

Henrique Buchhorn Marques Silva

Dimensionamento de Equipamentos de Carga para Mineração

**São Paulo
2008**

Henrique Buchhorn Marques Silva

Dimensionamento de Equipamentos de Carga para Mineração

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas do curso de graduação do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

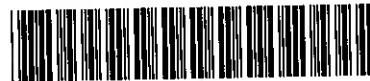
Orientador: Engº Thiago Nantes Teixeira

**São Paulo
2008**

EPMI
TF-2008
Sij38d
Seno 173326

M2008b

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700004231

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Henrique Buchhorn Marques
Dimensionamento de equipamentos de carga para
mineração
/ H. B. M. Silva. – São Paulo, 2008.
p. 40

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo.

1.Equipamentos de mineração 2.Escavação em minas
3.Distribuição binomial (dimensionamento;análise)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Agradecimentos

Aos colegas de curso, pelos bons momentos, as discussões construtivas, as trocas de experiências e as lições de amizade e companheirismo.

Ao colega e orientador deste trabalho, engº Thiago Nantes Teixeira e os demais colegas da Votorantim Metais, pelos ensinamentos, conselhos e apoio na produção deste trabalho.

Aos professores do departamento, pelo conhecimento compartilhado e disponibilidade.

Aos meus pais, Marcos e Valderez, minha irmã Julia e minha namorada Aline, pela compreensão nas dificuldades e pelo apoio incondicional.

Resumo

Este trabalho visa apresentar um método de escolha e dimensionamento de frota de equipamentos de carga para a lavra de minas.

O método consiste na utilização da distribuição binomial para calcular, com base na disponibilidade real ou prevista da frota de equipamentos, as probabilidades de equipamentos disponíveis simultaneamente, o que permite um dimensionamento que minimize os riscos de falta ou subutilização de equipamentos.

O trabalho apresentará todo o embasamento teórico do método, bem como exemplos de sua eficácia com base em dados de minas reais.

Abstract

This paper aims to present a method of choice and size of load equipment fleets for mining operations.

The method uses the binomial distribution to calculate, based on the availability of actual or planned fleet of equipments, the probability of simultaneously available equipments, allowing a design that minimizes the risk of lack or poor utilization of equipments.

The paper will present the whole theoretical basis of the method as well as examples of its effectiveness based on data of actual mines.

Lista de Ilustrações

Ilustração 1 - Caterpillar 994F	13
Ilustração 2 - Ciclo de Carregamento de Pá Carregadora	14
Ilustração 3 - Le Tourneau L2350	14
Ilustração 4 - Liebherr R996	15
Ilustração 5 - CAT 385C L.....	16
Ilustração 6 - Bucyrus 495HR.....	17
Ilustração 7 - Atlas Copco ST1520	18
Ilustração 8 - CAT R1300 G	19
Ilustração 9 - Planilha de Dimensionamento	24
Ilustração 10 - Vazante 2005.....	27
Ilustração 11 - Vazante 2006.....	28
Ilustração 12 - Vazante 2007.....	28
Ilustração 13 - Vazante 2008.....	29
Ilustração 14 - Número de Equipamentos Efetivo - 4 Equipamentos - 2007	30
Ilustração 15 - Massa Carregada por Ciclo - 4 Equipamentos - 2007	30
Ilustração 16 - Número de Equipamentos Efetivo - 5 Equipamentos - 2007	31
Ilustração 17 - Massa Carregada por Ciclo - 5 Equipamentos - 2007	31
Ilustração 18 - Número de Equipamentos Efetivo - 4 equipamentos - 2008.....	33
Ilustração 19 - Massa Carregada por Ciclo - 4 Equipamentos - 2008.....	33
Ilustração 20 - Número de Equipamentos Efetivo - 5 Equipamentos – 2008	34
Ilustração 21 - Massa Carregada por Ciclo - 5 Equipamentos - 2008.....	34
Ilustração 22 - Número de Equipamentos Efetivo Ajustado.....	36
Ilustração 23 - Massa Carregada por Ciclo Ajustado	36
Ilustração 24 - Gráfico da Distribuição de Disponibilidade.....	40

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Termos do Polinômio de Newton.....	22
Tabela 2 - Movimentação Total de Vazante.....	27
Tabela 3 - Probabilidades de Corte	29
Tabela 4 - Dados de Disponibilidade de Equipamentos da Mina de Vazante.....	40
Tabela 5 - Disponibilidade da Frota de Equipamentos da Mina de Vazante.....	40

Sumário

1. Introdução	8
2. Objetivo	9
3. Revisão Bibliográfica	10
3.1. Aspectos Relevantes Para o Dimensionamento de Equipamentos	10
3.2. Características dos Equipamentos Considerados	12
3.2.1. Pás Carregadoras	12
3.2.2. Escavadoras Hidráulicas.....	15
3.2.3. Escavadoras Elétricas	17
3.2.4. LHDs	18
3.3. Fatores Operacionais	19
3.3.1. Disponibilidade Mecânica.....	20
3.3.2. Disponibilidade Física	20
3.3.3. Utilização.....	21
3.3.4. Utilização Efetiva.....	21
3.4. Utilização da Distribuição Binomial no Dimensionamento de Frotas	22
4. Método de Dimensionamento	24
4.1. Aplicação do Método.....	26
5. Conclusão.....	38
6. Referências	39
Apêndice I – Dados da Frota de Carga da Mina de Vazante.....	40

1. Introdução

Com o avançar dos anos, as exigências que um empreendimento industrial deve atender tornam-se cada vez mais severas e restritivas. Sejam essas exigências da legislação, dos acionistas, da comunidade local e etc., devem ser atendidas para um empreendimento bem sucedido.

Um empreendimento de mineração possui diversas características muito específicas, entre as quais podemos citar:

- Atuação direta no meio-ambiente;
- Alto índice de resistência da população com relação às atividades de mineração;
- Empreendimento com duração limitada;
- Alto investimento;
- Tempo de retorno de investimento relativamente longo;
- Legislação específica;
- Alta sensibilidade às oscilações de preços e da economia mundial;
- Localização determinada pela ocorrência de minério;
- Incerteza geológica.

Essas características específicas fazem com que os empreendimentos de mineração devam ser profundamente eficientes para que sejam viáveis e atendam todas as exigências feitas.

Insere-se neste contexto a escolha, aquisição, manutenção e substituição de equipamentos móveis, responsáveis por grande parte dos custos de investimento. Esses equipamentos possuem custo unitário muito alto, fazendo com que a aquisição de apenas um equipamento em excesso ou em falta, seja consideravelmente impactante na análise de viabilidade de um empreendimento. Na análise de longo prazo, um único equipamento a mais considerado a cada ciclo de substituição de equipamentos pode mudar totalmente as características de planejamento da mina.

2. Objetivo

Este trabalho visa apresentar um método eficiente de dimensionamento de frotas de equipamentos de carga que possibilite uma análise do risco da escolha adotada e a previsão do comportamento operacional da frota.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Aspectos Relevantes Para o Dimensionamento de Equipamentos

A escolha de equipamentos para a lavra de minérios é uma questão profundamente complexa, pois essa escolha se baseia em uma grande quantidade de variáveis, apresentando uma grande inter-dependência entre si. Cada aspecto do projeto deve ser levado em consideração para que se escolha o melhor equipamento para as condições de trabalho de uma mina.

Para facilitar a análise dessas variáveis, Martin et al (1982), as divide em grupos e subgrupos. Baseando-se nessa classificação, um modelo simplificado foi adotado e está dividido da seguinte maneira:

A - MINA

Aa - Características gerais do local

- Altitude
- Temperatura
- Pluviosidade
- Terreno
- Disponibilidade energética
- Acesso
- Qualificação da mão de obra disponível
- Facilidade de assistência técnica do fabricante

Ab - Características do depósito

- Cobertura
- Espessura
- Natureza e grau de consolidação
- Estabilidade
- Ângulo natural de repouso

- Minério
- Espessura
- Mergulho
- Propriedades físicas

- Rocha Encaixante / Estéril
- Falhas, contatos, fraturas e etc.
- Propriedades físicas

- Hidrologia

Ac - Parâmetros da mina

- Método de lavra (operações unitárias, dimensões de bancadas e galerias)
- Tamanho (distâncias)

- Produção
- Qualidade do produto
- LOM
- Licenças, permissões e legislação local
- Tempo de retorno do investimento
- Fluxo de caixa disponível

B - EQUIPAMENTOS

Ba - Design

- Potência
- Vida útil
- Peso
- Dimensões
- Estabilidade
- Espaço exigido para manobra
- Tempo de ciclo
- Montagem (facilidade em montar e desmontar o equipamento na mina)
- Componentes
- Aparência
- Facilidade de manutenção preventiva
- Facilidade de manutenção corretiva
- Facilidade para mover o equipamento
- Resistência
- Limitações de altitude
- Limitações de temperatura
- Nível de ruído
- Geração de poeiras e gases poluentes
- Tamanho da equipe necessária
- Conhecimento necessário ao operador
- Esforço do operador
- Segurança
- Visibilidade
- Facilidade de controle
- Fonte de energia empregada
- Tipo de transmissão
- Sensores e diagnósticos on-board
- Sistemas de back-up
- Proteção contra operação com sobre peso
- Sistema anti-incêndio
- Acessórios disponíveis
- Especificações ótimas

Bb – Fatores de Suporte

- Necessidade de máquinas auxiliares
- Freqüência de manutenção requerida

- Possibilidade de manutenção no campo
- Qualidade da mão de obra requerida para manutenção
- Instalações requeridas para manutenção
- Instalações de reabastecimento e lubrificação
- Padronização de componentes em estoque
- Disponibilidade de suporte do fabricante
- Qualidade de fabricação
- Disponibilidade de peças

Bc – Econômicos

- Custos pela propriedade
 - Depreciação
 - Seguro
 - Impostos
- Investimento inicial
 - Custo da máquina básica
 - Acessórios e opcionais
 - Frete
 - Montagem no local
- Custos Operacionais
 - Mão de obra
 - Suprimentos
 - Combustível / energia
 - Lubrificantes
 - Reparos / manutenção
 - Armazenagem (caso necessário)

3.2. Características dos Equipamentos Considerados

3.2.1. Pás Carregadoras

As pás carregadoras são máquinas semelhantes a tratores, que se locomovem por pneus ou sobre esteiras e possuem uma concha frontal. São utilizadas para escavação, carregamento de caminhões ou transporte direto de material. São equipamentos muito versáteis, sendo aplicados em uma grande variedade de aplicações na indústria de mineração.



Ilustração 1 - Caterpillar 994F

Fonte: Website Caterpillar

Esse tipo de equipamento possui excelente mobilidade e é facilmente manobrado, dentro das limitações impostas pelas condições da praça ou outro local de trabalho. Para carregamento de caminhões, o deslocamento dessas máquinas é mínimo. Já para descarga direta em britadores ou em estações de descarga ligadas a correias transportadoras, as distâncias percorridas podem ser significantes. O equipamento é recomendado para transporte de até 300 metros, podendo trabalhar em inclinações superiores a 12%, dependendo da aplicação.

O mecanismo de escavação não será detalhado, uma vez que não é o objetivo do trabalho, mas se dá, de maneira simplificada, da seguinte forma:

- A máquina se posiciona à frente da bancada, posicionando os dentes da concha na posição desejada para o corte;
- Com um movimento para cima, os dentes cortam a bancada até o enchimento da concha;
- A máquina se afasta da bancada e, com uma manobra em “Y”, que minimiza o espaço requerido para manobra, se encaminha para o ponto de descarga;
- Para o carregamento de caminhões, a concha é erguida durante a manobra, para minimizar o tempo gasto no carregamento.
- Para o descarregamento em locais mais distantes, que envolvam um deslocamento maior, a concha é erguida somente até uma altura que evite que ela toque o solo, de forma a garantir maior estabilidade ao equipamento. A concha é totalmente erguida somente ao se aproximar do ponto de descarga.

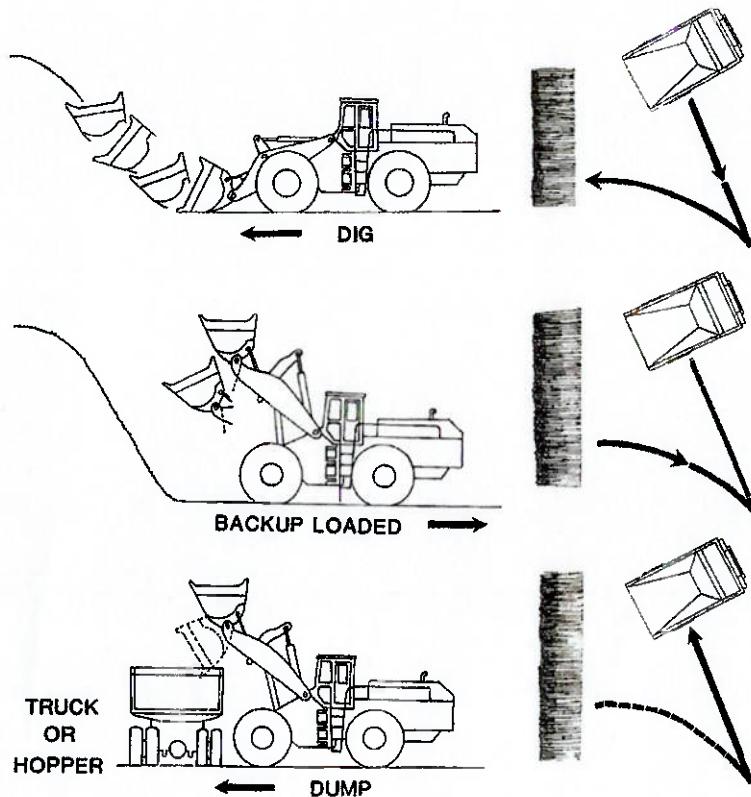


Ilustração 2 - Ciclo de Carregamento de Pá Carregadora
Fonte: Surface Mining Equipment (1982)

As aplicações mais comuns para esse tipo de equipamento são:

- Carregamento e/ou transporte de solo
- Carregamento e/ou transporte de minério
- Carregamento e/ou transporte de minério em pilhas de estoque
- Carregamento e/ou transporte de estéril ou rejeito

Outras aplicações menos comuns são:

- Manutenção e preparação de praças
- Manutenção de pistas
- Remoção de neve

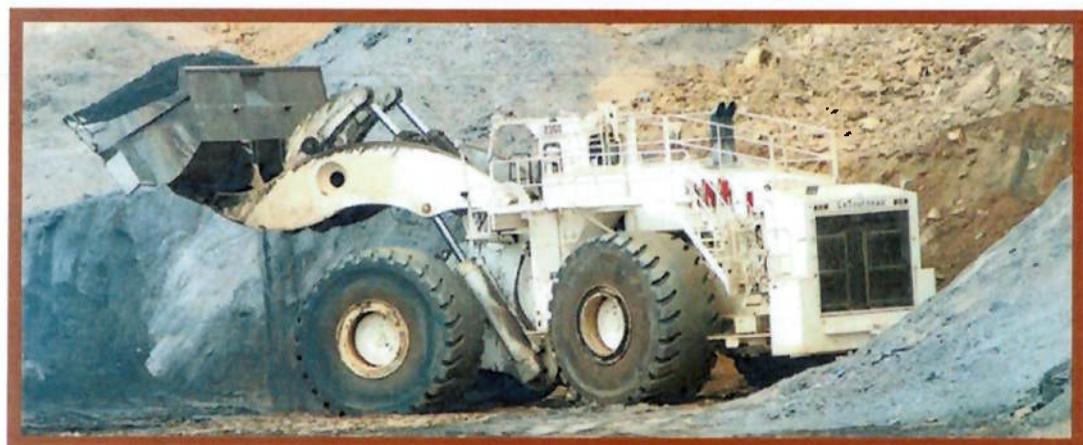


Ilustração 3 - Le Tourneau L2350
Fonte: Website Le Tourneau

Entre as vantagens desse tipo de máquina, podemos citar:

- Conchas suportam blocos relativamente grandes.
- Seletividade na lavra
- Força de escavação
- Capacidade de “blending” de minério na frente de lavra
- Baixo dano à praça de trabalho
- Não necessita de equipamentos auxiliares
- Geração de poeiras moderada
- Descarga fácil em caminhões
- Boa eficiência de corte para bancadas entre 1,8 e 6,1 metros

Entre as desvantagens, podemos citar:

- Necessita de preparação prévia (escarificação ou desmonte). Pouco recomendável para rocha muito dura pouco fragmentada
 - Necessita de espaço considerável para manobra
 - Gasto de pneus
- Prejuízo de performance em condições ruins para tração (superfícies molhadas, solo argiloso ou “fofo”)
 - Limitação no alcance
 - Estabilidade reduzida durante escavação e transporte de material
 - Visibilidade reduzida, principalmente durante manobras de ré
 - Posição da cabine expõe o operador a riscos durante trabalho em bancadas altas
 - Desgaste do operador

3.2.2. Escavadoras Hidráulicas

As escavadoras hidráulicas tiveram seu uso consagrado na indústria de construção civil. Com o avanço da tecnologia, que possibilitou um aumento de tamanho e capacidades dos equipamentos e conchas adaptadas ao trabalho pesado, essas escavadoras passaram a ser utilizadas em minerações a céu aberto. Outro avanço fundamental para o uso em mineração foi o desenvolvimento de máquinas do tipo shovel, muito usadas em mineração. Para a construção civil, o uso tradicional é o de retro-escavadoras.



Ilustração 4 - Liebherr R996

Fonte: Website Liebherr

O principal uso desses equipamentos é na escavação e carregamento de material. O ciclo operacional básico consiste nas seguintes etapas:

- corte da bancada e enchimento da concha
- giro até a posição de descarga
- descarga em equipamento ou área determinada
- giro de retorno até a posição de escavação

A escavação da retro-escavadora se dá com a concha cortando a bancada num movimento descendente e em direção ao equipamento. Já o equipamento shovel, escava num movimento ascendente, com a concha se afastando do equipamento. Devido a essa diferença na forma de escavação, as retro-escavadoras são geralmente posicionadas sobre o banco a ser escavado e as shovels de frente ao banco a ser escavado.

As principais aplicações para esse tipo de equipamento são:

- Remoção de estéril
- Escavação de minério e carregamento de caminhões, vagões, alimentadores e etc.
- Construção e manutenção do sistema de drenagem da cava



Ilustração 5 - CAT 385C L

Fonte: Website Caterpillar

Entre as vantagens desse tipo de máquina, podemos citar:

- Posicionamento (mecanismo de giro)
- Não necessita de espaço para manobras, apenas para o giro
- Estabilidade
- Alta velocidade de giro
- Capacidade de força aplicada na escavação
- Versatilidade no posicionamento da concha para a escavação
- Facilidade na troca de conchas
- Causa poucos danos à pista ou praça de trabalho
- Controle do descarregamento
- Fator de enchimento da concha alto
- Dimensões e peso relativamente baixos
- Não necessita de equipamentos de suporte
- Baixo desgaste do operador
- Posicionamento seguro da cabine
- Boa visibilidade para escavação

- Consumo de combustível mais baixo do que o de pás carregadoras

Entre as desvantagens, podemos citar:

- Baixa velocidade de deslocamento
- Habilidade exigida para o operador maior do que a exigida para pás carregadoras
- Visibilidade prejudicada para carregamento de caminhões de grande porte
- Maiores gastos com manutenção da parte hidráulica

3.2.3. Escavadoras Elétricas

A escavadora tipo Shovel é um dos equipamentos mais antigos utilizados em mineração. Foram utilizadas shovels movidas a vapor, gás, diesel e, mais recentemente, energia elétrica.

As escavadoras elétricas tipo shovel são os equipamentos mais encontrados em minas com altas produções de ROM. Os equipamentos de menor porte foram sendo, gradativamente substituídos por pás carregadoras e máquinas hidráulicas, restringindo esse tipo de equipamento a aplicações de maior porte.

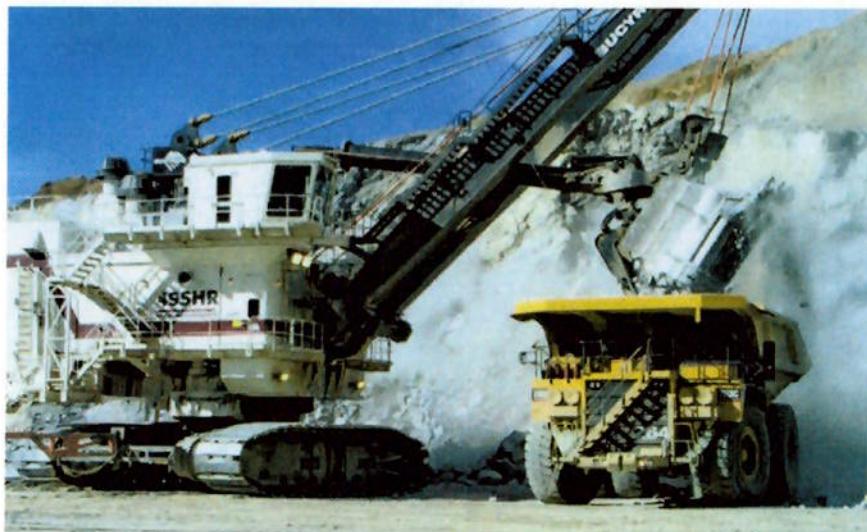


Ilustração 6 - Bucyrus 495HR

Fonte: Website Bucyrus

O ciclo operacional desse equipamento consiste nas seguintes etapas:

- Corte na bancada e enchimento da concha
- Giro até a área de descarga
- Descarga sobre equipamento ou área desejada
- Giro de retorno à posição de escavação

Com um giro de 70° a 120°, o tempo de ciclo geralmente varia numa faixa de 25 a 35 segundos.

As aplicações são as mesmas das grandes shovels hidráulicas, porém para produções mais altas e/ou piores condições de escavação.

A descarga é geralmente realizada em caminhões, mas também pode ser feita em sistemas móveis de correias transportadoras ou instalações móveis de britagem primária.

Entre as vantagens desses equipamentos, podemos citar:

- Alcance de maiores alturas de escavação
- Maior altura de descarga
- Alta produção
- Aplicabilidade em condições de difícil escavação
- Necessita de pouca preparação (desmonte por explosivos)
- Estabilidade
- Alta força de escavação
- Pode operar em condições ruins de pista ou praça de trabalho
- Posição segura da cabine
- Visibilidade
- Baixo desgaste do operador
- Construção modular, que facilita o transporte e a montagem é feita no campo
- Baixo custo operacional

Entre as desvantagens, podemos citar:

- Pouca tolerância a pisos desnivelados
- Baixa seletividade
- Baixa velocidade de deslocamento
- Baixa mobilidade entre frentes
- Descarga difícil em caminhões
- Limitação para escavação abaixo do nível onde está localizada
- Necessita de equipamentos de suporte
- Condições ambientais podem afetar o desempenho do sistema elétrico
- Operação complexa; necessita de alta habilidade do operador
- Alto custo de aquisição

3.2.4. LHDs

As LHDs são os equipamentos que apresentam melhor desempenho para trabalho em minas subterrâneas. O posicionamento lateral da cabine facilita as manobras, permitindo a mesma facilidade nas manobras tanto para frente quanto para trás. Essa característica é fundamental para o trabalho em subterrâneo, uma vez que o espaço para manobras é restrito.



Ilustração 7 - Atlas Copco ST1520

Fonte: Website Atlas Copco

As LHDs podem ser utilizadas tanto em conjunto com caminhões, que transportam o material até a superfície ou até estações de britagem ou içamento dentro da mina subterrânea,

ou para o transporte direto do minério até “ore passes” ou outro local onde o material deva ser descarregado.

O ciclo das LHDs é muito semelhante ao das pás carregadoras, consistindo em:

- Carregamento do material desmontado
- Manobra e deslocamento até local de descarga
- Descarga em caminhões ou em outro local desejado

Por serem equipamentos praticamente sem concorrência para operações em subterrâneo, não há sentido em listar vantagens e desvantagens para comparação. Os grandes diferenciais da LHDs são as dimensões do equipamento, que permitem trabalho com espaço restrito em lavras subterrâneas, existindo equipamentos especiais, com perfil mais baixo, utilizados para lavrar corpos de minério com menor espessura e a facilidade com que o equipamento pode ser manobrado.



Ilustração 8 - CAT R1300 G
Fonte: Website Caterpillar

Apesar da relativa facilidade de manobra, é necessário que se tenha um operador habilidoso para que as manobras sejam realizadas da maneira correta, evitando colisões e danos ao equipamento.

Outro fator fundamental a ser considerado é a emissão de gases controlados dos equipamentos movidos a diesel. A escolha de um equipamento pode ser determinada por essa característica, para que a mina mantenha os níveis de emissão dentro dos limites impostos pela legislação. Os fabricantes têm nesse fator um dos pontos chave de diferenciação em relação aos concorrentes, investindo constantemente em formas de melhorar a emissão de gases de seus equipamentos.

3.3. Fatores Operacionais

Diversos fatores operacionais são utilizados para o dimensionamento de equipamentos, como os fatores de utilização e disponibilidade. Os fatores de utilização e disponibilidade devem ser estimados ou medidos, caso sejam usados dados de históricos da mina para a substituição dos equipamentos ou dados de operações semelhantes para o dimensionamento de frota para novos projetos, de maneira correta, fornecendo dados confiáveis, uma vez que esses fatores são fundamentais e possuem profunda relevância nos cálculos realizados. Neste trabalho foram consideradas as definições apresentadas por Sense (1968).

3.3.1. Disponibilidade Mecânica

O fator de disponibilidade mecânica é a relação que diz a disponibilidade do equipamento considerando apenas o tempo perdido por paradas de razão puramente mecânica.

O fator é dado pela seguinte equação:

$$\text{Disponibilidade Mecânica}(\%) = \frac{\text{Horas Trabalhadas}}{\text{Horas Trabalhadas} + \text{Horas em Manutenção}} \times 100$$

Horas trabalhadas são definidas como o tempo em que o equipamento está em condições de ser operado, incluindo tempo gasto com atrasos, deslocamento, lubrificação, reabastecimento, tempo parado por más condições meteorológicas e etc.

Horas em manutenção são definidas como o tempo em que o equipamento ficou em manutenção corretiva, incluindo o tempo de espera pela manutenção ou por peças, e o tempo de manutenção preventiva.

No caso de a manutenção ser realizada fora do período previsto para operação, como por exemplo, nos finais de semana em minas que operam somente cinco dias por semana, ainda assim o tempo de manutenção é considerado para o cálculo, uma vez que esse tempo é necessário para o funcionamento do equipamento e deve ser considerado para a disponibilidade mecânica. No caso do regime de operação mudar para os sete dias da semana, é necessário que se conheça quantas horas de manutenção aquele equipamento necessita para trabalhar determinado número de horas.

Devem-se tomar algumas precauções com o uso desse fator no caso de mudança no regime de operação, uma vez que o aumento no tempo de operação pode levar a problemas mecânicos mais freqüentes, mudando o valor do fator. A utilização do mesmo fator para mudanças no regime de operação pode levar a um desempenho consideravelmente diferente do previsto.

3.3.2. Disponibilidade Física

O fator de disponibilidade física é dado pela seguinte equação:

$$\text{Disponibilidade Física}(\%) = \frac{\text{Horas Trabalhadas} + \text{Horas em Espera}}{\text{Horas em Operação}} \times 100$$

Horas em espera são definidas como o tempo em que o equipamento não opera, mas está disponível para operação.

Horas em operação são definidas como o tempo de operação da lavra.

Esse fator é profundamente relevante quando comparado com o fator de disponibilidade mecânica, uma vez que fornece informações sobre a eficiência da programação de uso dos equipamentos. No caso da disponibilidade física apresentar um valor muito maior que o da disponibilidade mecânica, equipamentos podem estar sendo subaproveitados ou haver uma frota com número excessivo de equipamentos. A mesma lógica vale para o comportamento oposto. Quanto mais próximos são os dois valores, maior é a eficiência da operação.

No caso da diferença entre os fatores de disponibilidade física e disponibilidade mecânica ser inferior a 5%, os fatores não devem ser utilizados para mudança de regime de operação. A utilização dos mesmos fatores significaria um aumento proporcional das horas em espera, o que provavelmente não corresponderá à situação real, pois a relação entre horas trabalhadas e horas em manutenção muda, como já foi discutido anteriormente.

3.3.3. Utilização

O fator de utilização é dado pela seguinte equação:

$$\text{Utilização}(\%) = \frac{\text{Horas Trabalhadas}}{\text{Horas Trabalhadas} + \text{Horas em Espera}} \times 100$$

Esse fator mede a eficiência da utilização do equipamento disponível. Esse fator é uma ferramenta mais adequada para conhecer a eficiência da operação, uma vez que não necessita de comparações com outros fatores.

Um fator de utilização muito baixo significa que a frota pode ter equipamentos e operadores em excesso. No caso de um valor baixo para um equipamento específico, o fator pode indicar algum problema operacional ou algum equipamento que possui especificações não adequadas para os trabalhos realizados na mina e por isso é pouco utilizado. Um equipamento utilizado em situações muito específicas ou mantido apenas para funcionar como uma reserva em caso de algum problema com outro equipamento terá o valor do fator baixo, mas nesse caso o baixo valor já será esperado e a sua razão conhecida.

Da mesma forma, se o fator de utilização estiver acima do limite, pode haver falta de equipamentos e pessoal. Assim, deve ser providenciada a adequação para a operação realizada.

3.3.4. Utilização Efetiva

O fator de utilização efetiva é dado pela seguinte equação:

$$\text{Utilização Efetiva}(\%) = \frac{\text{Horas Trabalhadas}}{\text{Horas em Operação}} \times 100$$

O fator de utilização efetiva relaciona as horas trabalhadas com o total de horas. Esse fator não apresenta nenhuma informação nova em relação aos anteriormente citados, mas esse fator é relevante porque engloba todos os outros fatores e é muito utilizado na indústria de mineração.

3.4. Utilização da Distribuição Binomial no Dimensionamento de Frotas

A distribuição é aplicada quando são realizadas provas independentes com apenas dois resultados possíveis, sucesso ou fracasso. A probabilidade de sucessos (e consequentemente a de fracassos) é conhecida.

A probabilidade de ocorrerem k sucessos em n provas é dada por:

$$P(x) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}$$

Onde:

n é o número de provas realizadas (número de equipamentos na frota)

k é o número de sucessos (número de equipamentos disponíveis)

p é a probabilidade de sucessos (disponibilidade mecânica)

q é a probabilidade de fracassos (1 – disponibilidade mecânica)

Essa expressão também representa cada termo do desenvolvimento do polinômio de Newton, definido como $(p+q)^n$.

No caso de termos uma frota com 7 equipamentos e disponibilidade de 70% por cento, faremos o desenvolvimento do polinômio de Newton com $p = 70\%$, $q = 30\%$ e $n = 7$.

Os termos terão os seguintes valores:

Termo	Nº de equipamentos disponíveis	Probabilidade	
1º	7	$0,7^7$	8,23%
2º	6	$7 \times 0,7^6 \times 0,3$	24,71%
3º	5	$21 \times 0,7^5 \times 0,3^2$	31,77%
4º	4	$35 \times 0,7^4 \times 0,3^3$	22,69%
5º	3	$35 \times 0,7^3 \times 0,3^4$	9,72%
6º	2	$21 \times 0,7^2 \times 0,3^5$	2,50%
7º	1	$7 \times 0,7 \times 0,3^6$	0,36%
8º	0	$0,3^7$	0,02%

Tabela 1 - Termos do Polinômio de Newton

A soma dos 4 primeiros termos nos fornece a probabilidade de termos pelo menos 4 equipamentos em operação, que seria 87,4%.

A distribuição utilizada considera os eventos de disponibilidade e não disponibilidade como aleatórios, respeitando as probabilidades de sucessos e fracassos adotadas. Isso significa dizer que a distribuição não considera nenhuma possível influência externa sobre o momento

em que os equipamentos estão ou não disponíveis. Essa situação não corresponde à realidade do trabalho em uma mina. Toda mineração possui agendamentos de paradas para cada equipamento para realização de manutenção preventiva e relativa flexibilidade para manutenções corretivas de menor gravidade para que o número mínimo de equipamentos necessários seja mantido em operação.

Dessa forma, a probabilidade que a distribuição fornece será menor que a probabilidade real. A utilização do valor fornecido pela distribuição binomial pode levar a um dimensionamento da frota com número excessivo de equipamentos. Será preciso então definir qual probabilidade mínima deverá ser obtida através da distribuição binomial para que se possa ter uma confiança suficiente no número mínimo de equipamentos que estarão em operação simultaneamente. O porte dos equipamentos será definido de forma que esse número mínimo de equipamentos obtido seja suficiente para manter a produção necessária.

4. Método de Dimensionamento

Para a aplicação do método foi utilizado o software Microsoft Office Excel 2003.

A planilha se apresenta da seguinte forma:

Votorantim Metais		Dimensionamento de Equipamentos de Carga									
Disponibilidade:		cenário 1 cenário 2 cenário 3 cenário 4 cenário 5 cenário 6 cenário 7 cenário 8 cenário 9 cenário 10									
Probabilidade de Corte:		Nº de equipamentos:									
Movimentação Anual (kt):		Nº de equip. efetivo:									
Horas de operação anual (h):		Probabilidade Binomial:									
Densidade do material empolado (t/m³):		Informações da Operação									
Paradas fixas da produção (h/dia):		Qualidade organizacional (%):									
(As paradas fixas englobam as paradas diárias conhecidas, como: troca de turno, paradas para almoço, lanche e etc.)		Excelente: 92% (Trabalho efetivo de 55 minutos/hora) Boa: 83% (Trabalho efetivo de 50 minutos/hora) Regular: 75% (Trabalho efetivo de 45 minutos/hora) Fraca: 67% (Trabalho efetivo de 40 minutos/hora)									
Fator de enchimento da concha (%):		Facilidade de Carregamento: + (s)									
Total: 95 a 100% (areia, brita, pellets) Fácil: 90 a 95% (terra, argila, carvão) Médio: 80 a 90% (material desmontado) Difícil: 70 a 80% (matacões)		Carregamento Fácil : 0 s Carregamento Médio : 4 s Carregamento Difícil : 9 s									
Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Número de equipamentos na frota	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ciclo fixo (tempo de passo)* (s)											
Massa carregada por ciclo sugerida (t):	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
Volume carregado por ciclo sugerido (m³):	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	

Ilustração 9 - Planilha de Dimensionamento

O método consiste na análise de diferentes cenários (diferentes números de equipamentos na frota) a fim de que se obtenha uma recomendação adequada para as características de cada operação.

O fator de probabilidade de corte é o fator que determina qual o valor de probabilidade acima do qual o valor calculado através da distribuição binomial é aceitável. Este valor deve ser estimado com base em operações reais de carregamento semelhantes à operação para a qual se deseja dimensionar os equipamentos. Com dados de históricos de equipamentos e produções, deve-se variar o valor de probabilidade de corte até que se obtenha o valor máximo que retorne uma recomendação de equipamentos equivalente à situação real. No caso de expansões de minas em operação, recomenda-se que apenas os dados da própria mina sejam ser utilizados.

Com a inserção dos dados de disponibilidade e probabilidade de corte, uma função criada realiza os cálculos variando o número de equipamentos disponíveis de forma decrescente até que a probabilidade de corte seja alcançada.

Para uma frota de n equipamentos, calcula-se a probabilidade, através da distribuição binomial, de se ter n equipamentos disponíveis. Com a condição não satisfeita, calcula-se a probabilidade de se ter pelo menos n-1 equipamentos disponíveis. Com a condição não satisfeita, calcula-se a probabilidade de se ter pelo menos n-2 equipamentos disponíveis e assim sucessivamente. Caso a condição de probabilidade de corte não seja alcançada por nenhum equipamento, a função encerra seus cálculos com n=1.

O número de equipamentos que satisfaz a condição de probabilidade de corte é denominado número de equipamentos efetivo.

A função criada em código VBA, denominada “equip”, foi escrita da seguinte forma:

```
Public Function equip(frota As Integer, disponibilidade As Double, probdesejada As Double) As Integer
```

```
Dim probreal
```

```
probreal = 0
equip = frota + 1
```

```
Do While probreal < probdesejada
```

```
If equip > 1 Then
```

```
equip = equip - 1
```

```
End If
```

```
probreal = 1 - Application.WorksheetFunction.BinomDist(equip - 1, frota, disponibilidade, True)
```

```
If equip = 1 Then
```

```
probreal = 1
```

```
End If
```

```
Loop
```

```
End Function
```

Dessa forma, em um frota com n equipamentos, com o ajuste do fator de probabilidade de corte e com a disponibilidade esperada, teremos n-m equipamentos efetivos, ou seja, haverá confiança de que teremos ao menos n-m equipamentos em operação simultânea durante todo o tempo.

Assim, as necessidades de produção são divididas em n-m equipamentos, para que se possa sempre contar com equipamentos capazes de realizar as necessidades de produção.

Após o cálculo do número de equipamentos efetivos, se prosseguem os cálculos para a escolha das características do equipamento.

Para o cálculo do porte serão considerados os seguintes fatores:

- Movimentação anual (MA): Massa total movimentada pelos equipamentos de carga no período de um ano, em kilotoneladas.
- Horas de operação anual (HOA).
- Densidade do material empolado (DME), em t/m³.
- Paradas fixas da produção (PFP): englobam as paradas diárias conhecidas, como: troca de turno, paradas para almoço, lanche e etc., em horas por dia.
- Fator de enchimento da concha (FEC):
 - Total: 95 a 100% (areia, brita, pellets)
 - Fácil: 90 a 95% (terra, argila, carvão)
 - Médio: 80 a 90% (material desmontado)

- Difícil: 70 a 80% (matacões)
- Qualidade Organizacional (QO): Relação que indica quanto tempo, efetivamente, foi empregado nas operações de carregamento.
 - Excelente: 92% (Trabalho efetivo de 55 minutos/hora)
 - Boa: 83% (Trabalho efetivo de 50 minutos/hora)
 - Regular: 75% (Trabalho efetivo de 45 minutos/hora)
 - Fraca: 67% (Trabalho efetivo de 40 minutos/hora)
- Facilidade de carregamento (FC): Adiciona-se tempo ao tempo de passo conforme a facilidade do carregamento.
 - Fácil: + 0 segundos
 - Médio: + 4 segundos
 - Difícil: + 9 segundos
- Ciclo fixo ou tempo de passo (TP): Será inserido um tempo de passo médio, em segundos, do tipo de máquina que será utilizada. Com a recomendação final, pode-se retornar a esse campo e inserir o valor real da máquina escolhida para verificar se não haverá nenhuma mudança. Para retro-escavadeiras ou shovels, o ciclo fixo seria o tempo entre o enchimento da caçamba, giro, despejo no caminhão e giro retornando à posição inicial. Já para pás carregadeiras e LHDs, o ciclo fixo seria o tempo de enchimento da caçamba, manobra, eventual trecho percorrido até descarregamento e retorno.

Com esses fatores, é possível calcular o tempo total de trabalho anual, o número de ciclos que será realizado e massa que deve ser carregada por ciclo para que se atenda a produção anual. Também é possível calcular o volume da concha que será necessário.

Massa carregada por ciclo:

$$\text{massa carregada por ciclo} = \frac{\frac{MA \times 1000}{HOA}}{\frac{\text{Num.Equip.Efetivo}}{(24 - PFP) \times \text{Disponib.}}} \times \frac{3600}{24} \times \frac{QO}{CF + FC}$$

Volume carregado por ciclo:

$$\text{volume carregado por ciclo} = \frac{\text{massa carregada por ciclo}}{DME \times FEC}$$

A seguir aplicaremos o método a um caso real a fim de se comprovar a qualidade dos resultados obtidos pela planilha.

4.1. Aplicação do Método

Consideraremos os dados da mina de Vazante para a preparação da planilha. Com a planilha preparada, aplicaremos o método para a mina de Morro Agudo e compararemos o resultado obtido com a situação real.

Primeiramente consideraremos os dados dos equipamentos de carregamento. Para os anos de 2006 e 2007, foram considerados os dados de disponibilidade dos equipamentos mês a mês, o que nos forneceu:

$$\text{Disponibilidade média} = 58,14\% \\ \text{Desvio Padrão} = 23,08\%$$

Considerando a disponibilidade da frota (conjunto de todos os equipamentos de carregamento) mês a mês, obtivemos:

$$\text{Disponibilidade média} = 58,63\% \\ \text{Desvio padrão: } 8,02\%$$

Os modelos e disponibilidades dos equipamentos estão disponíveis com as informações utilizadas para o dimensionamento no ANEXO A. Existe uma variação no número de equipamentos dentro do período analisado, devido a situações particulares da mina, mas considerou-se que o número de equipamentos ideal era de quatro LHDs em 2005 e de cinco LHDs a partir de 2006.

A movimentação total de massa na mina de Vazante, para cada ano, está expressa na Tabela . Os dados para 2008 foram estimados com base na produção até outubro de 2008.

Ano	2005	2006	2007	2008
Movimentação (kt)	1290	1510	1930	1710

Tabela 2 - Movimentação Total de Vazante

Os demais dados utilizados como tempo de ciclo e qualidade organizacional são informações reais do regime de operação da mina.

Para cada ano, obtivemos os seguintes resultados da planilha, para o ajuste da probabilidade de corte.

- 2005:

Votorantim Metais		Dimensionamento de Equipamentos de Carga																			
Disponibilidade:	58.63%	cenário 1 cenário 2 cenário 3 cenário 4 cenário 5 cenário 6 cenário 7 cenário 8 cenário 9 cenário 10																			
Probabilidade de Corte:	80.46%	Nº de equipamentos: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10																			
Movimentação Anual (kt):	1 290	Nº de equip. efetivo: 1 1 1 2 2 2 3 3 4 5																			
Probabilidade Binomial:																					
58.63% 82.89% 92.92% 80.47% 90.20% 95.24% 88.99% 94.12% 88.46% 80.99%																					
Informações da Operação																					
Movimentação Anual (kt):	1 290	Paradas fixas da produção (hv/dia): 1.5 (As paradas fixas englobam as paradas diárias conhecidas, como: troca de turno, paradas para almoço, lanche e etc.)				Qualidade organizacional (%): 67% Excelente: 92% (Trabalho efetivo de 55 minutos/hora) Boa: 83% (Trabalho efetivo de 50 minutos/hora) Regular: 75% (Trabalho efetivo de 45 minutos/hora) Fraca: 67% (Trabalho efetivo de 40 minutos/hora)															
Horas de operação anual (h):	8 760	Fator de enchimento da concha (%): 90% Total: 95 a 100% (areia, brita, pellets) Fácil: 80 a 95% (terra, argila, carvão) Médio: 80 a 90% (material desmontado) Difícil: 70 a 80% (matações)				Facilidade de Carregamento: + (s) 4 Carregamento Fácil : 0 s Carregamento Médio : 4 s Carregamento Difícil : 9 s															
Densidade do material empolado (t/m³):	1.65	Dimensionamento																			
Número de equipamentos na frota	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Cenário																			
Ciclo fixo (tempo de passo)* (s)	210 210 210 210 210 210 210 210 210 210	Número de equipamentos na frota																			
Massa carregada por ciclo sugerida (t):	23.77 23.77 23.77 11.89 11.89 11.89 7.92 7.92 5.94 4.75	Ciclo fixo (tempo de passo)* (s)																			
Volume carregado por ciclo sugerido (m³):	16.01 16.01 8.00 8.00 8.00 5.34 5.34 4.00 3.20	Massa carregada por ciclo sugerida (t):																			

Ilustração 10 - Vazante 2005

- 2006:

 Votorantim Metais		Dimensionamento de Equipamentos de Carga									
		cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5	cenário 6	cenário 7	cenário 8	cenário 9	cenário 10
Disponibilidade:	58.63%	Nº de equipamentos:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Probabilidade de Corte:	90.20%	Nº de equip. efetivo:	1	1	1	1	2	2	2	3	3
		Probabilidade Binomial:	58.63%	82.89%	92.92%	97.07%	90.20%	95.24%	97.74%	94.12%	96.95%
											93.43%
Informações da Operação											
Movimentação Anual (kt):	1 510	Paradas fixas da produção (h/dia):	1.5	Qualidade organizacional (%):							
Horas de operação anual (h):	8 760	(As paradas fixas englobam as paradas diárias conhecidas, como: troca de turno, paradas para almoço, lanche e etc.)		Excelente:	92% (Trabalho efetivo de 55 minutos/hora)						67%
Densidade do material empolado (t/m³):	1.65	Fator de enchimento da concha (%):	90%	Bom:	83% (Trabalho efetivo de 50 minutos/hora)						
		Total:	95 a 100% (areia, brita, pellets)	Regular:	75% (Trabalho efetivo de 45 minutos/hora)						
		Fácil:	90 a 95% (terra, argila, carvão)	Fraca:	67% (Trabalho efetivo de 40 minutos/hora)						
		Médio:	80 a 90% (material desmontado)								
		Difícil:	70 a 80% (matações)								
Dimensionamento											
Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Número de equipamentos na frota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ciclo fixo (tempo de passo)* (s)	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	
Massa carregada por ciclo sugerida (t):	27.82	27.82	27.82	27.82	13.91	13.91	13.91	9.27	9.27	6.96	
Volume carregado por ciclo sugerido (m³):	18.74	18.74	18.74	18.74	9.37	9.37	9.37	6.25	6.25	4.68	

Ilustração 11 - Vazante 2006

- 2007:

 Votorantim Metais		Dimensionamento de Equipamentos de Carga									
		cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5	cenário 6	cenário 7	cenário 8	cenário 9	cenário 10
Disponibilidade:	58.63%	Nº de equipamentos:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Probabilidade de Corte:	65.86%	Nº de equip. efetivo:	1	1	1	2	3	3	4	4	5
		Probabilidade Binomial:	58.63%	82.89%	92.92%	80.47%	65.86%	80.13%	68.33%	80.44%	70.42%
											80.99%
Informações da Operação											
Movimentação Anual (kt):	1 930	Paradas fixas da produção (h/dia):	1.5	Qualidade organizacional (%):							
Horas de operação anual (h):	8 760	(As paradas fixas englobam as paradas diárias conhecidas, como: troca de turno, paradas para almoço, lanche e etc.)		Excelente:	92% (Trabalho efetivo de 55 minutos/hora)						67%
Densidade do material empolado (t/m³):	1.65	Fator de enchimento da concha (%):	90%	Bom:	83% (Trabalho efetivo de 50 minutos/hora)						
		Total:	95 a 100% (areia, brita, pellets)	Regular:	75% (Trabalho efetivo de 45 minutos/hora)						
		Fácil:	90 a 95% (terra, argila, carvão)	Fraca:	67% (Trabalho efetivo de 40 minutos/hora)						
		Médio:	80 a 90% (material desmontado)								
		Difícil:	70 a 80% (matações)								
Dimensionamento											
Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Número de equipamentos na frota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ciclo fixo (tempo de passo)* (s)	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	
Massa carregada por ciclo sugerida (t):	35.56	35.56	35.56	17.78	11.85	11.85	8.89	8.89	7.11	7.11	
Volume carregado por ciclo sugerido (m³):	23.95	23.95	23.95	11.97	7.98	7.98	5.99	5.99	4.79	4.79	

Ilustração 12 - Vazante 2007

- 2008:

Votorantim Metais		Dimensionamento de Equipamentos de Carga															
Disponibilidade:	57.99%	cenário 1 cenário 2 cenário 3 cenário 4 cenário 5 cenário 6 cenário 7 cenário 8 cenário 9 cenário 10															
Probabilidade de Corte:	89.66%	Nº de equipamentos: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10															
Probabilidade Binomial:	57.99% 82.35% 92.59% 96.89% 89.66% 94.90% 97.54% 93.66% 96.66% 92.87%	Nº de equip. efetivo: 1 1 1 1 2 2 2 3 3 4															
Informações da Operação																	
Movimentação Anual (kt):	1 710	Paradas fixas da produção (h/dia): 1.5 (As paradas fixas englobem as paradas diárias conhecidas, como: troca de turno, paradas para almoço, lanche e etc.)				Qualidade organizacional (%): 67% Excelente: 92% (Trabalho efetivo de 55 minutos/hora) Boa: 83% (Trabalho efetivo de 50 minutos/hora) Regular: 75% (Trabalho efetivo de 45 minutos/hora) Fraca: 67% (Trabalho efetivo de 40 minutos/hora)											
Horas de operação anual (h):	8 760	Fator de enchimento da concha (%): 90% Total: 95 a 100% (areia, brita, pellets) Fácil: 90 a 95% (terra, argila, carvão) Médio: 80 a 90% (material desmontado) Difícil: 70 a 80% (matações)				Facilidade de Carregamento: + (s) 4 Carregamento Fácil : 0 s Carregamento Médio : 4 s Carregamento Difícil : 9 s											
Densidade do material empolido (t/m³):	1.65	Dimensionamento															
Número de equipamentos na frota	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Cenário															
Ciclo fixo (tempo de passo)* (s)	210 210 210 210 210 210 210 210 210 210	Número de equipamentos na frota															
Massa carregada por ciclo sugerida (t):	31.86 31.86 31.86 31.86 15.93 15.93 15.93 10.62 10.62 7.96	Ciclo fixo (tempo de passo)* (s)															
Volume carregado por ciclo sugerido (m³):	21.45 21.45 21.45 21.45 10.73 10.73 10.73 7.15 7.15 5.36	Massa carregada por ciclo sugerida (t)															

Ilustração 13 - Vazante 2008

Portanto, para as probabilidades de corte, obtivemos a seguinte situação:

Ano	2005	2006	2007	2008	Média	Desvio Padrão
Probabilidade de Corte (%)	80,46	90,20	65,86	90,20	81,68	11,50

Tabela 3 - Probabilidades de Corte

Agora iremos aplicar esses dados de probabilidade de corte para a mina de Morro Agudo, utilizando a movimentação real da mina no ano de 2007 e a movimentação estimada para 2008 com base nos dados disponíveis até outubro de 2008.

Utilizando o software @Risk em conjunto com o Microsoft Excel, inserimos os dados de disponibilidade e probabilidade de corte como uma distribuição de valores e não um único valor. Conforme pode ser verificado no APÊNDICE I, a distribuição dos valores de disponibilidades de frota para a mina de Vazante podem ser aproximados por uma distribuição normal. Utilizaremos também uma distribuição normal para variar os valores da probabilidade de corte.

O software @Risk realiza um processo de simulação com iterações sucessivas variando os valores de disponibilidade e probabilidade de corte. Com o relatório gerado, podemos realizar uma análise de risco para tomar a melhor decisão.

- 2007:

Movimentação: 1180 kt

Número de LHDs em operação: 4

Modelos: Atlas Copco ST 1020 (3) e ST 1030 (1) com capacidade de 10 t

Vamos considerar o relatório gerado para as opções de quatro e cinco equipamentos na frota.

- 4 equipamentos

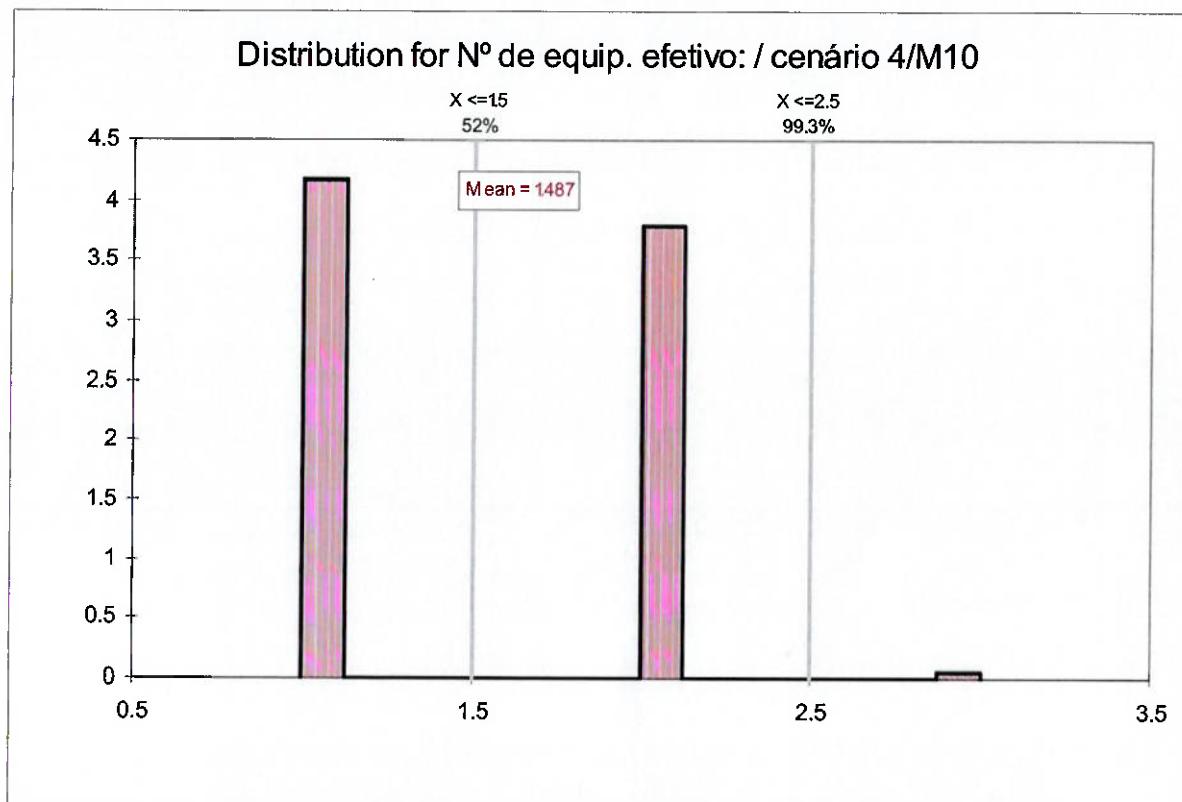


Ilustração 14 - Número de Equipamentos Efetivo - 4 Equipamentos - 2007

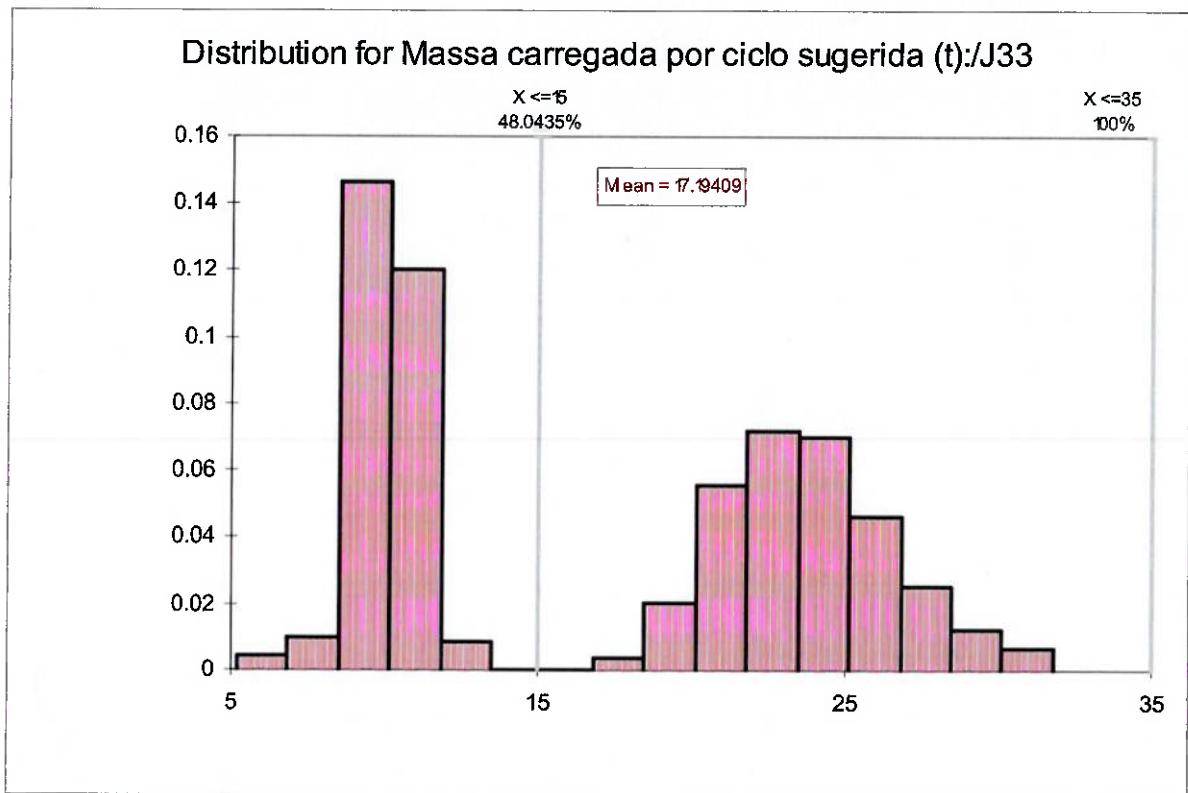


Ilustração 15 - Massa Carregada por Ciclo - 4 Equipamentos - 2007

- 5 Equipamentos

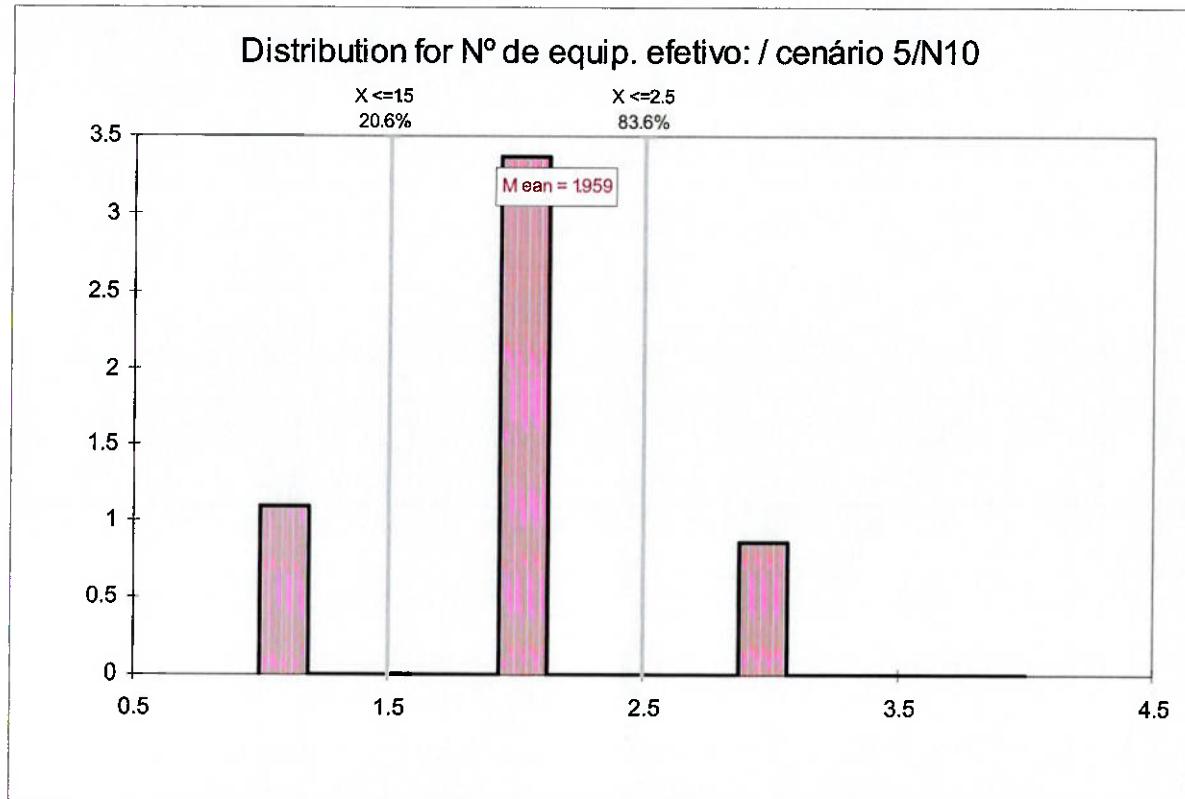


Ilustração 16 - Número de Equipamentos Efetivo - 5 Equipamentos - 2007

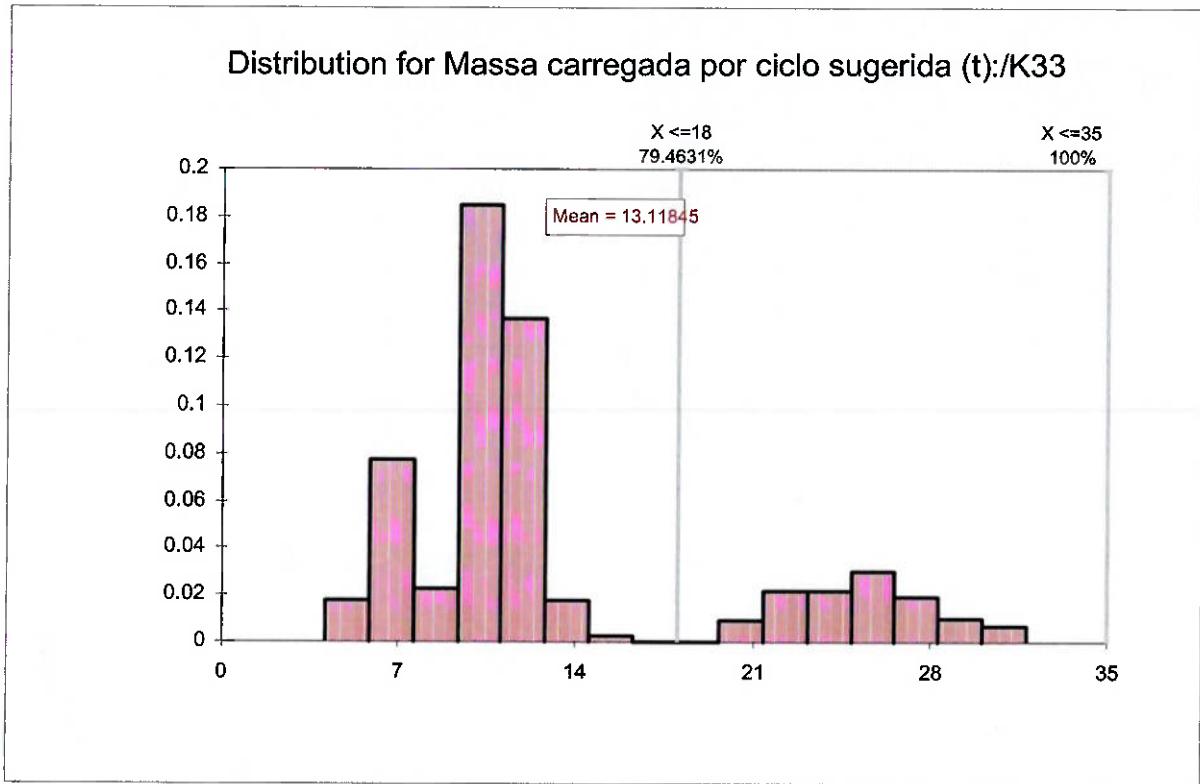


Ilustração 17 - Massa Carregada por Ciclo - 5 Equipamentos - 2007

Para a frota com 4 equipamentos, observamos que o número de equipamentos efetivo será 1 em cerca de 52% dos cenários avaliados pela simulação, 2 em 47,3% dos cenários e 3 em 0,7% dos cenários.

Analizando o gráfico de massa carregada por ciclo, observamos a mesma relação. A forma do gráfico mostra que a escolha do porte do equipamento quando se tem apenas 1 equipamento efetivo oferece maior risco, pois existe um maior número de opções para a massa carregada por ciclo e a diferença entre as opções é menos expressiva. Já para o caso onde se conta com 2 equipamentos efetivos, a escolha do porte se mostra mais fácil, em torno de 10 toneladas.

No caso de 4 equipamentos, verificamos que a escolha do número de equipamentos é extremamente difícil, uma vez que as duas melhores opções apresentam quase o mesmo valor (52% e 47,3% respectivamente). Além disso, não se recomenda a utilização de opções que tenham apenas um equipamento efetivo, considerando que a movimentação de materiais é dividida no mínimo em estéril e minério, o que leva à escolha de equipamentos de capacidade além do necessário. A alternativa com apenas 1 equipamento efetivo apresenta maior dificuldade na escolha do porte da máquina. Com 2 equipamentos efetivos, observa-se a situação oposta, maior risco na quantidade de equipamentos e menor risco na escolha do porte dos equipamentos.

Para a frota com 5 equipamentos, observamos que o número de equipamentos efetivo será 1 em cerca de 20,6% dos cenários avaliados pela simulação, 2 em 63% dos cenários, 3 em 16,3% dos cenários e 4 em 0,1% dos cenários.

Analizando o gráfico de massa carregada por ciclo, observamos que as recomendações de porte são em número semelhante, porém, para a opção de frota com 2 ou mais equipamentos efetivos, temos um maior destaque para equipamentos de capacidades muito próximas de 10 t.

Nesse caso, a escolha se torna mais fácil, uma vez que a opção por 2 equipamentos efetivos atende as necessidades de movimentação em 79,4% das situações possíveis e o porte dos equipamentos pode ser definido como o mais próximo possível de 10 t.

- 2008:

Movimentação: 1368 kt

Número de LHDs em operação: 4

Modelos: Atlas Copco ST 1020 (3) e ST 1030 (1) com capacidade de 10 t

Vamos considerar o relatório gerado para as opções de quatro e cinco equipamentos na frota.

- 4 Equipamentos

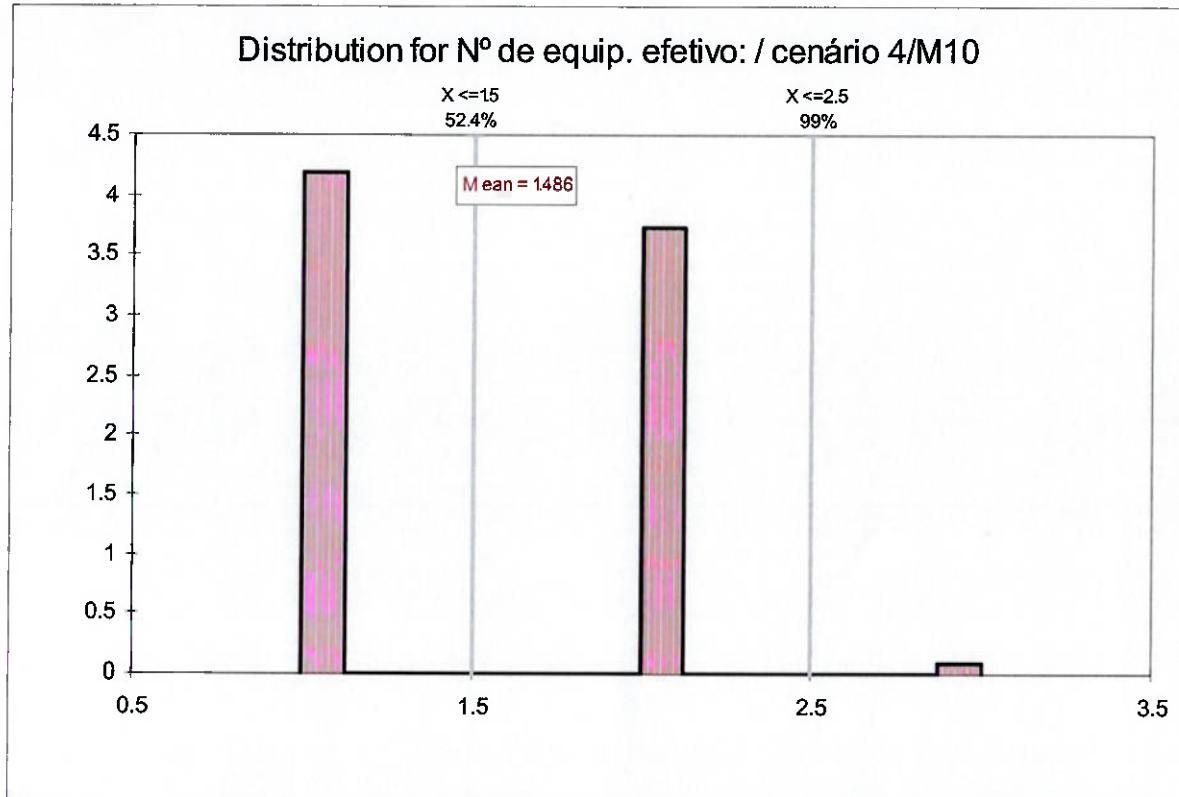


Ilustração 18 - Número de Equipamentos Efetivo - 4 equipamentos - 2008

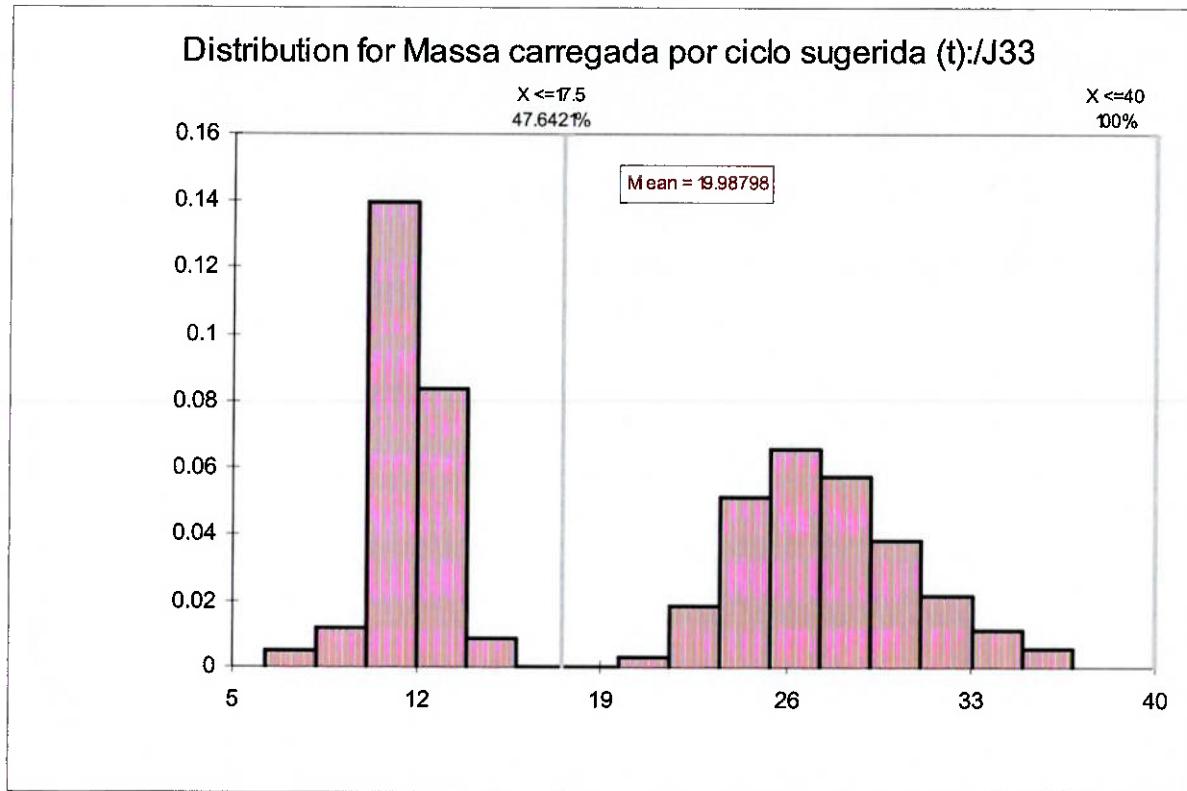


Ilustração 19 - Massa Carregada por Ciclo - 4 Equipamentos - 2008

- 5 Equipamentos:

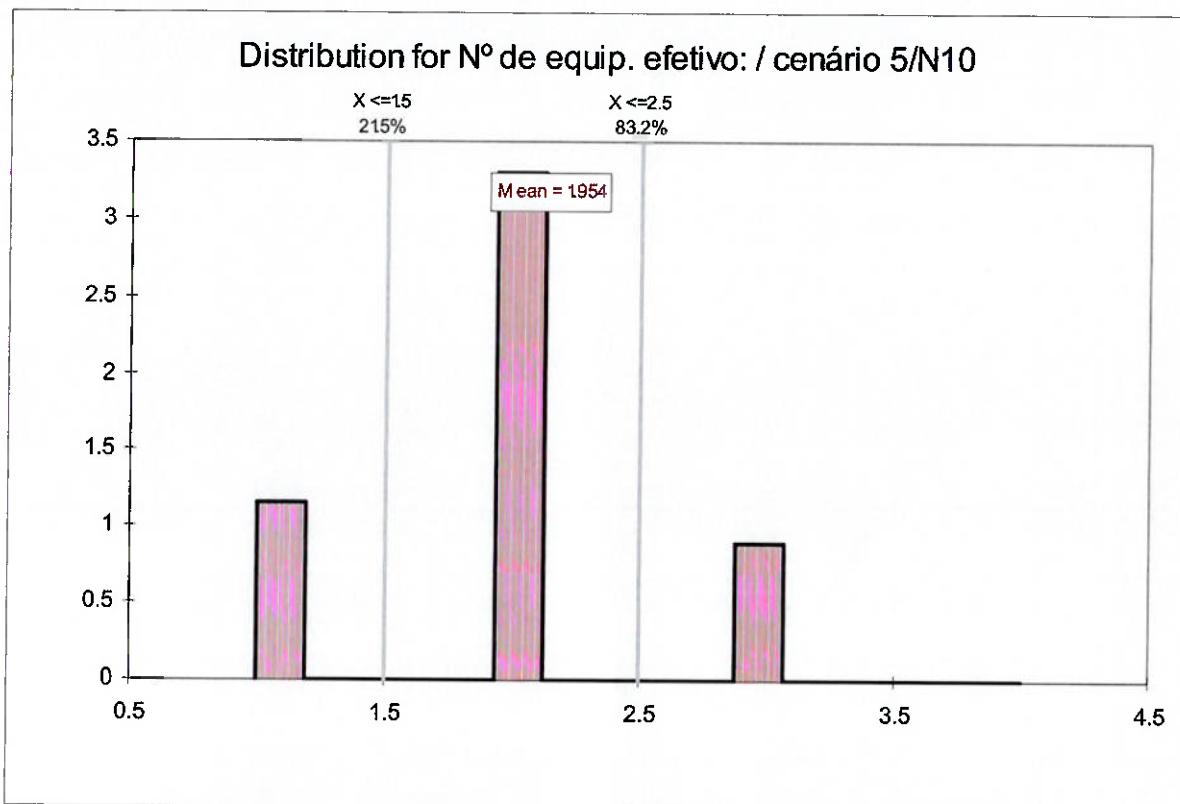


Ilustração 20 - Número de Equipamentos Efetivo - 5 Equipamentos – 2008

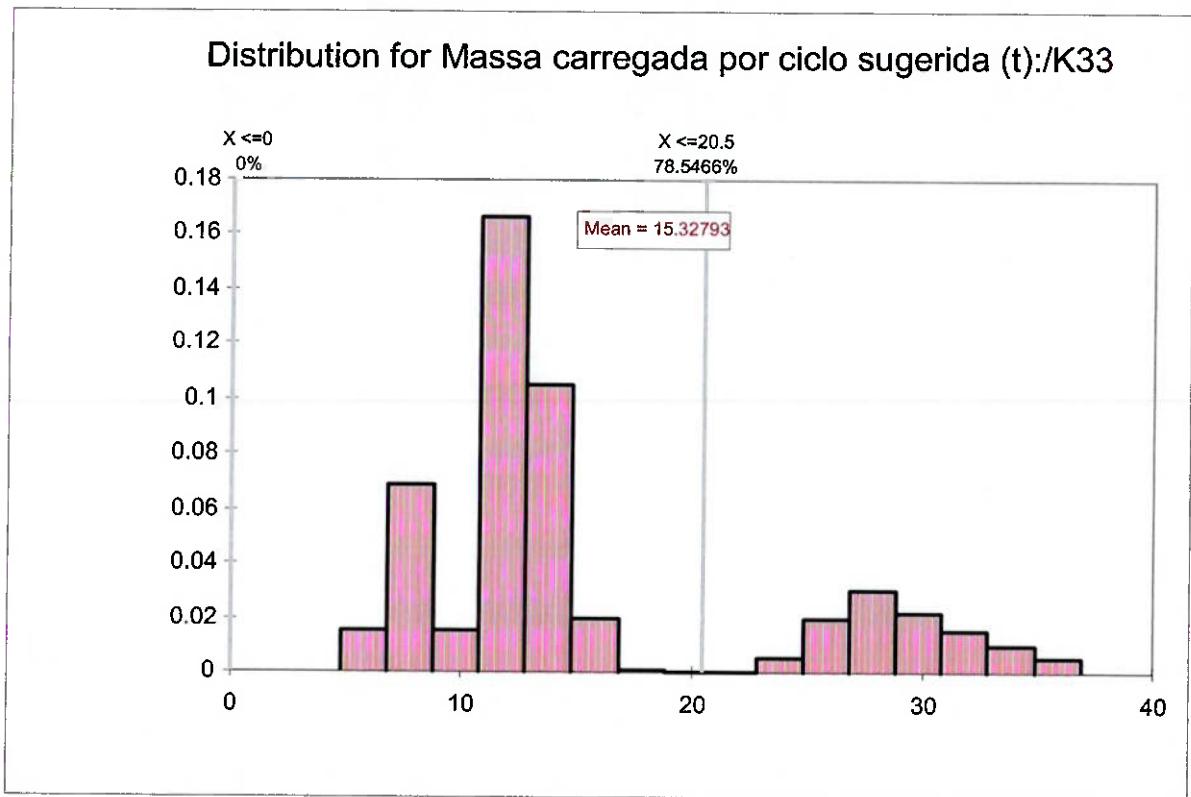


Ilustração 21 - Massa Carregada por Ciclo - 5 Equipamentos - 2008

Para a frota com 4 equipamentos, observamos que o número de equipamentos efetivo será 1 em cerca de 52,4% dos cenários avaliados pela simulação, 2 em 46,6% dos cenários e 3 em 1% dos cenários.

Analizando o gráfico de massa carregada por ciclo, observamos a mesma relação. A forma do gráfico mostra que a escolha do porte do equipamento quando se tem apenas 1 equipamento efetivo oferece maior risco, pois existe um maior número de opções para a massa carregada por ciclo e a diferença entre as opções é menos expressiva. Já para o caso onde se conta com 2 equipamentos efetivos, a escolha do porte se mostra mais fácil, em torno de 12 toneladas.

No caso de 4 equipamentos, verificamos que o menor risco seria dimensionar os equipamentos contando com apenas 1 equipamento efetivo, o que não é recomendado. A alternativa com apenas 1 equipamento efetivo apresenta maior dificuldade na escolha do porte da máquina. Com 2 equipamentos efetivos, observa-se a situação oposta, maior risco na quantidade de equipamentos e menor risco na escolha do porte dos equipamentos.

Para a frota com 5 equipamentos, observamos que o número de equipamentos efetivo será 1 em cerca de 21,5% dos cenários avaliados pela simulação, 2 em 61,7% dos cenários, 3 em 16,8% dos cenários e 4 em 1% dos cenários.

Analizando o gráfico de massa carregada por ciclo, observamos que as recomendações de porte são em número semelhante, porém, para a opção de frota com 2 ou mais efetivos, temos um maior destaque para equipamentos de capacidades muito próximas de 12 t.

Nesse caso, a escolha se torna mais fácil, uma vez que a opção por 2 equipamentos efetivos atende as necessidades de movimentação em 78,5% das situações possíveis e o porte dos equipamentos pode ser definido como o mais próximo possível de 12 t.

Comparando os resultados obtidos, obtivemos a frota com uma unidade de equipamento a mais que a situação real, o que é facilmente explicado pela diferença de disponibilidade que os equipamentos apresentam nas duas minas. A mina de Vazante, pela peculiar situação hidrogeológica, diferente método de lavra, pelo sistema mais complexo de carregamento em alguns realces, com operação por controle remoto e etc., apresenta essa situação de disponibilidade baixa dos equipamentos. Ainda assim, os resultados são considerados extremamente satisfatórios, uma vez que a resposta que o método oferece está totalmente coerente com a realidade das duas minas. Com o conhecimento da realidade da mina de Vazante, poderíamos adotar uma disponibilidade um pouco maior, fornecida pelo fabricante, pela literatura ou estimada pela própria experiência do profissional envolvido com projetos. Utilizando 70% de disponibilidade, com 10% de desvio padrão nos dados de 2008 para a mina de Morro Agudo, teríamos a seguinte resposta para 4 equipamentos na frota:

Distribution for Nº de equip. efetivo: / cenário 4/M10

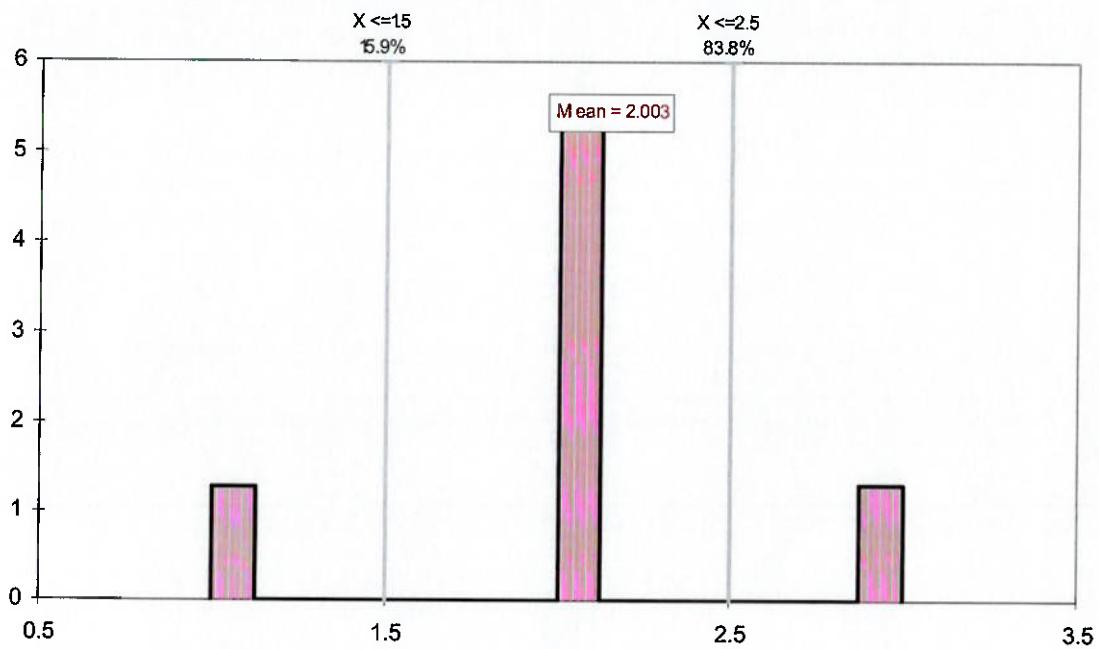


Ilustração 22 - Número de Equipamentos Efetivo Ajustado

Distribution for Massa carregada por ciclo sugerida (t):/J33

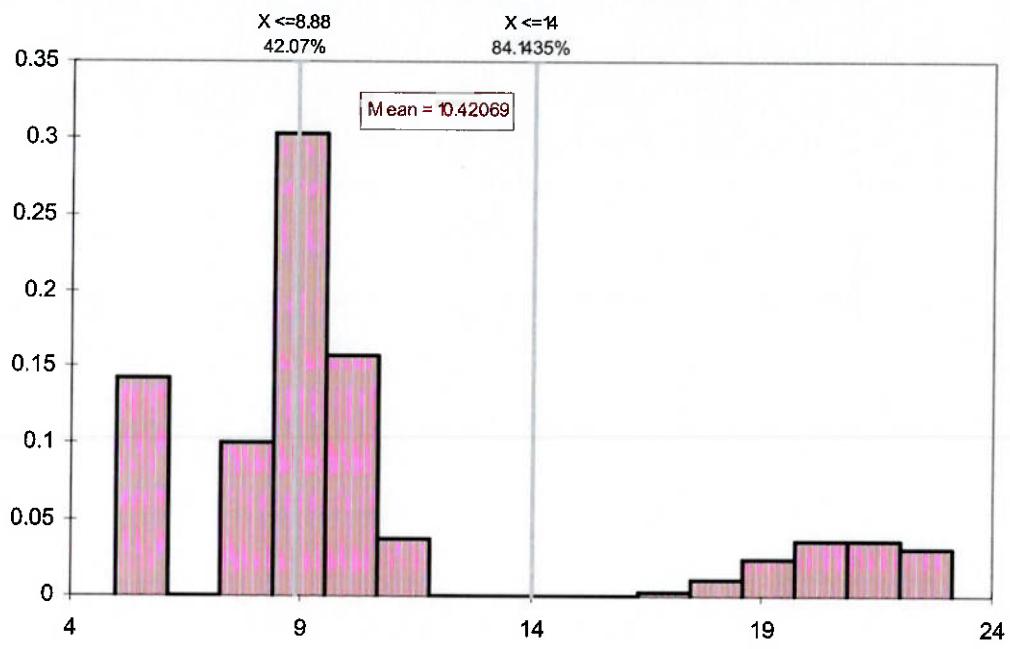


Ilustração 23 - Massa Carregada por Ciclo Ajustado

A resposta do método nos leva a considerar 2 equipamentos efetivos, na frota com 4 equipamentos. A capacidade dos equipamentos deve ser de 9 toneladas.

Essa é exatamente a situação real da mina de Morro Agudo, o que mostra que o ajuste do fator de probabilidade de corte foi feito de maneira satisfatória e o método fornece uma resposta alinhada com a realidade.

5. Conclusão

O método se mostra eficiente para o objetivo que se propõe, recomendando uma frota com quantidade e porte de equipamentos de forma satisfatória, tendo em vista sua aplicação em casos de minas reais, o que permite a comparação do seu resultado com o que é efetivamente praticado.

Os fatores utilizados para o cálculo se mostram suficientes para que o modelo forneça uma resposta adequada.

Pretende-se continuar estudando o tema abordado, realizando aperfeiçoamentos pontuais que se mostrem necessários e testando o método para novos casos, o que possibilitará uma melhor aproximação para o fator de probabilidade de corte. Estudando diferentes aplicações, poderemos correlacionar respostas do modelo com o tipo de operação, método de lavra, tipo de equipamento, produções e etc. Dessa forma será possível perceber as peculiaridades de cada tipo de caso, fazendo um uso mais produtivo desse método.

Além do resultado final satisfatório, o método fornece uma quantidade de informações que permite ao engenheiro conhecer os impactos dos diversos fatores considerados na resposta final, permitindo que se testem diversas possibilidades e que para cada uma se tenha uma análise com maior embasamento e que permita a escolha da melhor opção.

Com maior número e melhor qualidade de informações, pode-se ter confiança que a frota dimensionada atenderá à produção desejada. Cabe ao profissional competente determinar o que é necessário para que se atinja os objetivos da mina, utilizando todas as ferramentas possíveis para esses objetivos sejam alcançados. Quando limitações de equipamentos determinam a produção da mina, o profissional fracassa na sua função e se torna refém das más escolhas adotadas.

6. Referências

Costa Neto, P.L.O. **Probabilidades**. 2^a ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgar Blücher, 2006. 185p.

Coutinho, I.C. **Considerações sobre o dimensionamento de equipamentos de carga e transporte em mineração a céu aberto**. São Paulo: Escola Politécnica, 1998. (Dissertação de Mestrado – 2 volumes)

Kennedy, B.A. (Editor) **Surface Mining**. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1990. 1194p.

Martin, J.W. et al. **Surface mining equipment**. 1st ed. Golden, Colorado: Martin Consultants, 1982. 455p.

Sisselman, R. **E/MJ operating handbook of mineral underground mining**. New York: McGraw-Hill, 1978. 440p. (E/MJ library of operating handbooks, v.3)

Atlas Copco. Fabricante de equipamentos para mineração. Disponível em: <www.atlascopco.com>. Acesso em: outubro 2008

Bucyrus. Fabricante de equipamentos para mineração. Disponível em: <www.bucyrus.com>. Acesso em: outubro 2008.

Caterpillar. Fabricante de equipamentos para mineração. Disponível em: <www.cat.com>. Acesso em: outubro 2008.

Le Tourneau. Fabricante de equipamentos para mineração. Disponível em: <www.letourneau-inc.com>. Acesso em: outubro 2008.

Liebherr. Fabricante de equipamentos para mineração. Disponível em: <www.liebherr.com>. Acesso em: outubro 2008.

Apêndice I – Dados da Frota de Carga da Mina de Vazante

Equipamento	jan/06					fev/06					mar/06									
	ST1000	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520	ST1000	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520	ST1000	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520		
Disponibilidade (%)	46.21	23.32	50.12	73.95	23.80	31.43	36.37	7.67	59.15	79.34	73.30	72.72	4.55	44.94	63.08	70.43	61.68	47.36		
Equipamento	abr/06					mai/06					jun/06					jul/06				
	ST1000	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	ST1520		
Disponibilidade (%)	46.33	72.53	86.21	68.72	6.25	67.06	30.29	77.95	43.00	48.55	0.83	79.59	50.23	68.01	40.15	38.13	38.40	77.91		
Equipamento	ago/06					set/06					out/06					nov/06				
	1810	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520			
Disponibilidade (%)	78.69	74.35	28.00	70.56	67.18	47.42	64.25	74.89	29.14	57.02	79.35	44.56	66.18	83.44	80.29	5.36	48.90	77.19	73.06	60.67
Equipamento	jan/07					fev/07					mar/07					abr/07				
	1810	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520			
Disponibilidade (%)	35.35	76.93	80.26	60.24	40.61	61.26	82.15	69.99	68.28	74.26	80.71	67.28	72.93	81.98	54.33	59.65				
Equipamento	mai/07					jun/07					Jul/07					ago/07				
	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	ST1520	
Disponibilidade (%)	37.88	96.94	79.93	62.27	72.53	61.91	89.87	64.56	81.51	51.79	66.93	65.28	41.77	80.50	17.80	65.87	91.26	75.84	46.79	2.52
Equipamento	set/07					out/07					nov/07					dez/07				
	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	R1700	ST1520	1810	R1700	R1700	ST1520	
Disponibilidade (%)	30.16	77.88	77.13	81.33	3.20	78.60	70.95	73.04	52.44	65.90	57.75	58.08	33.25	23.32	91.31	14.43	65.50	63.68		

Tabela 4 - Dados de Disponibilidade de Equipamentos da Mina de Vazante

	Disponibilidades da Frota (%)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2006	41.47021	54.75843	48.67361	57.84907	49.94859	49.66736	48.64987	62.90054	63.4316	52.51753	58.81667	64.95867
2007	63.19624	63.50223	72.63172	67.22559	69.90998	69.92806	58.45468	56.41747	66.62743	55.64892	58.24514	51.64919

Tabela 5 - Disponibilidade da Frota de Equipamentos da Mina de Vazante

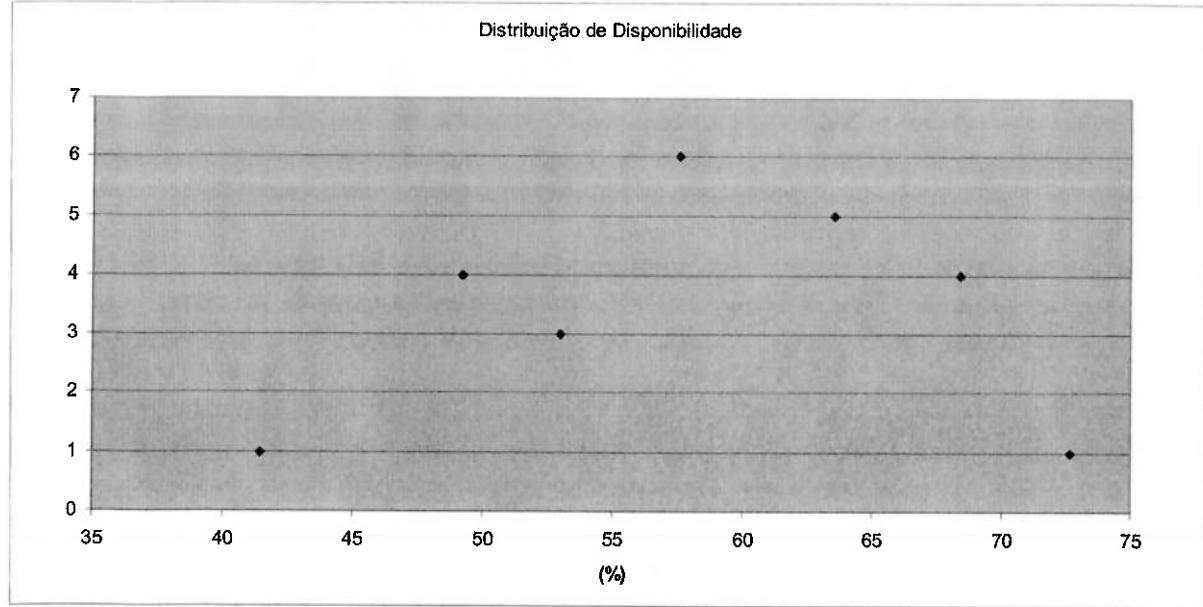


Ilustração 24 - Gráfico da Distribuição de Disponibilidade