barata, pois a camada de base/estrutural será menos espessa e haverá tempo de cura, melhorando seu desempenho e reduzindo a necessidade de manutenções e/ou readequações. Poderá ser onerosa se a mesma for construída fora dos parâmetros sugeridos, pois sofrerá degradação e não atenderá à sua finalidade durante a estação chuvosa.

Se praticar uma DMT menor durante a estação chuvosa (descarga no ponto 1) é possível compensar as dificuldades maiores nesta época do ano e reduzir a diferença de produção entre as duas estações, chuvosa e seca (descarga no ponto 2). Posto isto, deve-se priorizar a menor DMT na pilha ótima na estação chuvosa e depois na estação seca a maior DMT da pilha ótima. O ponto de descarga 1 deve ser priorizado na estação chuvosa, ou seja: usar o ponto 2 somente quando for necessário manutenções e/ou readequações no ponto 1.

Figura 100 - Ponto ótimo de descarga na pilha ótima de estéril.



Fonte: Relatório Planejamento de Mina de Curto Prazo, 2013.

Outros ganhos:

- os dois pontos de descarga serão utilizados no decorrer da disposição do estéril na pilha ótima. Prioriza-se a DMT menor para melhorar a produtividade dos caminhões na estação chuvosa, e;

- reduzir a extensão de estrada a ser mantida e/ou readequada durante a estação chuvosa, reduzindo o custo com terraplanagem;

- menor diferença de produção entre a estação chuvosa e a estação seca;

- maior estabilidade do processo de transporte e disposição de estéril;

- melhor utilização dos tratores, menor necessidade de transporte e maior agilidade na mudança de frente;

- maior produtividade e menor custo no transporte e na disposição do estéril.

A implementação de duas estradas de acesso às pilhas de estéril iniciou-se em junho de 2012, ainda não há tempo suficiente para fazer comparações entre períodos e/ou se as perdas dos caminhões foram todas contabilizadas no estudo de caso das estradas das minas de Carajás, também abordado nesta dissertação.

Mas ainda a melhor opção para o estéril é ser disposto dentro das cavas parcialmente ou totalmente exauridas, pois com certeza, gera a menor DMT e ainda recupera a área lavrada. Esta opção está sendo praticada em parte nas cavas de Carajás, onde a lavra foi concluída.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

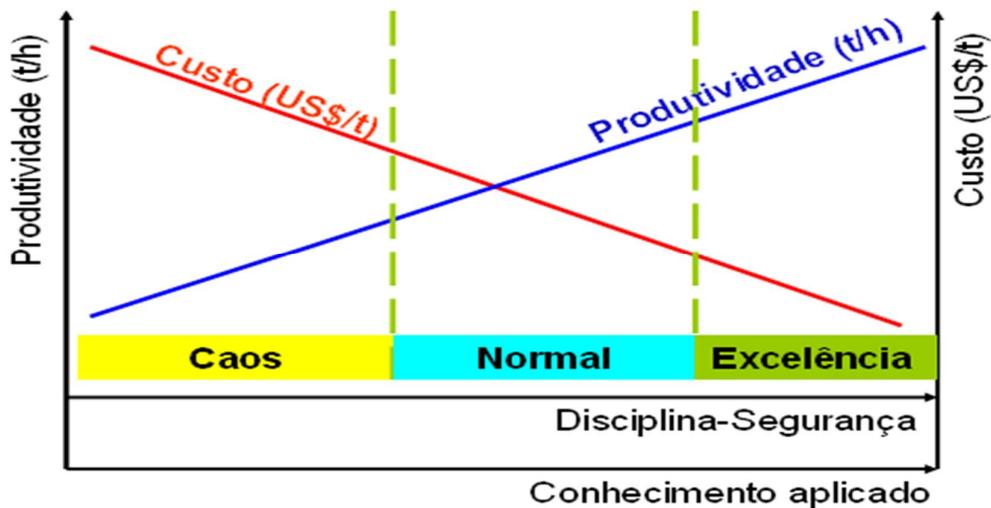
### 5.1 CONCLUSÕES

Através destes estudos de casos, pode-se observar que há melhorias que capturam aumento de efetividade na casa de unidade de percentagem a aumento de várias vezes a capacidade do processo, modificando simplesmente o método de execução. São casos simples e rotineiros na mineração a céu aberto, mas que demonstram a eficácia do tratamento sistemático dos problemas.

Na operação de reconfiguração de talude, tem-se a necessidade regulatória de execução e mostra que esta prática é plenamente viável em todos os aspectos abordados, ou seja: econômico, regulatório, social e segurança.

Nos processos operacionais apresentados nos estudos de casos da dissertação, observa-se que se pode operar dentro de uma grande variação do intervalo de desempenho, considerando a integração de todas as partes envolvidas no processo, tais como: planejamento de lavra, operação de mina, manutenção, controle e administração.

Figura 101 - Níveis operacionais.



Fonte: Vieira, 2013.

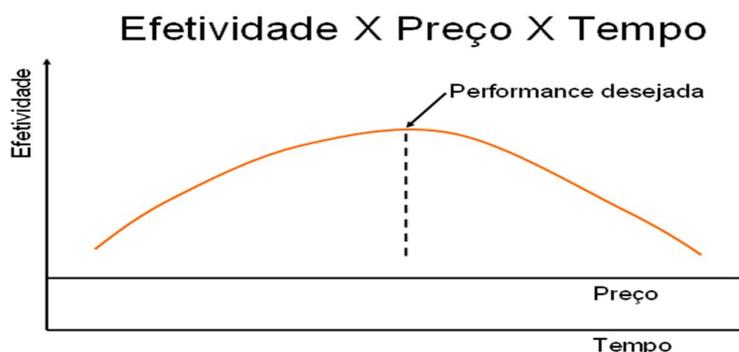
A efetividade está diretamente relacionada à disciplina de todos os envolvidos no processo, ou seja; é necessário ter excelente plano de lavra e excelente execução para atingir

estes resultados. Para atingir a excelência operacional, deve-se ter bons métodos, conhecimento do processo e liderança assertiva.

Os casos abordados nesta dissertação ilustram bem que se deve focar no controle dos tempos variáveis envolvidos nos ciclos operacionais, principalmente a DMT, especificação e dimensionamento dos equipamentos e logística, pois estas variáveis afetam diretamente a produtividade, segurança e custo da operação. O planejamento de mina e a adequada implementação operacional são os principais responsáveis por estas decisões e controle, consequentemente são os responsáveis pela efetividade operacional (excelência).

Para manter os resultados atingidos, deve-se padronizar os processos críticos, treinar os executores e auditá-los periodicamente. Com o passar do tempo e/ou a melhoria dos preços a execução dos processos pode perder a efetividade, reduzindo a produtividade e aumentando os custos.

Figura 102 - Efetividade vs preço vs tempo.

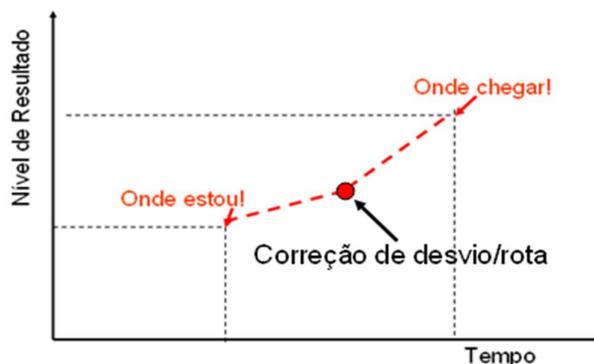


Fonte: Falconi, Adaptação, 1994.

Os resultados dos estudos de casos se somam, mas podem também se perder, pois não bastam as melhorias dos processos operacionais, abordados na dissertação, é necessário também a melhoria gerencial dos processos, tais como: eliminação da perda de tempo na troca de turno, revezamento de almoço e jantar (logística), manutenção dos ativos e manutenção do clima organizacional através de uma gestão justa e acessível. Criação de metas e objetivos desafiadores, mas não inatingíveis.

A padronização permite a replicação e comparação quando se introduz alterações nas variáveis de processo, e correção dos desvios, aumentando consideravelmente a possibilidade de sucesso na caminhada rumo à excelência. Fixa e mantém a história da evolução dos processos na empresa e reduz a dispersão dos mesmos. Veja no gráfico da Figura 103.

Figura 103 - Por que padronizar?



Fonte: Falconi, Adaptação, 1994

Um bom procedimento deve conter os passos “óbvios” e/ou críticos de forma clara e na linguagem adequada ao público alvo. O uso de desenhos e croquis é sempre preferível a textos descritivos e longos.

Os estudos de casos mostram que é grande a interdependência entre as operações unitárias e a infraestrutura de mina. As condições das estradas e das praças afetam diretamente e fortemente o desempenho dos caminhões, bem como dos tratores de esteira na operação de disposição de estéril.

Tabela 31 - Resumo dos ganhos financeiros capturados.

Estudo de Caso	Ganho (US\$)	Origem do ganho e/ou justificativa	Partição
1- RECONFIGURAÇÃO DE TALUDE	158.294.244,30	Recuperação/liberação do minério através da reconfiguração do talude	Parcial
2- UTILIZAÇÃO DE TRATOR DE ESTEIRA E/OU RETROESCAVADEIRA NA RECONFIGURAÇÃO DE TALUDE	4.236.818,21	Redução do custo com aplicação da retro-escavadeira	Parcial
3- DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DAS CAMADAS DO PAVIMENTO DAS ESTRADAS	296.849.632,78	Redução das perdas por mau tempo e/ou chuva e melhoria da trafegabilidade das estradas nas minas - liberação de minério	Total
	10.006.652,59	Maior produção, não necessidade de contratação de empresa para fazer a atividade. Ganho de 9,44 caminhões equivalentes no período	Total
4 - APLICAÇÃO DOS TROTORES DE ESTEIRA NO EMPILHAMENTO DO ESTÉRIL	3.601.374,73	Melhoria da produtividade devido a redução da DMT	Total
	9.782.402,00	Não necessidade de compra de 5 unidades de tratores devido a melhoria de performance	Total
5 - PONTO ÓTIMO DE DESCARGA NAS PILHAS DE ESTÉRIL	-	Prevenção à perda. Menor custo de transporte. Ganho ainda não capturado.	Total
<b>Ganhos contabilizados (US\$)</b>	<b>482.771.124,61</b>		

Fonte: Vieira, 2013.

A Tabela 31 mostra os ganhos financeiros quantificados, os quais são tangíveis. Há os ganhos intangíveis, tão importantes ou mais que os ganhos financeiros. A soma dos ganhos financeiros com os ganhos de segurança, produtividade, sociais e regulatórios (intangíveis), garantem a sustentabilidade do empreendimento.

Outro aspecto interessante de se abordar é que talvez os resultados apresentados aqui possam ser questionados como ganhos reais e/ou não-perdas ou ganhos de oportunidade. Mas, se deixar, estas oportunidades se transformarem de fato em perdas, o dano ao resultado operacional do negócio, é igual ou maior, pois a margem usada, foi a menor dos últimos anos, quando o minério estava com preço de mercado de US\$105.00/t. O custo da não produção é extremamente prejudicial a qualquer negócio quando o mercado está demandando.

Mesmo que não se contabilize os ganhos financeiros, a operação se torna mais efetiva, com a melhoria da produtividade e consequente redução dos custos. Esta combinação torna o negócio mais justo socialmente, economicamente e ambientalmente, pois permite uma produção menos onerosa e mais acessível a todos, gerando melhoria da qualidade de vida e sustentabilidade do negócio.

Para atingir o nível de excelência em operação de mina a céu aberto, em local de clima tropical a equatorial como o de Carajás, é mandatório utilizar as melhores técnicas de engenharia disponíveis, para não depender de fatores externos como condições climáticas (fator tempo/sorte), que podem variar de 5 meses a 7 meses chuvosos no ano. Com a utilização das melhores técnicas de terraplanagem, busca-se melhorar a produtividade na estação seca e também reduzir a diferença de produtividade entre as duas estações, seca e chuvosa.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se:

- tratar os problemas operacionais e/ou que afete o clima organizacional. O tratamento de qualquer problema gera grande aprendizado e se torna uma oportunidade. A análise do problema no início do mesmo reduz as perdas futuras;
- priorizar o tratamento dos problemas que demandam menos investimentos e recursos, e geram maior oportunidade (maior ganho);
- priorizar as ações de curto e longo prazos de forma equilibrada para não gerar resultados negativos nos processos produtivos e de preparação da mina. Desta forma, deve-se manter um sistema que permita a priorização/programação/execução das ações que impactam

os resultados imediatos e futuros adequadamente. As demandas são sempre maiores que os recursos disponíveis;

- focar na efetividade dos processos, menor custo, maior produtividade e segurança. Fazer a coisa certa, da forma certa e na hora certa;
- padronizar as melhorias dos processos críticos, treinar os envolvidos e auditar periodicamente. Não existe processo sem dispersão, mas deve-se reduzi-la ao máximo;
- mensurar através de indicadores claros, objetivos e quantitativos o desempenho dos processos e acompanhar o desempenho;
- tratar os desvios;
- buscar constantemente a participação dos membros da equipe na busca das soluções para os problemas da área para comprometê-los com os resultados;
- implantar a permissividade zero;
- definir/dimensionar a quantidade de equipamentos cativos para as atividades específicas para melhorar a produtividade, tais como: retro-escavadeiras para reconfiguração de talude e tratores de esteira com lâmina U nas pilhas de estéril;
- disponibilizar a dissertação para os envolvidos nos processos abordados, conscientizá-los da busca da efetividade e mostrá-los a possibilidade real de se atingir uma melhor performance. E, muitas vezes sem investimentos, apenas melhorando os processos;
- criar um laboratório de testes, disponibilizando os softwares simuladores para os engenheiros, analistas e supervisores fazerem as simulações antes de tomar decisões que impactam enormemente a produção e/ou decidirem as melhores oportunidades. Tornar as decisões mais profissionais, embasadas em fatores técnicos e operacionais, e menos intuitivas.

## REFERÊNCIAS

Ahlvin, R. G., Ulery Jr., H. H., Hutchindon. R. L. and Rice, J. L. (1971). **Multiple-wheel heavy gear load pavement tests**. Volume 1, Basic Report. Technical Report S-71-17. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1971, Vicksburg, Mississippi.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT 13.029 (2005). *Elaboração e apresentação de projeto de disposição estéril, em pilha, em mineração*. Rio de Janeiro.

Barros, S. T. de (1996). **Planejamento dos Programas de Pavimentação em Função do Clima**, revista Construção, Editora Pini.

Batista, I. M. (2001). **Comportamento mecânico de dois solos típicos da região de Viçosa – MG, para fins de utilização em camadas de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 130 f., Viçosa.

Bezerra Neto, R.S. (2004). **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, 169 f., São Carlos.

Bjerrum, L. (1973) **Problems of Soil Mechanics and Construction of Soft Clays and Structurally Unstable Soils**. *Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Volume 3, Moscow, USSR, pp 111-159.

Brasil. (2009). **Estudo dos impactos do bitrem nas rodovias federais brasileiras**. Vol. 1. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT, Diretoria Executiva, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 330 p.

Brown, G. M.;Ebacher, B. J. and Koellner, W. G. (2001). **Increased productivity with AC drives for Mining Excavators and haul trucks**. *Surface Mining*. Trans tech publications, No. 1, p. 45-54, Clausthal-Zellerfeld, Germany.

Carmo, F. A. R. (2001). **Metodologia para o planejamento de cavas finais de minas a céu aberto otimizadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, 123p, Ouro Preto.

**Caterpillar Performance Handbook** (2011). 41edição, Peoria, Illinois, U.S.A.

Cruz, A. V. (2005). **Estradas vicinais: abordagem pedológica, geotécnica, geométrica e de serventia de dois trechos rodoviários não pavimentados no campus da UFV – MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 133f., Viçosa.

Das, B. M. (2007). **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Thomson, 6a ed., 559 p., São Paulo.

De Beer, M.; Fisher, C. and Jooste, F. J. (1997). **Determination of Pneumatic Tire/Pavement Interface Contact Stresses under Moving Loads and some Effects on Pavements with Thin Asphalt Surfacing Layers**. *Proceedings 8. Inter. Conf. Strucutral Design of Asphalt Pavements*, p. 179-227, Seattle, Washington.

Divinsky, M.;Ishai, I. and Livneh, M. (1996). **Simplified generalized California Bearing Ratio pavement design equation**. *Journal of the Transportation Research Board No75*, volume 1539, p. 44-50, Washington.

Falconi, V. C (1992). **Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia-a-Dia**. Universidade Federal de Minas Gerais – Fundação Christiano Ottoni, 278 f, Belo Horizonte.

Ferreira, R. M. (2007). **Dimensionamento de um pavimento experimental para o tráfego de caminhões fora-de-estrada em planta de mina**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, 277 f., Ouro Preto.

Ferreira, F. M. (2004). **Uma aplicação comparativa de métodos de avaliação das condições superficiais de estrada não-pavimentada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Transportes) - Universidade Estadual de Campinas, 222 f., Campinas.

Franco, F. A. C. P. (2007). **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 294 f., Rio de Janeiro.

Geoestrutural Consultoria e Projetos (2007), **Estudos de Estabilidade, Dimensionamento dos Taludes**. Minas de Ferro de Carajás – Mina N4E, Parauapebas – PA.

Griebeler, N. P.; Pruski, F. F.; Silva, J. M. A. da; Ramos, M. M. e Silva, D. D. da (2005). Modelo para a determinação do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n.2, Viçosa.

Griebeler, N. P. (2002). **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 121 f., Viçosa.

Hammit, G. M. and Hutchinson, R. L. (1971). **Multiple-wheel heavy gear load pavement tests, Volume 4**, technical report AFWL-TR-70-113, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

Himeno, K.; Ikeda, T.; Kamijima, T. and Abe, T. (1997). **Distribution of Tire Contact Pressure of Vehicles and its influence on Pavement Distress**. Proceedings 8. Inter. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 129-139, Seattle, Washington.

Hugo, D. (2005). **Haul Road defect identification and condition assessment using measured truck response**. Dissertation (Master of Engineering in the Department of Mechanical and Aeronautical Engineering) – University of Pretoria, 109 f., Pretoria.

JORC, 2004. *The Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves*. www.jorc.org (AusIMM, MCA & AIG), 20 pp.

Leopoldo, L. (2009). **AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA dos Fatores de Segurança dos Taludes das Pilhas de Estéril Operacional e Rebatido**. Gerência de Geotecnia e Hidrogeologia, DIFN – GAGHN, Vale, Carajás.

Leopoldo, L. (2009). **AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA dos Fatores de Segurança dos Taludes das Pilhas de Estéril Operacional (Pontos de Basculamento)**. Gerência de Geotecnia e Hidrogeologia, DIFN – GAGHN, Vale, Carajás.

*LOP Project, Design Guidelines Text\_Fundamentals\_PS\_JRRevB\_Oct07*.

Kaufman, W. and Ault, J. C. (1977). **Design of surface mine haulage roads – A Manual**. Information Circular 8758, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 68 p., Washington.

**Komat`su Specifications and Application Handbook** (2008), Edição 29, Japão.

- Kumar, V. (2000). **Design and construction of haul roads using fly ash**. Dissertation (Master of Science in Mining Engineering) - University of Alberta, 97 p., Alberta.
- Masetti, L. S. S. de (2011). **Estudos de Dimensionamento Estrutural de Estradas de Mina a Céu Aberto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, 157 p., Ouro Preto.
- Masetti, L. S. S. de; Cláudio. M. e Costa, W. (2011). **Manual de Estradas de Mina**. Departamento de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos - Vale – 117 p., Belo Horizonte.
- Medina, J. e Motta, L. M. G. da (2005). **Mecânica dos pavimentos**. Editora UFRJ, 2ª edição, 570 p., Rio de Janeiro.
- Monteiro, S. A. (1996). **Análise comparativa ente metodologias de dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, 133 f., Brasília.
- Morgan, J. R., Tucker, J. S. and McInnes, D.B. (1994). **A mechanistic design approach for unsealed mine haul roads**. Pavement Design and Performance in Road Construction 1412: 69-81.
- MSHA, (2006). **Metal and nonmetal health inspection procedures handbook**. Handbook number PH06-IV-1(1). U.S. Department of Labor Transmittal Sheet Mine Safety and Health Administration. 869 p. Disponível em: <<http://www.msha.gov/READROOM/HANDBOOK/HANDBOOK.HTM>>. Acesso em 19 jul 2010.
- MSHA, (1999). **Haul road inspection handbook**. PH99-I-4 U.S. Department of Labor Transmittal Sheet Mine Safety and Health Administration. 76 p. Disponível em: <<http://www.msha.gov/READROOM/HANDBOOK/HANDBOOK.HTM>>. Acesso em 19 jul 2010.
- MTE. (1978). **NR-22 – Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Portaria GM nº 3.214 de 08 de junho de 1978.
- Oda, S. (1995). **Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas**. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Universidade de São Paulo, 186 f., São Carlos.
- Oliveira, J. F. de; Griebeler, N. P.; Correchel, V. e Silva, V. C. da. (2009). **Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, supl. 0, Campina Grande.
- Oliveira, A. M. S. e Brito, S. N. A. (2001). **Geologia de Engenharia**. Segunda Reimpressão , 515 f, São Paulo.
- Oliveira Filho, W. L. de; Fernandes, G.; Sousa, L. M. L. S. de; Costa Filho, W. D.; Rodrigues, C. A. F.; Van Ham, G. H. J. (2010). **Relatório de Inventário de Estradas de Acesso de Mina**. Relatório interno. Convênio Vale UFOP, 12 p., Ouro Preto.
- Pontes Filho, G. (1998). **Estradas de rodagem: projeto geométrico**. BIDIM, 432 p., São Carlos.
- Read, J; Stacey, P. (2009). **Guidelines for Open Pit Slope Design**, CSIRO Publishing, Chapter 1, Australia.
- Rego Chaves, Cândido, **Terraplanagem Mecanizada**, Rio de Janeiro, Editora Rodovia, 1955.

Ricardo, H.S. de e Catalani, G. (2007). **Manual Prático de Escavação Terraplanagem e Escavação de Rocha**. Editora PiniLtda, 3ª edição, 656 p., São Paulo.

Silva, L.A. da (2008). **Sistema de gerência de pavimentos do DER/SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Transportes) - Universidade Estadual de Campinas, 151 f., Campinas.

Tannant, D. D. and Regensburg, B. (2001). **Guidelines for mine haul road design**. University of Alberta: School of Mining and Petroleum Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, 108 p., Canada.

Thompson, R. J. (2009). **Ultra-heavy axle loads: design and management strategies for mine pavements**. Planning and transport research centre: PATREC Research Forum, 15 p., Kalgoorlie.

Thompson, R. J. and Visser, A. T. (2006). **Designing and benchmarking mine roads for safe and efficient hauling**. In: DME open pit safety Workshop, 21 p., Witbank.

Thompson, R. J. and Visser, A. T. (2003b). Mine haul road maintenance management systems. **The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, p. 303 – 312, South Africa.

Thompson, R. J.; Visser, A. T.; Smith R. A. F. and Fourie, G. A. (1997). **An investigation into the influence of haul road design, construction and maintenance practices on transport accidents**. SIMRAC Symposium, Safety in mines research advisory committee, 13 p., South Africa.

Thompson, R. J. (1996). **The design and management of surface mine haul roads**. Thesis (Doctor of Engineering) - Department of Civil Engineering, University of Pretoria, Pretoria.

Van Heerden, W. L. (1976): **Practical application of the CSIR triaxial strain cell for rock mass measurements**. Proc. ISRM Symp. on Investigation of Stress in Rock, Advances in Stress Measurement, Sydney, The Institution of Engineers, Australia, pp. 1-6.

Vieira, J.C; Peroni, R.L (2012). Structural Dimensioning for Large Surface Mining Haul Roads. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy – Surface Mining Set.2012.

Villaescusa, E., Jianping Li and Baird, G. (2002): **Stress Measurement fro Oriented Core in Australia**. First International Seminar on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Western Australia, November 2002

Yoder, R. J. and Witzak, M. W. (1975). **Principles of Pavement Design**. 2nd ed. John Wiley& Sons, Inc., New York.