



Universidade Federal do Pará
Campus de Marabá
Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente

Eduardo Novaes Uchôa

Metodologia para Análise da Eficiência de Frotas de
Carregamento e Transporte em Mineração utilizando o
Software Microsoft Excel

Marabá
2009

Eduardo Novaes Uchôa

Metodologia para Análise da Eficiência de Frotas de
Carregamento e Transporte em Mineração utilizando o
Software Microsoft Excel

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente,
da Universidade Federal do Pará
Orientador: Prof. Msc. Alexandre J. Buril de Macêdo

Marabá
2009

Eduardo Novaes Uchôa

Metodologia para Análise da Eficiência de Frotas de
Carregamento e Transporte em Mineração utilizando o
Software Microsoft Excel

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente,
da Universidade Federal do Pará
Orientador: Prof. Msc. Alexandre J. Buril de Macêdo

Data da Defesa: 02/07/2009

Conceito:

Banca Examinadora:

Roseane de Lima Silva

Prof^ª. Dr^ª. da Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente
Universidade Federal do Pará

Marinésio P. Lima

Prof. Msc. da Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente
Universidade Federal do Pará

- Orientador

Alexandre J. Buril de Macêdo

Prof. Msc. da Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente
Universidade Federal do Pará

Marabá

2009

À minha família, pelo apoio e educação
Que me foi dado durante toda a vida

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado tanta força para passar este último semestre, que foi o mais trabalhoso desde que entrei na faculdade. Aos meus pais, André Luiz e Maria Auxiliadora, às minha irmãs Camila e Carolina e à minha grande companheira Flávia por sempre estarem ao meu lado, por terem me apoiado incondicionalmente.

Ao meu orientador, Alexandre, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivo. Aos amigos que fiz no período de estudo na Universidade, que proporcionaram momentos inesquecíveis durante estes cinco anos de realização do curso. À companhia Vale S/A pelos dados do despacho que serviram como base para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

Se A é o sucesso,
então A é igual a X mais Y mais Z.

O trabalho é X; Y é o lazer;
e Z é manter a boca fechada.

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE FOTOS	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. PROCESSO DE SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS	16
2.2. CÁLCULOS PRODUTIVOS DE EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO DESCONTÍNUOS	22
2.2.1. Unidades de carregamento que não necessitam de movimentação ..	22
2.2.2. Unidades de carregamento que necessitam de movimentação	26
2.2.3. Capacidade produtiva em carregadores contínuos	30
2.3. CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE UNIDADES DESCONTÍNUAS	33
2.3.1. Unidades descontínuas com caminhos não-fixos	35
2.3.2. Tempo de ciclo de transporte	36
2.3.3. Unidades descontínuas com caminhos fixos	44
2.4. CAPACIDADE PRODUTIVA EM UNIDADES DESCONTÍNUAS HÍBRIDAS ..	45
2.4.1. Equipamentos móveis	47
2.4.2. Equipamentos de base fixa	50
3. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DAS FROTAS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE	53
3.1. BREVE DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO DA MINA DO SOSSEGO (VALE S/A)	53
3.2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO E DA ANÁLISE DE DADOS UTILIZANDO O SOFTWARE MICROSOFT EXCEL	54
3.3. EFICIÊNCIA DA FROTA DE CARREGAMENTO	56
3.4. EFICIÊNCIA DE TRAJETOS DE TRANSPORTE	73
4. CONCLUSÃO	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
ANEXOS	91

RESUMO

O correto dimensionamento e eficiência operacional das frotas de carregamento e transporte são essenciais para o sucesso de um empreendimento mineiro. Este trabalho tem como objetivo a realização de uma revisão bibliográfica que demonstre com objetividade e clareza os conceitos mais importantes para o dimensionamento destas frotas, bem como o desenvolvimento de um método simples para o estudo da eficiência operacional destas frotas no cotidiano da mina.

Para a revisão bibliográfica sobre dimensionamento de equipamentos foram utilizados livros de autores conceituados na área da mineração, entre os quais se cita Howard Hartman, Bruce Kennedy e Guilherme Catalani. No que se diz respeito à análise de eficiência dos equipamentos, foram utilizados dados referentes à operação da mina do Sossego no mês de Janeiro de 2009, porém os dados serão utilizados somente para natureza ilustrativa do método sugerido para a análise da eficiência dos equipamentos.

A ferramenta de análise da eficiência das frotas utiliza o software Microsoft Excel e sua ferramenta de análise de dados. As ferramentas utilizadas serão a distribuição dos dados em histograma e a análise estatística dos dados. Com base na interpretação dos dados obtidos com estas ferramentas, é possível verificar com exatidão se o carregamento está sendo feito com homogeneidade e se o tempo de transporte de cada frente de lavra para o seu destino está adequado ao caminhão utilizado.

Palavras-Chave: Mineração, Eficiência de Frota, Carregamento, Transporte.

ABSTRACT

The correct measure and operational efficiency of the loading and haulage fleets are Essentials for the success of the mining industry. This paper's purpose is to make a bibliography review which demonstrates, in a clear and objective way, the main concepts to measure these fleets and the development of a simple method to analyze the operational efficiency of these fleets at the mine daily work.

For the bibliography review about the equipment measurement several books from highly-respected authors have been used, such as Howard Hartman, Bruce Kennedy and Guilherme Catalani. Regarding the analysis of the equipment efficiency, the data used to illustrate the methodology is from the Sossego Mine in January 2009.

The analysis uses as a tool the Microsoft Office Excel and it's data analysis software. The options used will be the histogram and the statistic analysis of the data provided. . Based on the interpretation on the results obtained, it is possible to verify with a good certainty if the loading is being done homogeneously and if the haulage time at each route is suitable with the truck used.

Key-Words: Mining, Fleet Efficiency, Loading, Haulage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Impacto da Disponibilidade Física e da Utilização na Produtividade.....	18
Figura 2: Ciclo de Operação da Carregadeira.....	27
Figura 3: Tempo de percurso para carregadeira de esteiras.	30
Figura 4: Resistência de Rolamento	40
Figura 5: Tabela de desempenho do Caminhão 793C.....	41
Figura 6: Tabela de desempenho do Retardador do Caminhão 793C.....	42
Figura 7: Gráfico Distância X Tempo para tratores Scraper.....	48
Figura 8: Gráfico de velocidade máxima em declives.	49
Figura 9: Histograma- Tempos de Ciclo P&H 4100.....	58
Figura 10: Histograma- Tonelagem P&H 4100.....	59
Figura 11: Histograma- Tempos de Ciclo P&H 2100.....	60
Figura 12: Histograma- Tonelagem P&H 2100.....	61
Figura 13: Histograma- Tempos de Ciclo CAT 785C	62
Figura 14: Histograma- Tonelagem 785C	63
Figura 15: Histograma: Tempos de Ciclo 793C.....	64
Figura 16: Histograma- Tonelagem 793C	65
Figura 17: Histograma- Tempos de Ciclo CAT 994.....	66
Figura 18: Histograma- Tonelagem CAT 994.....	67
Figura 19: Histograma- Tempos de Ciclo 793C com CAT 994.....	68
Figura 20: Histograma- Tonelagem 793C com CAT 994	69
Figura 21: Histograma- Tempos de Ciclo 785C com CAT 994.....	70
Figura 22: Histograma- Tonelagem 785C com CAT 994	71
Figura 23: Histograma- Tempos de Ciclo Trajeto 1.....	75
Figura 24: Histograma- Tonelagem Trajeto 1.....	76

Figura 25: Histograma- Tempos de Ciclo Trajeto 2.....	80
Figura 26:Histograma- Tempos de Ciclo Trajeto 2 Frota 785C.....	81
Figura 27: Histograma- Tempos de Ciclo Trajeto 2 Frota 793C.....	82
Figura 28: Histograma- Tonelagem Trajeto 2.....	83
Figura 29: Histograma- Tonelagem Trajeto 2 Frota 785C.....	84
Figura 30: Histograma- Tonelagem Trajeto 2 Frota 793C.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de Equipamentos de Carregamento e Transporte.	15
Tabela 2: Comparação entre Escavadeiras Hidráulicas e à Cabo.	24
Tabela 3: Fator de Enchimento da Caçamba.....	24
Tabela 4: Estimativa de Tempo de Ciclo versus Condições Operacionais para Escavadeiras Hidráulicas Caterpillar	26
Tabela 5: Variações do tempo de ciclo em pás-carregadeiras.....	29
Tabela 6: Tempos de Ciclo de Posicionamento.	38
Tabela 7: Tempos de Ciclo de Manobra e Descarga.	39
Tabela 8: Fatores de Redução da velocidade máxima à velocidade média.....	43
Tabela 9: Tempo de Ciclo em Função da Capacidade da Caçamba e do Ângulo de Giro em Escavadeiras Dragline	51
Tabela 10: Altura Ótima do Corte em Função da Capacidade da Caçamba e a dificuldade da Escavação em Escavadeiras Dragline	51
Tabela 11: Fator de Correção para Ângulo de Giro e Altura de Corte em Escavadeiras Dragline.....	52
Tabela 12: Estatística Descritiva do Tempo de Ciclo da P&H 4100	58
Tabela 13: Estatística Descritiva- Tonelagem P&H 4100.....	59
Tabela 14: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo P&H 2100	60
Tabela 15: Estatística Descritiva- Tonelagem P&H 2100.....	61
Tabela 16: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo CAT 785C.....	62
Tabela 17: Estatística Descritiva- Tonelagem 785C.....	63
Tabela 18: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo 793C.....	64
Tabela 19: Estatística Descritiva: Tonelagem 793C	65
Tabela 20: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo CAT 994	66

Tabela 21: Estatística Descritiva- Tonelagem CAT 994	67
Tabela 22: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo 793C com CAT 994	68
Tabela 23: Estatística Descritiva- Tonelagem 793C com CAT 994	69
Tabela 24: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo 785C com CAT 994	70
Tabela 25: Estatística Descritiva- Tonelagem 785C com CAT 994	71
Tabela 26: Cálculo Teórico da Frota de Carregamento	72
Tabela 27: Perfis de Transporte	74
Tabela 28: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo Trajeto 1	76
Tabela 29: Estatística Descritiva- Tonelagem Trajeto 1	77
Tabela 30: Cálculo Teórico do Tempo de Ciclo para o Trajeto 1	78
Tabela 31: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo Trajeto 2	80
Tabela 32: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo Trajeto 2 Frota 785C	81
Tabela 33: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo Trajeto 2 Frota 793C	82
Tabela 34: Estatística Descritiva- Tonelagem Trajeto 2	83
Tabela 35: Estatística Descritiva- Tonelagem Trajeto 2 Frota 785C	84
Tabela 36: Estatística Descritiva- Tonelagem Trajeto 2 Frota 793C	85
Tabela 37: Cálculos Teóricos para Tempos de Ciclo Trajeto 2	86

LISTA DE FOTOS

Foto 1: Escavadeira Hidráulica Frontal.....	23
Foto 2: Escavadeira à Cabo.....	23
Foto 3: Pá-Carregadeira.....	27
Foto 4: Escavadeira Contínua de Rodas	32
Foto 5: Caminhão de Descarga Traseira.....	33
Foto 6: Caminhão de Descarga pelo Fundo.....	34
Foto 7: Caminhão de Descarga Lateral.....	34
Foto 8: Transporte Ferroviário.....	34
Foto 9: Trator Scraper.....	46
Foto 10: Dragline.....	46

1. INTRODUÇÃO

A combinação das atividades de carregamento e transporte é parte fundamental da indústria de mineração. No cenário mais simples, um equipamento é usado para carregar um minério fragmentado em outro que transporta o minério para a usina onde este será beneficiado.

No passado, o equipamento de carregamento era tão primitivo quanto um operador equipado com pá manual e o de transporte, uma carroça puxada por mula. Apesar destas operações realizadas hoje envolvem equipamentos muito mais sofisticados, as operações básicas ainda são as mesmas. Em adição ao carregamento e transporte da *commodity* mineral que será lavrada, muitas operações necessitam também da movimentação de grandes quantidades de material estéril para expor o depósito mineral.

Estes equipamentos devem ser selecionados para se adequar às necessidades da operação. A indústria de mineração usualmente manipula grandes volumes de materiais. Alguns dos maiores equipamentos existentes são empregados em minas a céu-aberto, onde uma única máquina pode escavar um total de 19 milhões de metros cúbicos de material por ano. Apesar de pequenos volumes serem uma exceção, operações mais seletivas resultam na redução do volume total que será movimentado e emprega equipamentos bem menores, uma vez que a lavra é bem pontual.

O correto dimensionamento das frotas de carregamento e transporte é essencial para o sucesso de um empreendimento mineiro. Além do alto investimento inicial, o custo operacional para manter estas frotas é bem elevado. Além dos custos corriqueiros, tais como diesel, pneus, ferramentas de perfuração de solo, revestimento de caçambas, etc., também há o custo de manutenção para estes equipamentos (que, como foi mencionado, é bem elevado uma vez que necessita de mão de obra especializada) e a depreciação do equipamento com o passar do tempo. Portanto, além de se buscar o correto dimensionamento das frotas de carregamento e transporte, deve-se buscar ao máximo a excelência operacional, para diminuir os custos e, conseqüentemente, aumentar os lucros provenientes da atividade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para discutir carregamento e transporte é necessário relacionar tipos específicos de equipamento ou grupos de equipamento com características comuns. Para tanto é necessário um sistema para classificar ou agrupar os vários tipos de equipamentos. HARTMAN (1992, p. 762) propôs um sistema de classificação conforme a Tabela 1 (Classificação de Equipamentos de Carregamento e Transporte):

Tabela 1: Classificação de Equipamentos de Carregamento e Transporte.

FUNÇÃO	MOVIMENTO/TRAJETO	FLUXO	
		DESCONTÍNUO	CONTÍNUO
CARREGAR	ESTACIONÁRIA	Escavadeira Hidráulica	Escavadeira Contínua
	MÍNIMO	Pá Carregadeira	-
TRANSPORTAR	ALEATÓRIO	Caminhão	Correia Transportadora
	FIXO	Trem	Mineroduto
HÍBRIDO	MÓVEIS	LHD	Combinação de Equipamentos
	BASE FIXA	Dragline	

Fonte: Modificado de SME Mining Engineering Handbook (1992)

As duas distinções primárias neste sistema são o tipo de função que o equipamento realiza (Ex.: carregamento, transporte, ou uma combinação de ambos), combinada com seu trajeto ou movimentação e o tipo de fluxo do material em Contínuo ou Descontínuo.

A distinção entre fluxos contínuos ou não de material é importante como ponto de partida para o cálculo de capacidade produtiva. Todos os cálculos de produtividade dos equipamentos de carregamento e transporte que tratam o material com um fluxo não-contínuo possuem como característica a existência de um ciclo de produção. Estes ciclos são seqüências de operações que o equipamento realiza no carregamento ou transporte do material. Portanto, estimar o tempo de ciclo é a chave para determinar a capacidade produtiva deste tipo de equipamento. No caso de equipamentos de fluxo contínuo, o cálculo da capacidade produtiva é tipicamente obtido pela multiplicação da área da seção transversal versus a velocidade do material.

Na Tabela 1, os dois principais tipos de classificação resultam em seis categorias distintas de equipamentos. Como se pode observar, a categoria de equipamentos que realizam ambas as operações de carregamento e transporte utilizando fluxo contínuo não traz referência a nenhum tipo de máquina, todavia necessita da combinação de unidades separadas de carregamento e transporte contínuos operando em série.

2.1. PROCESSO DE SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Para a seleção de equipamentos de carregamento e transporte, é inicialmente necessário determinar as necessidades produtivas do sistema. Geralmente, estes requerimentos são dados em unidade de peso por unidade de tempo, como por exemplo, metros cúbicos/hora.

Quando as necessidades produtivas forem conhecidas, várias combinações de equipamentos e seqüências de operação podem ser desenvolvidas para produzir o volume de material necessário. Este passo necessita de um conhecimento da capacidade produtiva de cada componente específico do sistema de carregamento e transporte proposto. A capacidade produtiva de qualquer componente pode ser descrita, em termos gerais, pelo volume de material que este pode manusear em um determinado instante (capacidade) e o tempo necessário para completar um ciclo de operação ou, em outras palavras, o tempo necessário para aquele volume de material ser movido completamente por aquele componente do sistema (capacidade produtiva).

Os sistemas mais simples de manuseio de material envolvem um determinado volume de material produzido por um único equipamento com um tempo de ciclo bem definido. Sistemas se tornam mais complexos quando múltiplas máquinas são necessárias para satisfazer a necessidade produtiva, quando fluxos contínuos de materiais são produzidos por equipamentos de carregamento ou transporte, ou quando se é necessário prover armazenamento dentro do sistema para acomodar alguma oscilação dos vários componentes.

Antes que um processo de seleção seja descrito, é necessário definir alguns termos fundamentais que são utilizados no dimensionamento de qualquer tipo de equipamento na mineração. Segundo HARTMAN (1992, p. 762), estes termos são:

1. *Produção*: Volume de material que deve ser movimentado em uma operação específica. Pode se referir tanto ao mineral minério a ser produzido (dado em peso) tanto ao material estéril (dado em volume).
2. *Taxa de Produção*: O volume (ou massa) que um equipamento é capaz de produzir em uma unidade de tempo.
3. *Produtividade*: A produção real por unidade de tempo quando todos os fatores de eficiência e gerenciamento foram considerados. (Ex.: t/h).
4. *Eficiência*: A porcentagem da taxa de produção estimada que é realmente produzida por um equipamento. Existem fatores de correção devido à própria máquina, destreza do operador, ou às condições de trabalho.
5. *Disponibilidade Física*: A fração do tempo de operação programado no qual um equipamento estará mecanicamente disponível para uso. A disponibilidade varia de acordo com a idade da máquina, condições de trabalho, a eficiência da manutenção preventiva, etc.
6. *Utilização*: A fração do tempo disponível no qual o equipamento está efetivamente trabalhando. Como um exemplo de perda no tempo disponível do equipamento pode-se citar um atraso por causa de um problema operacional (manutenção de praça, movimentação de cabo de energia, etc.). A Figura 1 (Impacto da Disponibilidade Física e da Utilização na Produtividade) mostra como esses dois fatores reduzem as horas produtivas de um equipamento.

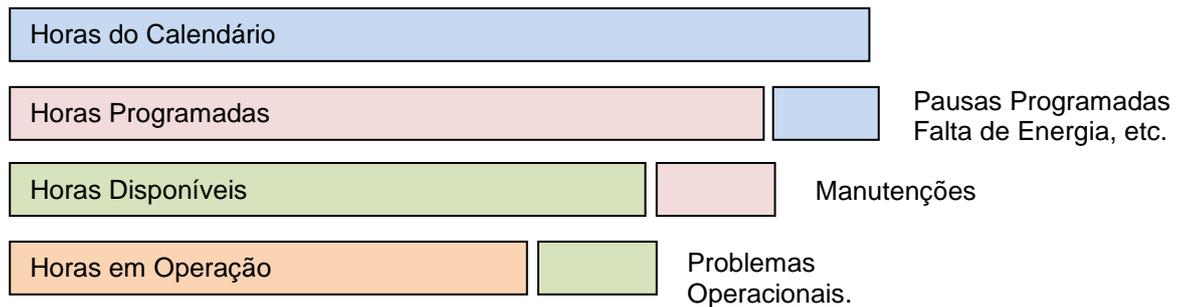


Figura 1: Impacto da Disponibilidade Física e da Utilização na Produtividade.
(Fonte: Surface Mining, p. 652)

7. *Capacidade:* Se refere ao volume de material que um equipamento de manuseio pode movimentar em qualquer momento no tempo. A capacidade pode ser classificada de acordo com os dois tipos abaixo:
- Capacidade Rasa:* O volume de material em um equipamento de carregamento ou transporte quando sua caçamba está cheia até o topo, porém sem material acima das beiradas ou carregado em cima de qualquer parte externa agregada.
 - Capacidade Coroada:* O volume máximo de material que uma unidade de carregamento ou transporte pode movimentar quando o material está amontoado acima das beiradas. Enquanto a capacidade rasa é uma constante para qualquer unidade, a capacidade coroada é uma função das propriedades do material e da forma da unidade.
8. *Capacidade Nominal:* A carga que um equipamento pode carregar em termos de peso. A maioria das máquinas é projetada para carregar um determinado peso ao invés de um volume. Assim, o volume de material que poderá ser manuseado depende da densidade do material.
9. *Fator de Empolamento:* Aumento percentual de volume de um material que ocorre quando este é fragmentado e removido de sua condição natural (Volume no Corte) e é depositado em um estado fragmentado (Volume Solto).
10. *Fator de Enchimento da Caçamba:* Um ajuste à capacidade da caçamba de uma unidade de carregamento. É expresso geralmente como um valor decimal e corrige a capacidade da caçamba para o volume real de material

que é movimentado levando em consideração as características da pilha, o ângulo de repouso, e a habilidade do operador em encher a caçamba.

11. *Ciclo*: Conjunto das operações que um equipamento executa num certo lapso de tempo, voltando, em seguida, à posição inicial para recomeçá-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.

O objetivo do processo de escolha de equipamentos para carregamento e transporte é bem simples: escolher uma máquina ou grupo de máquinas que é capaz de movimentar uma quantidade específica de material através de uma distância conhecida em um determinado período de tempo. Abaixo, está descrito o processo de seleção de equipamentos. (HARTMAN 1992, p.763):

1. *Determinar a produção necessária*: O total de produção necessária pode ser afetado por um número de fatores que são externos a uma mina particular. Estes fatores incluem projeções de venda, contratos, montante de reservas disponíveis, e outras operações da companhia em questão.

Os requerimentos da produção total anual para a mina devem ser então convertidos em taxas de produção diária ou horária para cada operação. As taxas de operação para operações específicas durante o ciclo de mineração é afetado por fatores tais como porcentagem de recuperação, teor de minério, e a relação estéril/minério em operações a céu aberto.

2. *Determinar o alcance/caminho de transporte*: Equipamentos de base fixa carregam em um ponto e então giram em um arco para bascular em um segundo ponto. A distância horizontal máxima na qual um equipamento pode ou carregar ou bascular é chamada de alcance. A geometria do depósito a ser escavado é o fator primário na determinação do alcance necessário do equipamento.

O caminho de transporte se refere à distância e inclinação na qual um equipamento deve se mover, podendo esta distância ser em uma linha reta ou não. A topografia é a consideração primária ao determinar caminhos de transporte em minas a céu aberto. No caso de minas subterrâneas, o trajeto do transporte é limitado basicamente pela geometria das aberturas da mina. Além disso, podem surgir variáveis não-previstas (heurísticas) pelo planejamento, tais como acidentes, mau tempo, cruzamentos de equipamentos e etc. que afetam diretamente a produtividade do equipamento em questão.

3. *Calcular o tempo de ciclo:* O tempo de ciclo para uma unidade de operação pode ser dividido em dois componentes primários. O primeiro componente consiste naquelas atividades que possuem uma duração relativamente constante de uma aplicação para a próxima. Isto inclui atividades tais como manobrar, bascular e carregar. Estimativas de tempo necessário para cada um desses componentes fixos do ciclo são geralmente fornecidas pelos fabricantes de equipamentos. Estas estimativas são baseadas em experiência e são dadas para modelos específicos de equipamentos operando em uma variedade de condições de trabalho. O componente variável do tempo de ciclo é associado com o tempo de percurso para os equipamentos móveis e o tempo de giro de equipamentos de base fixa. O tempo de giro é controlado basicamente pelo ângulo de giro.

4. *Calcular a Capacidade:* A relação geral entre a taxa de produção, tempo de ciclo e capacidade é bem simples e é mostrada abaixo:

$$\text{Taxa de Produção} = \text{Capacidade} \times (\text{n}^\circ \text{ de ciclos/unidade de tempo}) \quad \text{Eq. (1)}$$

Quando todos os fatores de eficiência são considerados:

$$\text{Produtividade} = \text{Taxa de produção} \times \text{Fatores de Eficiência} \quad \text{Eq. (2)}$$

O cálculo da capacidade necessária é direto uma vez que as necessidades produtivas e as estimativas forem feitas para os tempos de ciclo e todos os

fatores de eficiência. No entanto é importante lembrar que máquinas devem ser projetadas para manusear um peso ao invés de um volume específico. Portanto, é necessário considerar a capacidade calculada da máquina juntamente com a densidade do material para se ter certeza que a produção requerida pode ser alcançada com o equipamento selecionado.

5. *Iterações para melhorar a produtividade:* No Passo 3 (Calcular Tempo de Ciclo) acima, algumas suposições tiveram que ser feitas no que se diz respeito à classe do equipamento que será usado para que o tempo de ciclo possa ser estimado baseado no caminho determinado para o transporte de material. A capacidade calculada no passo 4 (Calcular a Capacidade) pode não ser obtida com a classe de equipamento escolhido no passo 3. Com isto deverá ser feito um ajuste no tempo de ciclo, sendo necessário um refinamento maior na capacidade projetada. Várias iterações podem ser feitas antes que uma solução satisfatória seja alcançada. Pode ser que haja, no entanto, mais de uma solução de equipamentos para a questão dos equipamentos de carregamento e transporte. Sabendo-se que a taxa de produção é inversamente proporcional ao tempo de ciclo, diversas iterações podem ser feitas para produzir um número de alternativas para o carregamento e transporte para comparações de custos.
6. *Calcular o tamanho da frota:* Para a seleção do tamanho da frota, pode-se ter a opção de escolher uma frota menor, porém com equipamentos de capacidade nominal maior, ou o cenário inverso. No caso de equipamentos com capacidades maiores, obtêm-se uma economia de escala (o custo de manuseio do material tende a ser menor quando a capacidade do equipamento aumenta), no entanto este ganho deve ser ponderado contra a incerteza associada com a disponibilidade de um número menor de máquinas.
7. *Iterações para reduzir custos de compra e operação:* O processo de seleção de equipamentos pode encontrar diversas alternativas exequíveis de sistemas de carregamento e transporte. Estas alternativas podem incluir um único equipamento, equipamentos trabalhando em conjunto, ou uma frota de equipamentos. Uma comparação de custos deve ser feita para avaliar a

despesa total por unidade de produção considerando as diferenças em inversões de capital, gastos operacionais, e a vida útil do equipamento.

2.2. CÁLCULOS PRODUTIVOS DE EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO DESCONTÍNUOS

Estes equipamentos podem ser divididos em duas classes:

- a) Aqueles que não necessitam de movimentação. Dentre as unidades que não necessitam de movimentação incluem escavadeiras hidráulicas, escavadeiras a cabo e retro-escavadeiras.
- b) Aqueles que necessitam de uma pequena movimentação são as pás carregadeiras (*Front End Loaders – FEL*) e as Autoportantes (*Load Haul Dump*).

2.2.1. Unidades de carregamento que não necessitam de movimentação:

A escavadeira hidráulica (Foto 1) e a escavadeira à cabo (Foto 2) são exemplos de unidades descontínuas que não necessitam de movimentação. Como qualquer outro equipamento de manuseio de material, a produtividade da escavadeira é função da carga útil média, tempo médio de ciclo, e eficiência do trabalho. Se uma estimativa pode prever o tempo de ciclo e a carga útil média, a produção da máquina pode ser definida das seguintes equações, segundo o *Manual de Desempenho da Caterpillar* (Anon., 1990):

$$m^3 / h = \text{ciclos} / 60\text{-min } h \times \text{Carga Útil Média } (m^3) \quad \text{Eq. (3)}$$

Carga Útil Média = Capacidade Nominal da Caçamba x Fator de Enchimento

Eq. (4)

$$m^3 / h \text{ real} = m^3 / 60\text{min} - h \times \text{Fator de Eficiência} \quad \text{Eq.(5)}$$

Para a obtenção da carga em peso (geralmente toneladas) basta multiplicar a carga em m^3 pela densidade do material, sendo esta densidade modificada pelo fator de empolamento do material.

$$t/h \text{ real} = m^3 / h \text{ real} \times (\text{Densidade} / \text{Fator de Empolamento}) \quad \text{Eq. (6)}$$



Foto 1: Escavadeira Hidráulica Frontal. Fonte: Caterpillar



Foto 2: Escavadeira à Cabo. Fonte: P&H

A Tabela 2 (Comparação entre Escavadeiras Hidráulicas e à Cabo) mostra as principais vantagens e desvantagens destas duas escavadeiras.

Tabela 2: Comparação entre Escavadeiras Hidráulicas e à Cabo.

Escavadeira à Cabo	Escavadeira Hidráulica
Vantagens	
Maior Produtividade	Maior Seletividade na Lavra
Máquinas mais Robustas	Força de Escavação não é transmitida para o piso, possibilitando que a lavra seja feita em praças de baixa compactação
Maior vida de Operação	
Custo de Operação Menor	
Desvantagens	
A força de escavação é transmitida para o piso dificultando a operação em rochas brandas/friáveis.	Vazamento de Óleo Hidráulico
	Possibilidade de cortes por pedras nas mangueiras localizadas no “braço da máquina” próximo à caçamba

Fonte: Apresentação Engenharia de Minas-Operação de Mina – Vale (2008)

Carga Útil Média: A carga média útil de uma escavadeira (quantidade real de material que está na caçamba em cada ciclo de escavação) é dependente do tamanho da caçamba, forma, e determinadas características do material (Ex.: o fator de enchimento). O fator de enchimento para alguns tipos de materiais são dados na Tabela 3 (Fator de Enchimento da Caçamba)

Tabela 3: Fator de Enchimento da Caçamba

Fator de Enchimento da Caçamba	
Material	% da Caçamba
Argila Úmida ou Arenosa	100-100
Areia e Cascalho	95-110
Argila Dura e Resistente	80-90
Rocha Bem Fragmentada	60-75
Rocha Pouco Fragmentada	45-50

Fonte: SME Mining Engineering Handbook (p. 765)

Estimando o tempo de ciclo: O ciclo de uma escavadeira é composto de quatro movimentos elementares:

1. Carregar a Caçamba
2. Girar com Caçamba Carregada
3. Bascular o Material
4. Girar com Caçamba Vazia

O tempo total da escavação depende do tamanho da máquina (pequenos equipamentos realizam seu ciclo mais rapidamente) e condições operacionais. Em casos onde estas são ideais, a escavadeira conseguirá realizar o menor tempo de ciclo possível. Exemplos de condições operacionais inadequadas são: Maior dificuldade de escavação, aumento do tamanho da pilha, posição incorreta do caminhão, entre outros. Entretanto, há outro elemento que afeta o desempenho destas unidades, denominada altura ótima do corte. Compreende-se que deverá haver uma relação entre o volume da caçamba e a altura do talude de terra que vai ser escavado.

Se esta altura for pequena e a caçamba de grande capacidade, completado o movimento correspondente à carga haverá apenas o enchimento parcial da caçamba. Para o enchimento total é necessário repetir a operação, aumentando o tempo de ciclo e, assim, reduzindo a produtividade. Isso pode ser facilmente evitado, bastando utilizar uma caçamba de volume menor.

Inversamente, se uma caçamba de dimensões muito reduzidas for usada em relação à altura do banco, haverá perda do material escavado, que não é recolhido pela caçamba, surgindo à necessidade de nova operação de carga do material restante. A utilização da altura ótima de corte, condicionada pela capacidade da caçamba, resulta no aumento da produção do equipamento; ao contrário, o uso de qualquer altura, menor ou maior, irá diminuí-la.

A Tabela 4 (Estimativa de tempo de ciclo) mostra variação do tempo de ciclo de acordo com as condições operacionais. A Tabela define a amplitude do tempo de ciclo freqüentemente experimentado com uma máquina e provê um guia do que é um trabalho “fácil” e um “difícil”.

Os mesmos fatores devem ser considerados no cálculo de produção para os demais equipamentos de carregamento que não necessitam de movimentação.

Tabela 4: Estimativa de Tempo de Ciclo versus Condições Operacionais para Escavadeiras Hidráulicas Caterpillar

Tabela de Estimativa de Tempo de Ciclo					
Tempo de Ciclo	Tamanho do Equipamento				Tempo de Ciclo
	215 & 215 SA	225	235	245	
10 SEC.					10 SEC.
15					15
20 SEC.					20 SEC.
25					25
30 SEC.					30 SEC.
35					35
40 SEC.					40 SEC.
45					45
50 SEC.					50 SEC.
55					55
60 SEC.					60 SEC.

Fonte: SME Mining Engineering Handbook (1992, p.766)

2.2.2. Unidades de carregamento que necessitam de movimentação

A produtividade de uma pá-carregadeira (Foto 3) ou equipamento similar é o produto da massa de material carregado a cada ciclo pela quantidade de ciclos em uma hora. Os tempos de ciclo variam de acordo com as condições operacionais e a estabilidade do equipamento. Os movimentos elementares efetuados pelo

equipamento são mostrados na Figura 2 (Movimentos Elementares da Pá-Carregadeira).



Foto 3: Pá-Carregadeira. Fonte: Komatsu

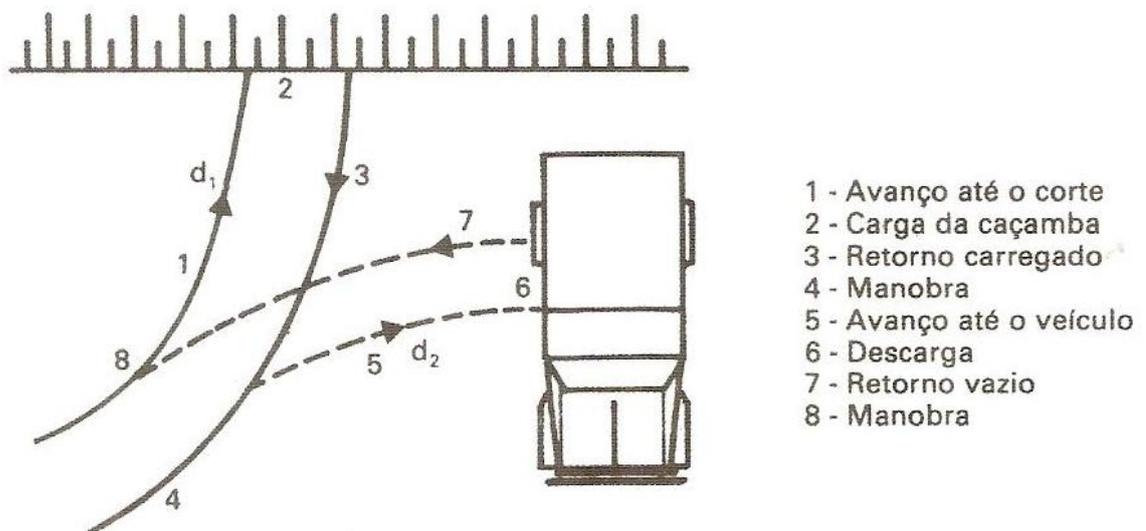


Figura 2: Movimentos Elementares da Pá-Carregadeira.

Fonte: Manual de Escavação (p. 174)

O material carregado em cada ciclo é reflexo do volume da caçamba, características do material (Fator de Enchimento), e a densidade do material. Um erro comum é considerar que o equipamento irá entregar uma caçamba cheia em cada ciclo. Em todos os casos, a densidade do material solto deve ser determinada em kg/m^3 .

A produção horária calculada (kg) = capacidade calculada da caçamba (m^3) x fator de carregamento x densidade do material x ciclos por hora. Para períodos mais longos, um fator de eficiência global também deve ser aplicado.

Tamanho da Caçamba: A capacidade da caçamba é determinada em uma maneira similar aos equipamentos que não necessitam de movimentação.

Tempo de Ciclo: O ciclo desta carregadeira é composto de carregar, transportar, bascular e retornar. Em qualquer trabalho em pilha ou bancada, estas manobras exigem quatro inversões na direção. Quando se carrega um caminhão a partir de uma pilha, a distância viajada é mantida em um valor mínimo. Dependendo do operador, material, tamanho do caminhão, e condições, os segmentos do tempo de ciclo irão variar de acordo com os seguintes valores (SME Mining Engineering Handbook p. 767):

Atividade	Tempo de Ciclo (min.)
Carregar	0,06
Manobrar	0,15
Bascular	0,05
Retornar	0,14
Total	0,40

Este tempo de ciclo deve ser corrigido, a partir de variações provenientes das condições reais de trabalho, de acordo com os seguintes valores da Tabela 5 (Variações do tempo de ciclo em pás-carregadeiras):

Tabela 5: Variações do tempo de ciclo em pás-carregadeiras.

Materiais	Ajuste no Tempo de Ciclo (min.)
Misturados (várias granulometrias)	+ 0,02
Até 3 mm (1/8")	+ 0,02
De 3 mm (1/8") a 20 mm (3/4")	- 0,02
De 20 mm (3/4") a 150 mm (6")	0
De 150 mm (6") em diante	+ 0,03 ou mais
No corte ou fragmentado	+ 0,04 ou mais
Materiais Empilhados	Ajuste no Tempo de Ciclo (min.)
De 3 m (10') de altura ou mais	0
De 3 m (10') ou menos	+ 0,01
Descarregada por Caminhão	+ 0,02
Diversos	Ajuste no Tempo de Ciclo (min.)
Mesmo proprietário das carregadeiras e caminhões	Até - 0,04
Caminhões de Terceiros	Até + 0,04
Operação Contínua	Até - 0,04
Operação Descontínua	Até + 0,04
Descarga em Caçamba Reduzida	Até + 0,04
Descarga em Equipamento Frágil	Até + 0,05

Fonte: Manual Prático de Escavação (2007, p. 176)

Quando as carregadeiras percorrerem distâncias maiores do que as fixadas no tempo de ciclo básico, haverá a necessidade de serem recalculados os tempos variáveis, usando-se os gráficos nos manuais do fornecedor do equipamento e somando-os ao tempo básico.

Até a distância de 10m, aproximadamente, os tempos de percurso para as carregadeiras de pneus são próximos aos gastos pelas de esteiras. A partir dessa distância, dada a maior velocidade das unidades de pneus, será necessária a consulta aos gráficos específicos de cada tipo de equipamento, semelhantes aos da Figura 3 (Tempo de percurso para carregadeira de esteiras).

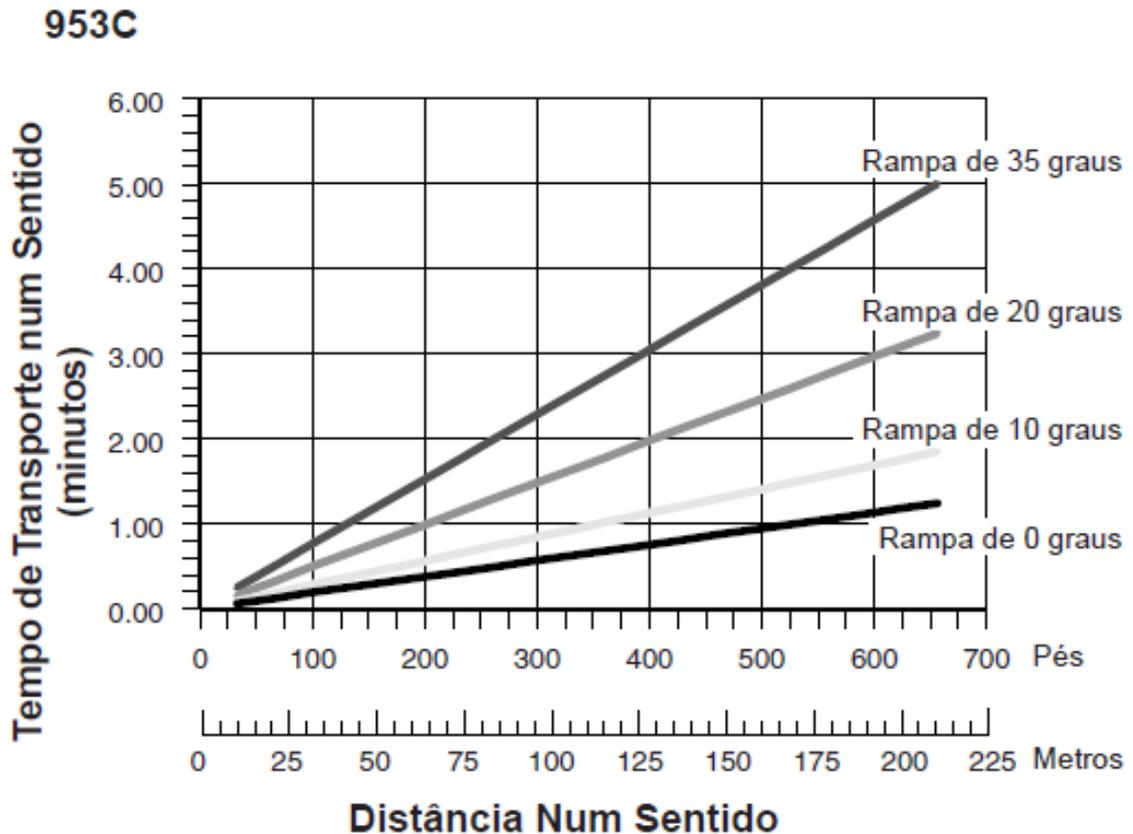


Figura 3: Tempo de percurso para carregadeira de esteiras.
Fonte: Manual de Escavação da Caterpillar

2.2.3. Capacidade produtiva em carregadores contínuos

Escavadores contínuos de Roda (BWE – *Bucket Wheel Excavators*) (Foto 4) são provavelmente o tipo de equipamento predominante nesta classe, mas também incluem escavadeiras de corrente e dragas.

A produtividade teórica de uma BWE, como relatado por HARTMAN (1992, p. 767), é baseada no tamanho da caçamba e no seu número de descargas por minuto. Se Z o número de caçambas da roda, V_1 é a velocidade de corte da roda em m/s e D o diâmetro da roda em (m), então:

$$S_s = V_1 \times Z / \pi D \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde S_s = número de descargas de caçamba por segundo

$$Q_t = I \times S_s \times 3600 \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde I é a capacidade nominal em (m^3) e Q_t = capacidade teórica da escavadeira em m^3/h .

Como pode ser observado nestas equações, o número de descargas depende da velocidade periférica. A velocidade periférica de uma roda de caçambas é limitada pela habilidade da roda em descarregar seu conteúdo da caçamba no chute contra a força-centrífuga contrária atuante. Em teoria, a velocidade máxima periférica deve ser tal que a descarga da caçamba será assegurada. Matematicamente:

$$M \times g = M \times V_1^2 / R \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde M é a massa de material na caçamba (kg), R é o raio da roda (m) e g é a aceleração da gravidade (m/s^2) simplificando:

$$V_1 = \sqrt{g \times R} = V_{m\acute{a}x} \quad \text{Eq. (10)}$$

Valores práticos de velocidade se encontram entre 40% e 60% da $V_{m\acute{a}x}$. Para manter o desgaste dos dentes das caçambas no mínimo, as velocidades não excedem 5 m/s. A velocidade periférica selecionada também dependerá muito da natureza do material que será escavada. Porém a princípio adota-se uma velocidade periférica mais alta se o material à ser escavado é duro, no qual a produção máxima pode não ser alcançada. Baseado em uma produção constante, dobrando a velocidade periférica a caçamba será alimentada somente até a metade, reduzindo o desempenho do equipamento.

Outro fator que afeta a produtividade de uma BWE é a capacidade de enchimento da caçamba. Observou-se que, em material duro, o enchimento da caçamba é por volta de 30 a 40% da capacidade nominal. A relação entre a resistência à escavação e a capacidade horária da BWE é:

$$Q_1 / Q_2 = K_2^2 / K_1^2 \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde Q_1 é a capacidade horária da BWE em m^3 em um material com resistência ao corte de k_1 , e Q_2 é a capacidade horária em um material com uma resistência ao corte de k_2 . Então, a capacidade da BWE em qualquer solo é dada por:

$$Q_a = I \times B_f \times S_s \times 3600 \quad \text{Eq. (12)}$$

Onde B_f é a capacidade de enchimento do solo expresso como uma fração da capacidade nominal da caçamba, S_s é o número de descargas por segundo, e Q_a é a capacidade real da BWE em m^3/h . Em solos com uma alta resistência ao corte, velocidade de corte mais alta com um enchimento da caçamba menor irá resultar em um Q_a bem mais baixo em comparação com Q_t . A relação pode ser tão baixa quanto 20% da $V_{m\acute{a}x}$. Pode-se dizer que, em solos duros, a operação de escavação da BWE se tornou uma operação de moagem.



Foto 4: Escavadeiras Contínuas de Roda (BWE). Fonte: Krupp

2.3. CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE UNIDADES DESCONTÍNUAS.

Estas unidades, segundo HARTMAN (1992, p.768), são divididas em duas categorias:

- Aquelas que possuem um caminho fixo;
- Aquelas que são livres para se mover em qualquer direção.

Os transportadores com caminhos não-fixos são caracterizados basicamente por caminhões (Fotos 5, 6 e 7). O cálculo do tempo de ciclo apresentado enfatiza o desempenho do motor e índice de qualidade da pista, que são problemas cruciais relacionados particularmente ao transporte. Já um exemplo de transportadores com caminhos fixos são os trens de carga (Foto 8).



Foto 5: Caminhão de Descarga Traseira. Fonte: Caterpillar



Foto 6: Caminhão de Descarga pelo Fundo. Fonte: Milbocker-Wagner



Foto 7: Caminhão de Descarga Lateral. Fonte: Foton.



Foto 8: Transporte Ferroviário. Fonte: Rode

2.3.1. Unidades descontínuas com caminhos não-fixos:

A capacidade produtiva de um caminhão, como discutido por HARTMAN (1992, p.768), depende do tamanho de sua carga e o número de viagens que ele pode fazer em uma hora. O tamanho da carga pode ser obtido através de especificações do fabricante. O número de viagens por hora depende do peso do veículo, potência do motor, distância de transporte, condição da pista utilizada e as condições físicas e psíquicas do operador.

A companhia Bucyrus-Erie Co. (Anon., 1979) sugere três diferentes métodos na qual a produtividade pode ser definida, de acordo com o significado e aplicabilidade próprios: produtividade teórica, média e máxima.

1. *Produtividade Teórica*: As toneladas ou metros cúbicos por hora produzida por uma unidade em operação se não ocorrerem atrasos. Isto indica um potencial de 100%, o que raramente, senão nunca, é atingido.

$$\text{Tons (kg) por hora, tph (kph)} = \frac{60}{(\text{tempo de ciclo})} \times (\text{Capacidade do caminhão}) \quad \text{Eq. (13)}$$

$$m^3 \text{ por hora, } m^3/h = \frac{60}{(\text{tempo de ciclo})} \times \frac{(\text{Capacidade do caminhão})}{(\text{fator de empolamento}) \times (\text{densidade})} \quad \text{Eq. (14)}$$

2. *Produtividade Média*: Quantidade, peso ou volume produzido por hora por uma unidade em operação, levando em consideração os atrasos fixos e variáveis. Esta razão deve ser aplicada ao período de tempo desejado (dia, mês, etc.) para estimar a produção total:

$$Tph (kph) = \frac{(U - D) \times 60 \times E \times TR}{U \times C} \quad \text{Eq. (15)}$$

$$m^3/h = \frac{(U - D) \times 60 \times E \times TR}{U \times C \times SF \times M} \quad \text{Eq. (16)}$$

Onde “U” é a unidade de tempo, “D” são os atrasos fixos (h), “E” é a eficiência do trabalho (ajustes para atrasos variáveis), “TR” é a capacidade do caminhão (t ou kg), “C” é o tempo de ciclo (min.), “M” é a densidade do material e “SF” é o fator de empolamento.

3. *Produtividade Máxima por hora*: A quantidade, peso ou volume produzido por hora por uma unidade em operação levando em conta apenas os atrasos variáveis. Esta razão deve ser usada para determinar o número de unidades de transporte para ser destinadas a uma escavadeira para atingir a produção necessária.

$$T_{ph} (kph) = \frac{60 \times (\text{Eficiência do trabalho}) \times (\text{Capacidade do caminhão})}{(\text{tempo de ciclo})} \quad \text{Eq. (17)}$$

$$m^3/h = \frac{60 \times (\text{Eficiência do trabalho}) \times (\text{Capacidade do caminhão})}{(\text{tempo de ciclo}) \times (\text{fator de empolamento}) \times (\text{densidade})} \quad \text{Eq. (18)}$$

2.3.2. Tempo de ciclo de transporte:

As informações abaixo, baseadas em HARTMAN (1992, p. 769) e KENNEDY (1990, p. 681) fornecem uma visão geral do cálculo para determinação do tempo de ciclo de um veículo de transporte para sua movimentação completa: Posicionar, Carregar, Transportar, Manobrar, Bascular e Retornar.

- A produtividade de um caminhão em operação depende da carga média real e do tempo de ciclo médio.
- A combinação adequada do número de caminhões com o equipamento de carregamento (escavadeira, pá carregadeira, etc.) é importante para garantir a melhor operacionalidade do conjunto de equipamentos apropriados. Esta combinação, denominada de Condição de Sincronismo, é obtida pela razão do tempo de ciclo do equipamento de transporte pelo tempo de ciclo do equipamento de carregamento ($N = TC \text{ Transporte} / TC \text{ Carregamento}$).
- Os métodos de manobra e carregamento dos caminhões influenciam no tempo de operação das unidades.

- O layout e design da rota de transporte, incluindo distância, inclinação, resistência ao rolamento, curvas, e limites de velocidade afetam o tempo de percurso.
- Este tempo de viagem também pode ser afetado pela habilidade e saúde física e mental do operador, a manutenção da pista e do caminhão.
- A velocidade ou o tempo de ciclo de um veículo mais lento na frota pode afetar todo o conjunto, especialmente quando se adota uma política de não-ultrapassagem como norma de segurança.
- As condições do piso e do espaço, bem como equipamentos auxiliares necessários, influenciam o tempo de basculamento e de manobra.
- As condições do clima podem resultar em menor eficiência e atrasos operacionais.
- O transporte por meio de caminhões, com várias unidades em operação, é intenso em capital, exigindo de uma boa engenharia e supervisão para garantir uma produtividade máxima dos equipamentos disponíveis.

1- Tempo de Carregamento e Posicionamento: Tempo de posicionamento é aquele tempo necessário para o caminhão manobrar para receber sua carga, já o tempo de carregamento é o tempo que o equipamento de carregamento necessita para alocar uma carga adequada à unidade de transporte. Estes tempos devem se interagir, pois o equipamento de carga deve realizar partes de seu trabalho enquanto o caminhão estiver manobrando.

A combinação do tempo de posicionamento e carregamento depende das condições do espaço e do piso, do equipamento de carregamento, do método de carregamento, a fragmentação da rocha, e a relação entre os equipamentos de carregamento e transporte. Além disso, um posicionamento adequado dos caminhões no ângulo correto e na mesma posição relativa melhora consideravelmente a sincronia do operador a acelera a operação de escavação. O caminhão sempre deve se posicionar no mesmo raio da caçamba para que não seja necessário que a lança se movimente para ajustar a posição.

Há diversos métodos para se determinar o número de caçambas necessárias por ciclo de carregamento. Um dos mais simples e razoavelmente preciso é o seguinte:

$$\text{Peso material (solto) (kg)} = \text{Volume do material (m}^3\text{)} \times \text{Densidade (kg/m}^3\text{)} / \text{Fator de Empolamento).} \quad \text{Eq. (19)}$$

$$\text{Número de tons (kg) por caçamba} = \text{Capacidade da Caçamba m}^3 \times \text{Fator de Enchimento} \times \text{Peso (Solto) (kg).} \quad \text{Eq. (20)}$$

$$\text{Número de Caçambas por Carregamento} = \text{Capacidade Nominal do Equipamento de Transporte (t ou kg)} / \text{t (kg) por passada.} \quad \text{Eq. (21)}$$

$$\text{Tempo de Carregamento (min.)} = \text{Número de passadas} \times \text{Tempo de ciclo da escavação (min.)} \quad \text{Eq. (22)}$$

O valor encontrado deve ser arredondado para o próximo número inteiro mais alto, e geralmente o excesso de carga proveniente deste arredondamento é ignorado no estudo da produção. A experiência mostra que o número ideal de caçambas para carregar as unidades de transporte varia de 3 a 6. Com duas caçambadas, provavelmente devido à rapidez da carga, poderá haver espera no posicionamento da unidade transportadora seguinte e, com mais de seis caçambadas, o tempo de carga cresce inutilmente, fazendo com que a unidade transportadora aumente desnecessariamente o seu tempo de ciclo.

O tempo de posicionamento depende do tipo de equipamento de transporte e suas condições operacionais. Os valores médios são dados na Tabela 6 (Tempos de Ciclo de Posicionamento):

Tabela 6: Tempos de Ciclo de Posicionamento.

Condições Operacionais	Descarga pelo Fundo (min.)	Descarga Traseira (min.)	Descarga Lateral (min.)
Favoráveis	0,15	0,15	0,15
Razoáveis	0,50	0,30	0,50
Desfavoráveis	1,00	0,50	1,00

Fonte: SME Mining Engineering Handbook (p. 769)

2- Tempos de Manobra e Basculamento: É dependente do tipo de caminhão e seu tamanho, as características do material, arranjo do basculamento, espaço disponível, condições do piso, e prática operacional. Como um guia, valores médios para os diferentes tipos de unidades de transporte sob as condições indicadas são mostradas na Tabela 7 (Tempos de Ciclo de Manobra e Descarga):

Tabela 7: Tempos de Ciclo de Manobra e Descarga.

Condições Operacionais	Descarga pelo Fundo (min.)	Descarga Traseira (min.)	Descarga Lateral (min.)
Favoráveis	0,3	1,0	0,7
Razoáveis	0,6	1,3	1,0
Desfavoráveis	1,5	1,5-2,0	1,5

Fonte: SME Mining Engineering Handbook (p. 769)

3- Tempo de Transporte: Para o cálculo do tempo de transporte, é necessário decompor o trajeto que o equipamento irá percorrer em trechos que possuem perfis de inclinação semelhantes. Isto é necessário para se determinar o esforço trator que o equipamento precisa para percorrer o trecho em questão. O *esforço trator* é o que determina a capacidade de um veículo de transpor um obstáculo, levando em consideração tanto a inclinação quanto a resistência ao rolamento. A soma destes dois valores é definida como a resistência total e é dado em porcentagem do peso do veículo.

A *resistência de inclinação* é definida como o esforço de tração requerido para superar a gravidade e impulsionar o veículo em uma rampa. Isto adiciona 10g/kg ou 1% do peso do veículo para cada porcentagem de inclinação. Por exemplo, uma inclinação de 5% irá oferecer uma resistência de 50g para cada quilograma do peso do veículo.

Resistência ao Rolamento é a quantidade de esforço de tração requerido para superar o efeito retardador entre os pneus e o piso. Isto inclui a resistência causada pela penetração do pneu no chão, pela flexão dos pneus por causa da carga e (até certo ponto) pela fricção interna da roda. (Fig. 4). É normalmente expressa como uma porcentagem do peso do veículo. Por exemplo, um valor comum usado para uma estrada de terra bem cuidada, lisa, dura, e seca é

20g/kg, ou 2%. Deve-se lembrar que, além das duas resistências citadas, o equipamento enfrenta mais duas resistências, que não são levadas em consideração no cálculo da velocidade máxima: a resistência do ar e a resistência de inércia.



Figura 4: Resistência de Rolamento
Fonte: SME Mining Engineering Handbook (p. 769)

O esforço trator é um termo, discutido por Peurifoy apud Hartman (1992), usado para designar a força de tração entre os pneus das rodas e a superfície na qual eles trafegam. Se o coeficiente de tração é alto o suficiente para eliminar o escorregamento dos pneus, o esforço trator máximo é uma função da força do motor e da relação de marcha entre o motor e as rodas. Se as rodas deslizam na superfície de transporte, o esforço trator máximo efetivo será igual à pressão total entre os pneus e a superfície multiplicado pelo coeficiente de tração. Este esforço é expresso em quilogramas.

Se o esforço trator de um veículo não é conhecido, ele pode ser determinado pela fórmula: (SME Mining Engineering Handbook, p. 770)

$$\text{Esforço Trator (kg)} = \frac{383 \times \text{Força (kW)} \times \text{Eficiência}}{\text{Velocidade (km/h)}} \quad \text{Eq. (23)}$$

No entanto, o uso somente deste esforço não será capaz de medir o desempenho do veículo. Para medi-lo, devem-se possuir o desempenho do motor, relações de embreagem, informações sobre os pneus, pesos, etc. Esta informação normalmente não é disponível então, para determinar a velocidade que um veículo irá superar uma inclinação em particular possuindo uma determinada resistência ao

A maioria dos equipamentos de transporte de hoje possuem um sistema de freios auxiliar geralmente referido como “retardador”. Este sistema foi desenvolvido para servir como um freio funcionando durante estradas com inclinação negativas. O uso deste retardador salva o uso do freio regular para paradas normais ou emergenciais e reduz os custos de manutenção dos freios. A Figura 6 mostra uma tabela representativa deste retardador em um caminhão 793C da Caterpillar. O método de obtenção da velocidade máxima alcançada é similar à tabela de desempenho do caminhão.

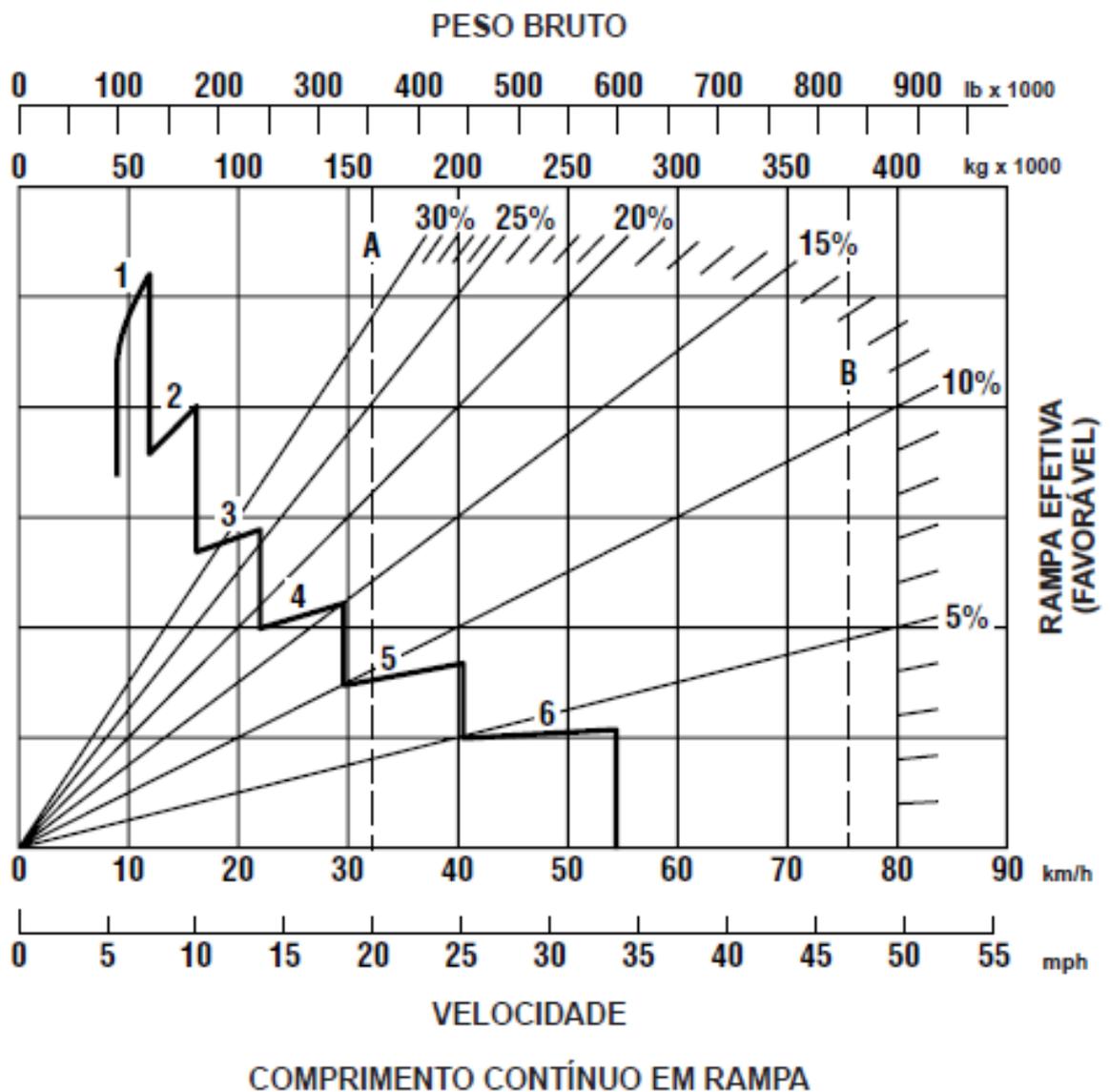


Figura 6: Tabela de desempenho do Retardador do Caminhão 793C.
Fonte: Caterpillar

Escolhendo-se a marcha de transmissão ou o intervalo na tabela de desempenho, é necessário modificar as velocidades indicadas através do uso de um fator de velocidade para refletir uma velocidade média ao invés de uma velocidade máxima. A tabela 8 (de Redução da velocidade máxima à velocidade média) mostra os fatores requeridos para estabelecer estas velocidades médias de viagem ao longo de diversas distâncias de viagem.

Tabela 8: Fatores de Redução da velocidade máxima à velocidade média.

R < 136 kg/HP. Comprimento do Trecho (m)	Trecho horizontal – Velocidade Inicial = 0	Unidade em movimento quando entra no trecho		
		Em nível	Declive	Active
0 - 60	0 - 0,40	0,65	0,67	1,00
60 - 120	0,40 – 0,51	0,65 – 0,70	0,67 – 0,72	Velocidade inicial maior do que a velocidade calculada para o trecho
120 - 180	0,51 – 0,56	0,70 – 0,75	0,72 – 0,77	
180 - 300	0,56 – 0,67	0,75 – 0,81	0,77 – 0,83	
300 - 450	0,67 – 0,75	0,81 – 0,88	0,83 – 0,90	
450 - 600	0,75 – 0,80	0,88 – 0,91	0,90 – 0,93	
600 - 750	0,80 – 0,84	0,91 – 0,93	0,93 – 0,95	
750 – 1050	0,84 – 0,87	0,93 – 0,95	0,95 – 0,97	
> 1050	0,87 – 0,94	0,95	0,97	
136 kg/HP < R < 172 kg/HP Comprimento do trecho (m)	Trecho Horizontal – Velocidade Inicial = 0	Unidade em Movimento quando entra no trecho		
		Em nível	Declive	Active
0 - 60	0 – 0,39	0 < 0,62	0,64	1,00
60 - 120	0,39 – 0,48	0,62 – 0,67	0,64 – 0,68	Velocidade inicial maior do que a velocidade calculada para o trecho
120 - 180	0,48 – 0,54	0,67 – 0,70	0,68 – 0,74	
180 - 300	0,54 – 0,61	0,70 – 0,75	0,74 – 0,83	
300 - 450	0,61 – 0,68	0,75 – 0,79	0,83 – 0,88	
450 - 600	0,68 – 0,74	0,79 – 0,84	0,88 – 0,91	
600 - 750	0,74 – 0,78	0,84 – 0,87	0,91 – 0,93	
750 – 1050	0,78 – 0,84	0,87 – 0,90	0,93 – 0,95	
> 1050	0,84 – 0,92	0,90 – 0,93	0,95 – 0,97	

Fonte: Manual Prático de Escavação (2007, p. 194)

Onde “R” é a relação Peso/Potência do equipamento.

Para se determinar a velocidade média de viagem, multiplica-se a velocidade máxima obtida como indicado na tabela de desempenho pelo fator mostrado, a não ser que segurança ou outro tipo de consideração imponha limites mais baixos. Em

casos onde a tabela de desempenho não estiver disponível, deve-se usar a equação:

$$V_{máx} = \frac{270 \times N_0 \times \eta_m}{K \times P - 10 \times P \times i} \quad \text{Eq. (24)}$$

Onde “ N_0 ” é a potência do volante (Hp), η_m é o rendimento mecânico da transmissão, “ K ” o coeficiente de rolamento (kg/t), “ P ” o peso do equipamento (carregado ou vazio) e “ i ” a resistência de rampa. O denominador representa o esforço trator nas rodas motrizes do equipamento, enquanto o numerador representa a potência disponível nas rodas motrizes.

Conhecendo-se a velocidade média de viagem, o tempo de viagem pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$\text{Tempo de Viagem} = \frac{\text{Distância em metros}}{\text{Velocidade em km/h} \times 16,7} \quad \text{Eq. (25)}$$

4- Tempo de Retorno: O tempo de retorno da unidade de transporte geralmente é governado pelas condições de trabalho e precauções de segurança, ao invés do desempenho do equipamento, uma vez que o equipamento estará vazio e, portanto poderá desenvolver uma velocidade bem superior àquela quando está carregado.

2.3.3. Unidades descontínuas com caminhos fixos:

A capacidade produtiva tem a mesma forma de cálculo das unidades transportadoras com caminhos não-fixos, como por exemplo:

$$\text{Produtividade} = \frac{(\text{Capacidade Nominal}) \times (\text{fatores de eficiência})}{(\text{tempo de ciclo})} \quad (26)$$

A determinação do tempo de ciclo envolve cálculos bem específicos que são únicos para cada tipo de transportador. O transporte por meio de trens foi estudado

por Bise apud Hartman (1992). Para movimentar uma composição, a locomotiva deve ser capaz de superar as seguintes resistências, tanto a sua quanto a dos vagões:

1. Resistência de Rolamento;
2. Resistência das Curvas;
3. Resistência de Inclinação;
4. Aceleração ou Desaceleração.

A resistência ao rolamento da composição inteira é igual ao peso da locomotiva e dos vagões (inclusive a carga, se houver) multiplicado por um coeficiente de fricção.

A resistência das curvas é uma função do raio de curvatura, base de rotação e diâmetro, velocidade, e peso. Geralmente se é ignorada porque, em um sistema propriamente instalado, isto conta por menos de 0,5 g/kg por grau de curva para aquela parte do trem na curva.

Em uma inclinação de 1%, uma tonelada deve ser elevada em 1 metro para cada 100 metros que o trem avança, fazendo com que a resistência de inclinação de 10 g/kg para cada 1% de inclinação.

O esforço de tração também é requerido para acelerar ou desacelerar. Em cálculos de transporte ferroviário em minas, é considerado que é necessário 50g para acelerar cada tonelada do peso do trem para se obter uma aceleração de 1,6 km/h/s. Normalmente, as locomotivas de minas aceleram entre 0,16 e 0,32 km/h; portanto, a resistência de aceleração é geralmente entre 5 e 10 g/kg. Naturalmente, quando a composição está desacelerando, pode-se analisar de uma maneira similar.

2.4. CAPACIDADE PRODUTIVA EM UNIDADES DESCONTÍNUAS HÍBRIDAS

Unidades híbridas de carregamento e transporte descontínuas podem ser divididas em equipamentos móveis e equipamentos de base fixa. Equipamentos móveis incluem o trator de pneu scraper (Foto 8). Um exemplo de equipamentos de base fixa são as Dragline (Foto 9) que escavam o material e os colocam em uma destinação final sem mover a base da máquina.



Foto 9: Trator Scraper. Fonte: Deere



Foto 10: Dragline. Fonte: Marion

2.4.1. Equipamentos móveis

A produtividade horária da classe de equipamentos móveis foi desenvolvido pela *Catterpillar Inc.* (Anon., 1975) e pode ser estimada usando a seguinte relação:

$$\text{Produção/hr} = \frac{\text{Carregamentos}}{\text{Ciclo}} \times \frac{\text{Ciclos}}{\text{Hora}} \times (\text{Fatores de Eficiência}) \times (\text{Fatores de Correção})$$

(26)

Apesar de que a máquina irá mudar de uma situação para outra, os seguintes passos, segundo HARTMAN (1992, p. 776), serão os mesmos para a estimativa da produção:

1. *Capacidade do Equipamento:* O primeiro passo é determinar a capacidade da máquina. É expresso pela carga movimentada em cada ciclo. A quantidade de material movimentado depende do tamanho da caçamba da máquina. Para este passo, a capacidade nominal do equipamento, obtida no manual de especificações, já é suficiente.
2. *Tempo de Ciclo:* Em seguida, deve-se calcular o tempo de ciclo do equipamento. Todos os tempos de ciclo possuem quatro partes: Carregamento, Transporte, Basculamento e Retorno. Calculando-se o tempo de ciclo, o número de ciclos por hora pode ser determinado.
 - a. *Carregamento:* Para tratores de pneu *scrapers*, normalmente varia entre 0,6 e 1,0 min., dependendo da capacidade da caçamba, condições do trabalho, etc.
 - b. *Basculamento:* Manobra e basculamento variam de 0.6 a 0.8 min.
 - c. *Transporte:* Irá depender do peso carregado, força disponível, esforço de tração, resistência efetiva, condições da pista, e distância movida.

A Figura 7 (Gráfico Distância X Tempo para Tratores Scraper) é um gráfico usado para encontrar o tempo de viagem de ida (carregado) de um trator de pneu *scraper* de um determinado tamanho, que varia de acordo com a resistência efetiva enfrentada pelo equipamento (Resistência efetiva = Resistência ao rolamento + Resistência de Inclinação).

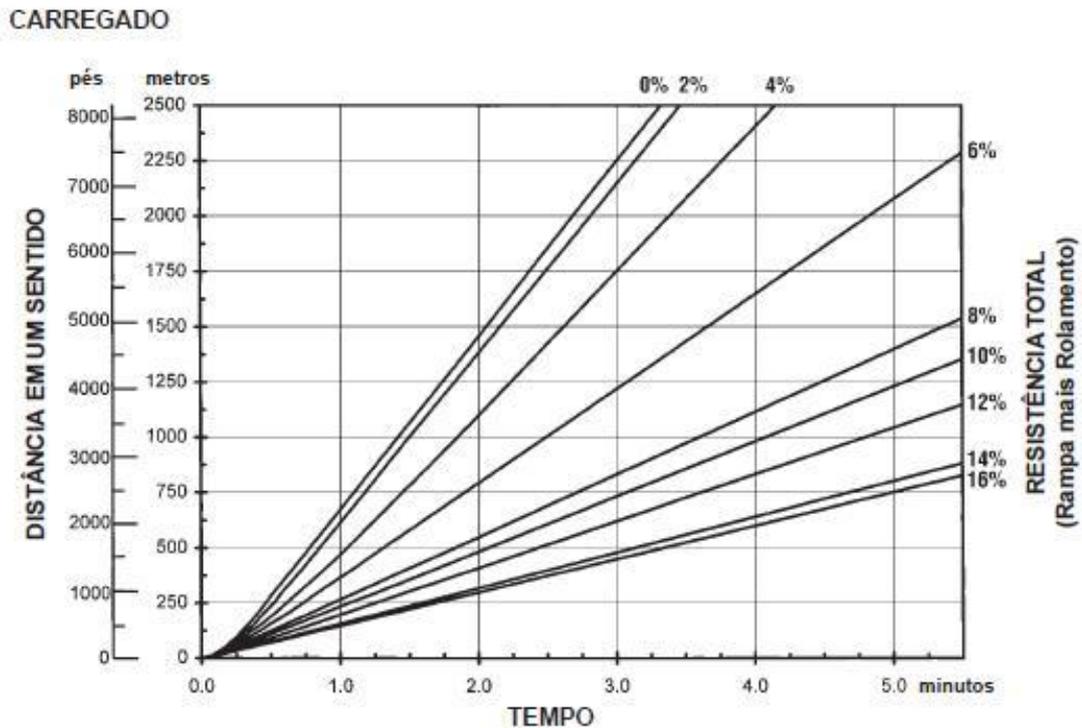


Figura 7: Gráfico Distância X Tempo para tratores Scraper.
Fonte: SME Mining Engineering Handbook (p. 777).

d. Retorno: Quando o equipamento retorna, duas coisas serão diferentes do transporte. O peso, e a resistência de inclinação.

Um ponto que se deve ser observado é que, quando operando em declives acentuados, pode ser necessário que o equipamento limite sua velocidade de operação para que a capacidade de frenagem e retardo da máquina não sejam ultrapassadas. Isto irá afetar o tempo de viagem. A velocidade máxima segura pode ser obtida por meio do uso de curvas de desempenho como a da Figura 8 (Gráfico de Velocidade Máxima em Aclives).

3. *Fatores de Eficiência*: O último passo é considerar a eficiência de trabalho e quaisquer fatores de correção. Estes fatores podem ser baseados na habilidade do operador, métodos de produção, clima, tráfego, etc.

Para se encontrar a produtividade horária final, o valor estimado deve ser multiplicado por qualquer fator de correção relacionado ao trabalho.

2.4.2. Equipamentos de base fixa

A lança *dragline* ou draga de arrasto é constituída por uma estrutura leve, em treliça metálica, em cuja extremidade há uma roldana pela qual passa o cabo de elevação da caçamba, acionado pelo cabrestante. De modo geral, este equipamento, que é destinado à escavar em níveis abaixo do terreno em que a máquina se apóia, é aplicado no corte de materiais pouco compactos ou moles, mesmo que possuam altos teores de umidade.

As mesmas considerações feitas quanto às escavadeiras com “shovel” podem ser reiteradas para o caso da lança *dragline*, no que concerne à altura ótima de corte (Tabela 9), fator de carga da caçamba (Tabela 10) e o ângulo de giro (Tabela 11). Em seguida, são apresentadas as tabelas com os valores indicados pela PC & AS para o caso da caçamba Dragline.

Tabela 9: Tempo de Ciclo em Função da Capacidade da Caçamba e do Ângulo de Giro em Escavadeiras Dragline

Escavação com "Dragline"												
Capacidade da Caçamba	Tempo de Ciclo de Carga em Segundos – Sem Esperas											
	Escavação Fácil Ângulo de Giro				Escavação Média Ângulo de Giro				Escavação Difícil Ângulo de Giro			
Yd ³	45°	90°	135°	180°	45°	90°	135°	180°	45°	90°	135°	180°
½	16	19	22	25	20	24	28	31	-	-	-	-
¾	17	20	24	27	21	26	30	33	25	30	35	39
1	19	22	26	29	23	28	32	35	27	32	37	41
1 ¼	19	23	27	30	23	28	33	36	27	32	38	42
1 ½	21	25	29	32	25	30	35	38	29	34	40	44
1 ¾	22	26	30	33	26	31	36	39	30	35	41	45
2	23	27	31	35	27	32	37	41	31	37	42	47

Fonte: Manual de Escavação, 2007 (p. 182).

Tabela 10: Altura Ótima do Corte em Função da Capacidade da Caçamba e a dificuldade da Escavação em Escavadeiras Dragline

Altura Ótima de corte para Escavadeiras com "Dragline" (m)			
Capacidade da Caçamba (yd ³)	Escavação Fácil	Escavação Média	Escavação Difícil
½	1,65	2,01	2,40
¾	1,80	2,22	2,61
1	1,89	2,40	2,79
1 ¼	2,10	2,55	3,00
1 ½	2,22	2,70	3,21
1 ¾	2,31	2,85	3,39
2	2,40	2,97	3,54

Fonte: Manual de Escavação, 2007 (p. 183).

Tabela 11: Fator de Correção para Ângulo de Giro e Altura de Corte em Escavadeiras Dragline

Fator de Correção para Ângulo de Giro e Altura de Corte (Escavadeiras com Dragline)							
Altura de corte em % da altura ótima de corte	Ângulo de Giro (α)						
	45°	60°	75°	90°	120°	150°	180°
40	1,08	1,02	0,97	0,93	0,85	0,78	0,72
60	1,13	1,06	1,01	0,97	0,88	0,80	0,74
80	1,17	1,09	1,04	0,99	0,90	0,82	0,76
100	1,18	1,11	1,05	1,00	0,91	0,93	0,77
120	1,17	1,09	1,03	0,98	0,90	0,82	0,76
140	1,14	1,06	1,00	0,96	0,88	0,81	0,75
160	1,10	1,02	0,97	0,93	0,85	0,79	0,73

Fonte: Manual de Escavação, 2007 (p. 183).

3. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DAS FROTAS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE

Neste trabalho a metodologia empregada dividiu-se em 3 partes:

1. Revisão bibliográfica sobre dimensionamento de equipamentos;
2. Breve descrição da operação da mina do Sossego (Vale S/A);
3. Descrição do estudo da análise de dados utilizando o software Microsoft Excel;
4. Análise da eficiência da frota de carregamento;
5. Análise da eficiência de trajetos de transporte.

3.1. BREVE DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO DA MINA DO SOSSEGO (VALE S/A)

Para a apresentação da metodologia foram usados dados obtidos na Mina de cobre do Sossego (Vale), que fica no Município Canaã dos Carajás, no Estado do Pará. A Mina tem uma movimentação total mensal de 7,5 milhões de toneladas, das quais 1.400.000 são do minério de cobre (calcopirita a 1%) e o restante de material estéril (a encaixante é essencialmente rocha granítica), possuindo assim uma Relação Estéril/Minério (REM) de 4,35.

A frota de carregamento e transporte da Mina é constituída por:

- 4 Escavadeiras;
- 4 Pás-Carregadeiras;
- 34 Caminhões Fora-de-Estrada;

A frota de Escavadeiras é composta por: 2 Bucyrus 495 com caçamba de 109 t, 1 P&H 4100 com caçamba de 104 t e 1 P&H 2300 com caçamba de 45 t . No caso das frotas de pás-carregadeiras, são 4 pás CAT 994, que possuem caçambas de 35 t. Já os caminhões são subdivididos em 2 frotas: A primeira constituída por caminhões CAT 793C (240 t) (23 caminhões) e a segunda frota constituída por caminhões CAT 785C (150 t) (11 caminhões). Esta nomenclatura é usada nas próximas citações destes equipamentos.

As escavadeiras ficam localizadas nas regiões de estéril, carregando os caminhões de 240 t, enquanto as pás-carregadeiras ficam em frentes de minério, alimentando os caminhões de 150 t. Quando não estão produzindo (por exemplo, quebra do britador), as pás realizam trabalhos de desenvolvimento de mina e também de remanejo.

3.2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO E DA ANÁLISE DE DADOS UTILIZANDO O SOFTWARE MICROSOFT EXCEL

Para o efeito ilustrativo desta metodologia, a análise foi feita em cima da frota de carregamento e transporte da Mina do Sossego. A metodologia teve por objetivo analisar a eficiência em duas áreas de operação desta mina. A primeira foi sobre os equipamentos de carregamento e a segunda será sobre os alguns percursos de origem e destino dos materiais da mina. Para as análises da eficiência de frota de carregamento e de trajetos de transporte de minas utilizaram-se as ferramentas de análise de dados do *software Microsoft Excel*.

Para tanto, foram utilizados dados do Sistema de Despacho da Mina do mês de Janeiro de 2009, que contém dados referentes aos volumes movimentados pela frota de transporte no período citado. A planilha pode fornecer informações referentes à:

- Data e hora da movimentação;
- Equipamento utilizado;
- Escavadeira/Pá carregadeira que realizou carregamento;
- Frota à qual pertence o caminhão;
- Cava onde foi retirado o material;
- Frente de lavra do material;
- Origem e destino do material;
- Material transportado (Minério ou Estéril);
- Tempo de Ciclo (Carregamento, Basculamento, Fila, Manobra, Tempo Carregado, Tempo Vazio);
- Distância de Transporte (Distância Carregado e Distância Vazio);
- Quantidade de Material (em peso) Movimentado.

Com base nestes dados, muitas informações podem ser retiradas para desenvolvimento da metodologia. No entanto, uma observação que deve ser feita é que os dados foram utilizados somente para natureza ilustrativa do método sugerido para a análise da eficiência dos equipamentos.

Inicialmente, devem-se filtrar os dados de interesse da planilha do despacho para realizar o estudo estatístico destes dados, utilizando a ferramenta de Auto-Filtro do Excel. Em seguida são feitos histogramas dos dados para ser analisado qual o tipo de distribuição que eles apresentam (Normal, Assimétrica, Bimodal, etc.). Os histogramas gerados foram:

- Histograma de tempo de ciclo;
- Histograma das tonelagens.

Para a realização destes histogramas e das tabelas de dados estatísticos é utilizada a ferramenta de análise de dados do *software Microsoft Excel*.

O histograma de tempo de ciclo visa estudar a uniformidade da distribuição destes tempos. Isto é muito importante do ponto de vista operacional, pois, uma variação muito grande nos tempos de ciclo acarreta um problema para o planejamento de lavra mensal, uma vez que para a obtenção dos tempos de ciclo de um mês, são usados dados do mês anterior e, com uma distribuição dos tempos de ciclo pouco uniforme, a média aritmética (ponderada ou não) passa a ter uma representatividade cada vez menor dos dados.

Já o histograma das tonelagens tem por objetivo verificar a uniformidade dos carregamentos. Isto é importante, pois, caso muitos dos carregamentos estejam abaixo da quantidade de material ideal para o caminhão, haverá uma perda significativa da produtividade além de aumentar o custo da tonelada transportada. No caso de carregamentos acima do peso bruto total suportado pelo caminhão, este pode sofrer danos mecânicos graves. Quando se ultrapassa o peso estipulado, podem surgir trincas e/ou haver uma deformação plástica de algumas partes do equipamento (chassi, eixos, mancais, etc.), o que ocasiona numa diminuição no peso bruto total admissível, uma vez que a resistência mecânica do equipamento

será reduzida. Com isso, a vida útil do equipamento será menor e os custos com manutenção significativamente maiores.

Em seguida, foram calculados alguns coeficientes estatísticos que ajudaram a interpretar os dados. Os coeficientes usados foram:

- Média aritmética (ponderada pelas freqüências dos dados);
- Moda;
- Mediana;
- Variância e o Desvio Padrão;
- Coeficiente de variação;
- Assimetria da distribuição produtividade;
- Curtose;

Após este passo, cada área possui um estudo em separado, que compara os dados operacionais obtidos com dados teóricos calculados por meio das equações encontradas na parte de revisão bibliográfica deste trabalho.

3.3. EFICIÊNCIA DA FROTA DE CARREGAMENTO

Para o estudo da eficiência da frota de carregamento foi feito o histograma e o cálculo dos coeficientes estatísticos para realizar a análise desta frota, além de um dimensionamento teórico para comparação com os dados encontrados. Para a demonstração da metodologia, foram utilizados os dados de três equipamentos: Escavadeiras P&H 4100, P&H 2300 e Pá Carregadeira CAT 994.

O cálculo teórico dos equipamentos utiliza como dados de entrada as características físicas do material (Fator de Empolamento, Fator de Enchimento, Densidade no Corte e Densidade Solta), estes fatores são importantes para determinar com precisão a quantidade de material que será movimentado em cada ciclo dos equipamentos.

O primeiro passo é determinar o quanto de material será movimentado em cada ciclo dos equipamentos de carregamento. Isto é obtido multiplicando-se a capacidade da caçamba, em m³, pela densidade solta do material e pelo fator de enchimento da caçamba. Em seguida deve ser verificado se o valor obtido, expresso

em toneladas, ultrapassa a capacidade nominal do equipamento. Caso ultrapasse, é recomendado utilizar uma caçamba de menor porte para se adequar às capacidades do equipamento.

O segundo passo é verificar quantos ciclos o equipamento de carregamento deverá realizar para alimentar o equipamento de transporte. O ideal é que os valores fiquem o mais próximo possível de números inteiros, para que não haja um excedente ou uma falta excessiva de material em cada ciclo de carregamento. Isto é importante para calcular o tempo de ciclo total de carregamento.

Por último, para se calcular a produtividade horária do equipamento, basta realizar a divisão da quantidade de material movimentada em um ciclo completo de carregamento pelo tempo de ciclo total desta operação

1- P&H 4100 (ES 3001):

A maior escavadeira da Mina opera apenas em frentes de estéril, alimentando os caminhões CAT 793C de 240 toneladas, carregando 826.691 toneladas em 84,09 horas, resultando em uma produtividade média horária de 9.831 t. No entanto, para atingir esta produtividade, a carregadeira deve estar com o número ideal de caminhões alocados à sua disposição, possuindo desta forma, uma condição de sincronismo igual a 1 e Eficiência de 100%.

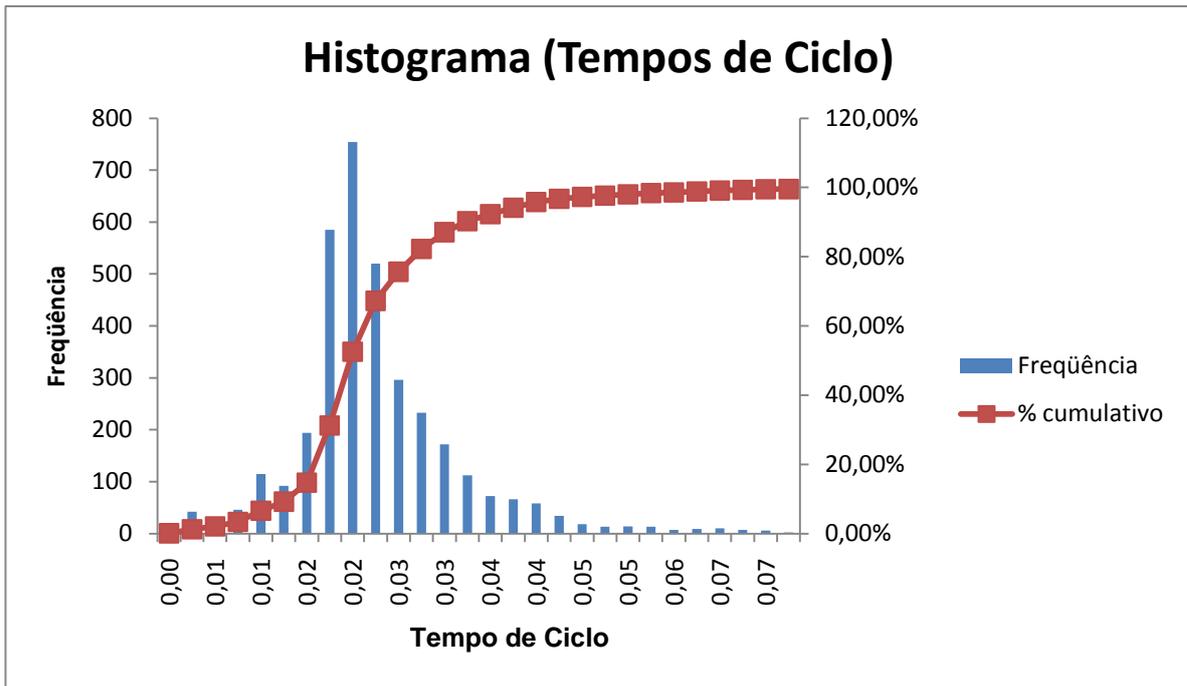


Figura 9: Histograma- Tempos de Ciclo P&H 4100

Tabela 12: Estatística Descritiva do Tempo de Ciclo da P&H 4100

Estatística (Tempos de Ciclo)			
Média	0,024	Curtose	14,46
Mediana	0,022	Assimetria	0,59
Moda	0,019	Mínimo	0,00
Desvio padrão	0,01	Máximo	0,16
Coeficiente de Variação	0,45	Soma	84,09
Variância da amostra	0,00	Contagem	3537

Pode-se observar na Figura 9 (Histograma- Tempos de Ciclo P&H 4100) que, apesar da escavadeira carregar apenas um tipo de caminhão, o tempo de ciclo possui uma heterogeneidade elevada. Isto se observa por meio do desvio padrão elevado, com coeficiente de variação igual a 0,45 indicando uma dispersão significativa dos dados. Esta dispersão pode ser relacionada a fatores que podem atrapalhar a operação de carregamento, tais como demoras na manobra, ângulo de giro variável, ineficiência do operador, entre outras.

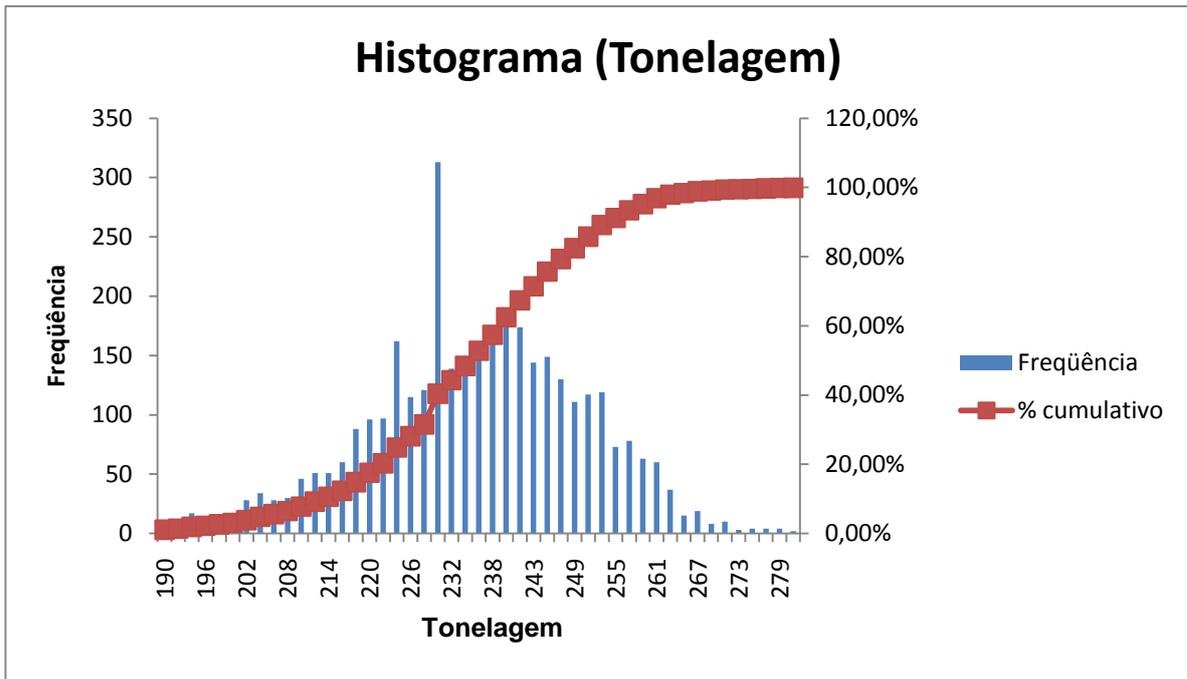


Figura 10: Histograma- Tonelagem P&H 4100

Tabela 13: Estatística Descritiva- Tonelagem P&H 4100

Estatística (Tonelagem)			
Média	234	Curtose	0,30
Mediana	234	Assimetria	0,35
Moda	228	Mínimo	180
Desvio padrão	17	Máximo	297
Variância da amostra	274	Soma	826.691
Coefficiente de Variação	0,07	Contagem	3537

A Figura 10 (Histograma da Tonelagem da P&H 4100) indica claramente que somente a frota 793C é carregada por este equipamento. Porém demonstra também que a operação não está sendo eficiente. Apesar da média de peso dos carregamentos estarem dentro do ideal para o caminhão CAT 793C, observam-se vários carregamentos fora do intervalo adequado (230-245 toneladas). Cerca de 40% dos carregamentos está abaixo de 230 toneladas (diminuindo assim a produtividade dos caminhões), e 17,5% estão acima de 250 toneladas, podendo trazer problemas à integridade mecânica da frota.

2- P&H 2100 (ES 3501)

A Escavadeira P&H 2100 é a menor escavadeira da Mina, com uma caçamba de 45 toneladas. Esta escavadeira fica locada somente às frentes de material estéril, porém além de carregar os caminhões de 240 toneladas, o qual foi projetado para uso na frente de estéril, se observa que a maior parte dos carregamentos (68,5%) foi feita para os caminhões de 150 toneladas. Este equipamento movimentou no período 514.205 toneladas em 203,82 horas, resultando em uma produtividade média horária de 2522 t, lembrando-se que para alcançar este valor de produtividade deve-se possuir uma condição de sincronismo com a frota de transporte que igual a 1 e Eficiência = 100%.

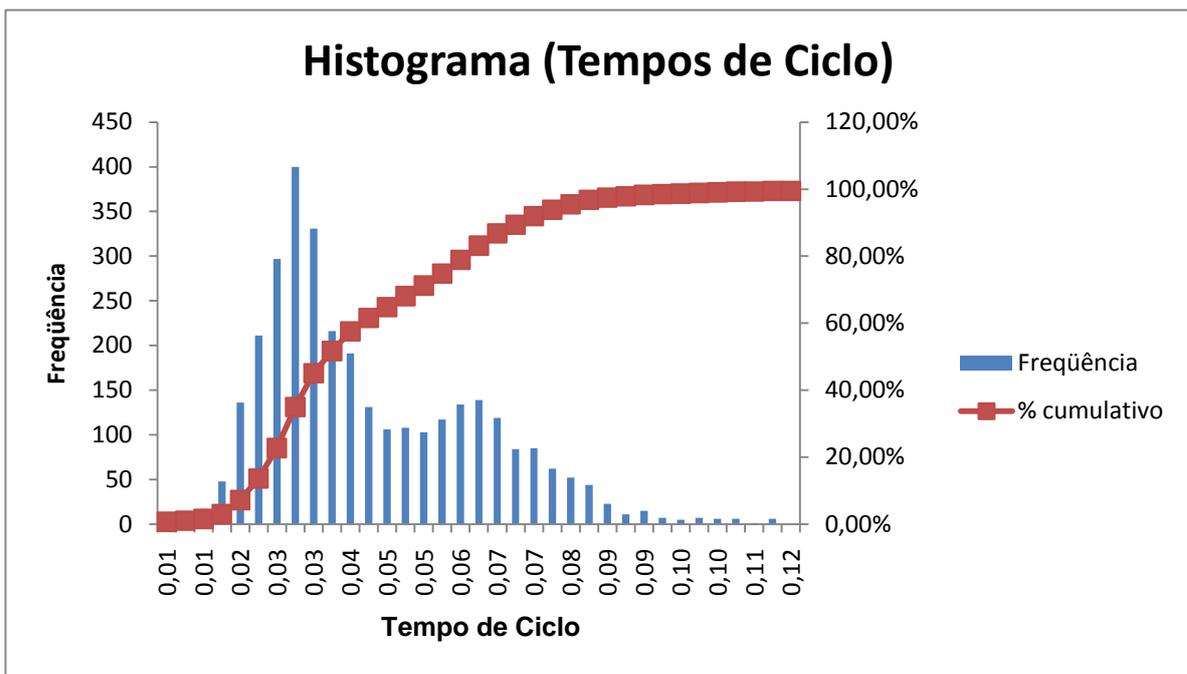


Figura 11: Histograma- Tempos de Ciclo P&H 2100

Tabela 14: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo P&H 2100

Estatística (Tempos de Ciclo)			
Média	0,042	Curtose	2,55
Mediana	0,035	Assimetria	0,93
Moda	0,027	Mínimo	0,00
Desvio padrão	0,02	Máximo	0,19
Coefficiente de Variação	0,49	Soma	136,26
Variância da amostra	0,00	Contagem	3270

Observa-se na Figura 11 (Histograma de Tempos de Ciclo da P&H 2100) a distribuição bimodal, caracterizando a existência das duas populações de dados (os tempos de ciclo da frota CAT 793C e da CAT 785C). Para os caminhões de 150 toneladas são necessários três passadas para carregá-lo, enquanto que para o caminhão de 240 toneladas são necessárias cinco passadas. Esta diferença é observada no histograma, tendo como consequência um aumento no tempo de ciclo de carregamento para os caminhões de maior porte.

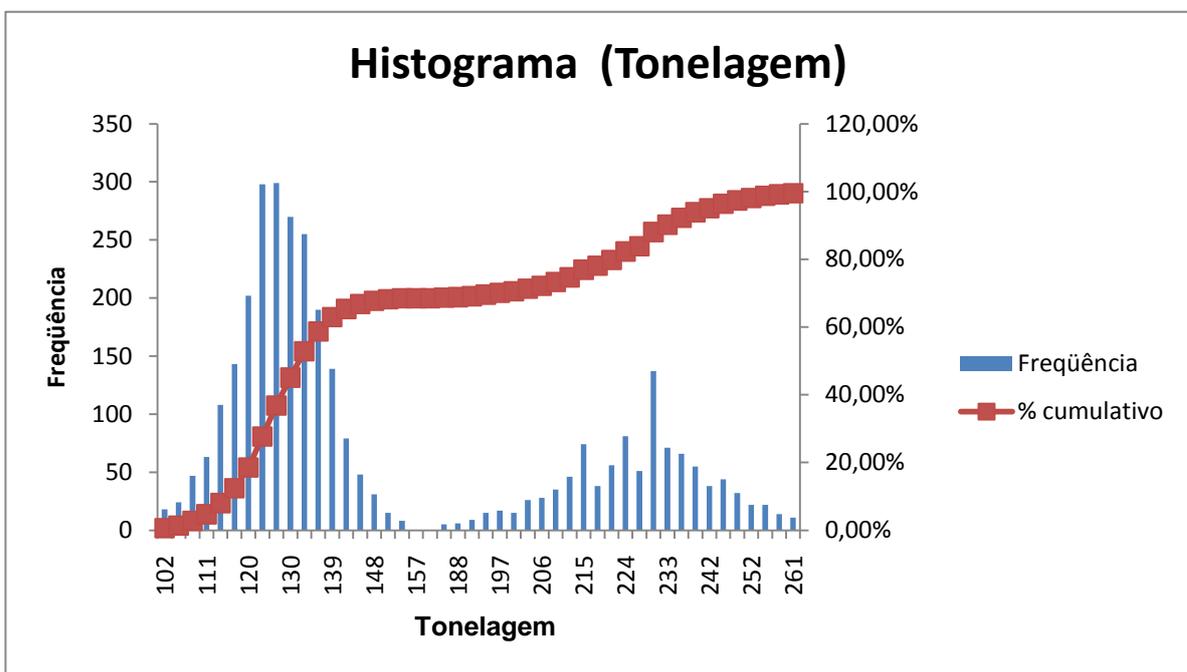


Figura 12: Histograma- Tonelagem P&H 2100

Tabela 15: Estatística Descritiva- Tonelagem P&H 2100

Estatística (Tonelagem)			
Média	157	Curtose	-1,04
Mediana	131	Assimetria	2
Moda	126	Mínimo	99
Desvio padrão	48	Máximo	273
Variância da amostra	2308	Soma	514.205
Coefficiente de Variação	0,31	Contagem	3270

Na Figura 12 (Histograma – Tonelagem P&H 2100) observa-se mais claramente o carregamento das duas frotas de caminhões. Do ponto de vista da eficiência, esta escavadeira também deixou de usar todo o potencial da frota de caminhão, fazendo com que 65% dos carregamentos da frota 785C estivessem

abaixo das 130 toneladas e 60% dos carregamentos da frota 793C estivesse abaixo de 230 toneladas. Para analisar a perda de produtividade da escavadeira quando se carrega cada uma das frotas de caminhão, os histogramas de tempos de ciclo e de tonelagem serão subdivididos nas Figuras 13, 14, 15 e 16 e nas Tabelas 16, 17, 18 e 19:

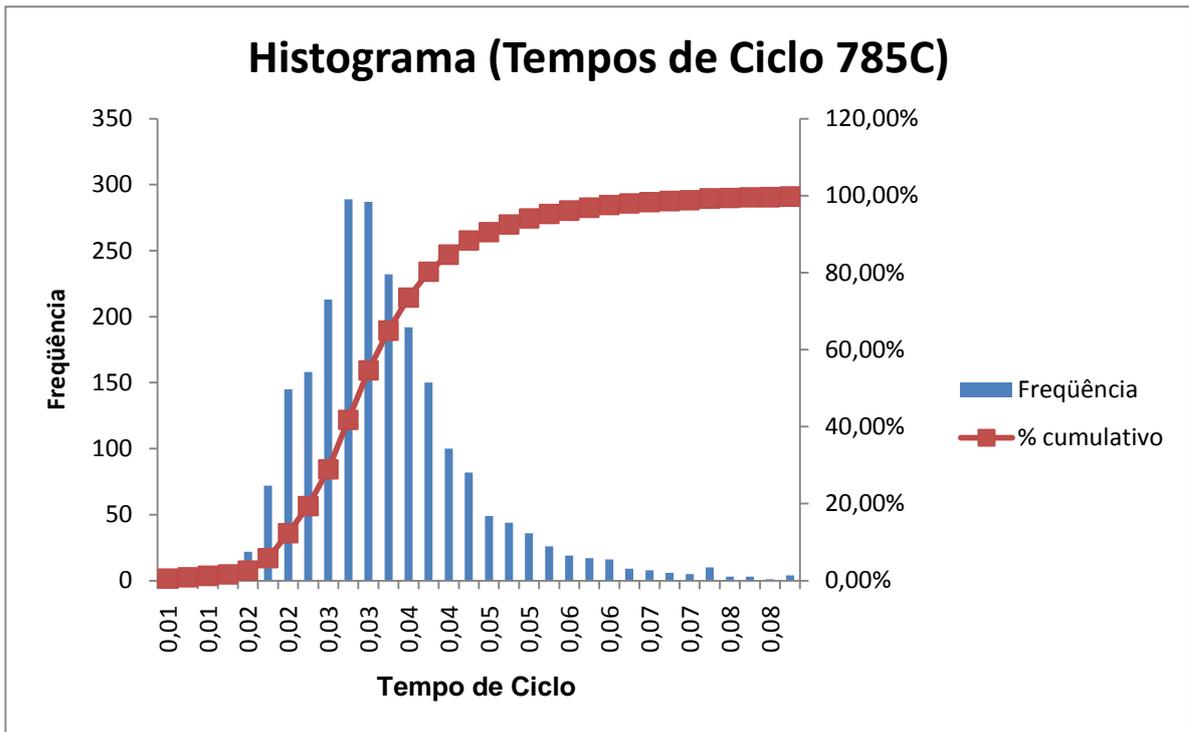


Figura 13: Histograma- Tempos de Ciclo CAT 785C

Tabela 16: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo CAT 785C

Estatística (Tempos de Ciclo 785C)			
Média	0,031	Curtose	5,20
Mediana	0,029	Assimetria	0,50
Moda	0,027	Mínimo	0,00
Desvio padrão	0,01	Máximo	0,12
Coeficiente de Variação	0,37	Soma	70,30
Variância da amostra	0,00	Contagem	2240

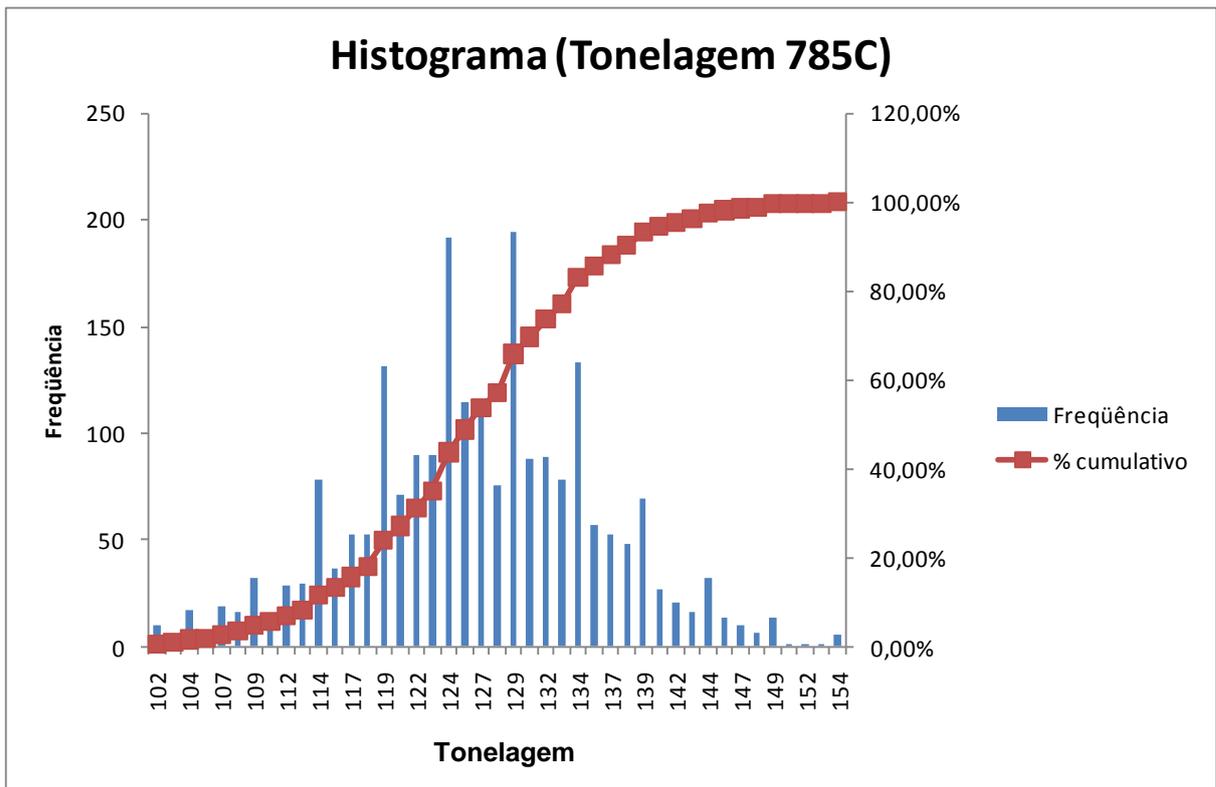


Figura 14: Histograma- Tonelagem 785C

Tabela 17: Estatística Descritiva- Tonelagem 785C

Estatística (Tonelagem 785C)			
Média	126	Curtose	0,06
Mediana	126	Assimetria	-0,09
Moda	126	Mínimo	99
Desvio padrão	9	Máximo	158
Coeficiente de Variação	0,07	Soma	281.617
Variância da amostra	87,53	Contagem	2240

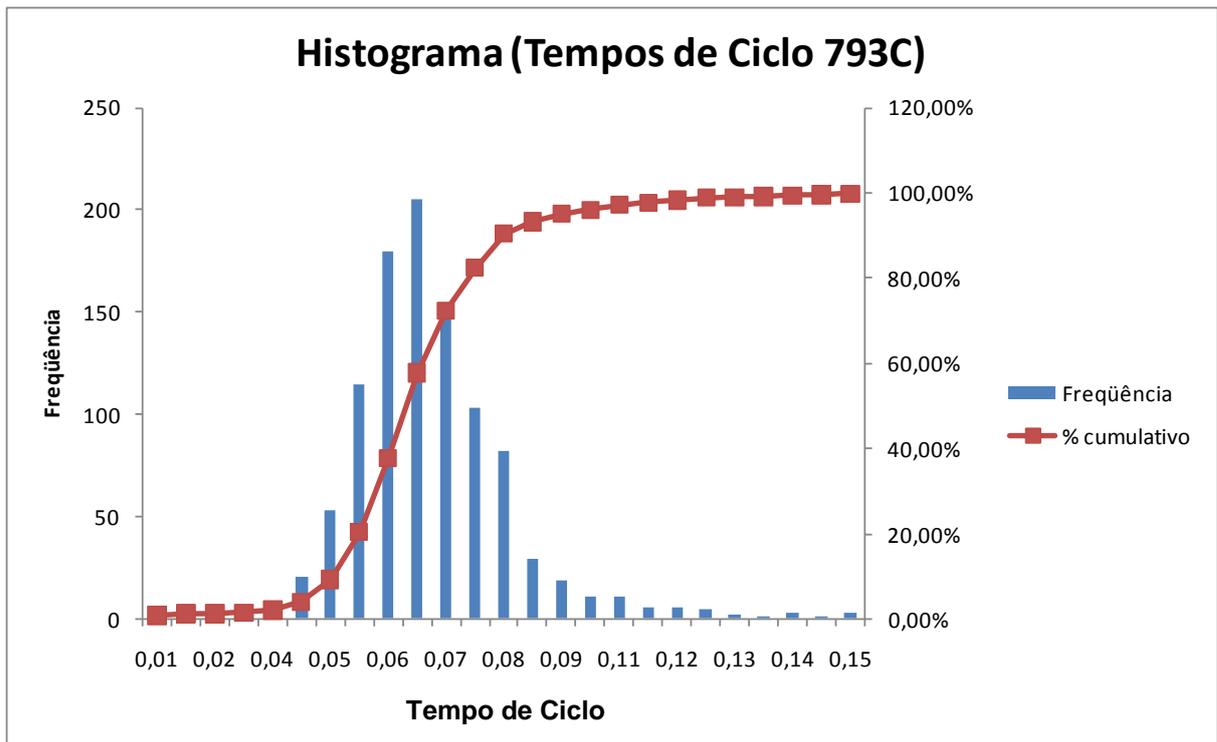


Figura 15: Histograma: Tempos de Ciclo 793C

Tabela 18: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo 793C

Estatística (Tempos de Ciclo 793C)			
Média	0,064	Curtose	6,67
Mediana	0,062	Assimetria	0,35
Moda	0,057	Mínimo	0,00
Desvio padrão	0,02	Máximo	0,19
Coeficiente de Variação	0,28	Soma	65,96
Variância da amostra	0,00	Contagem	1030

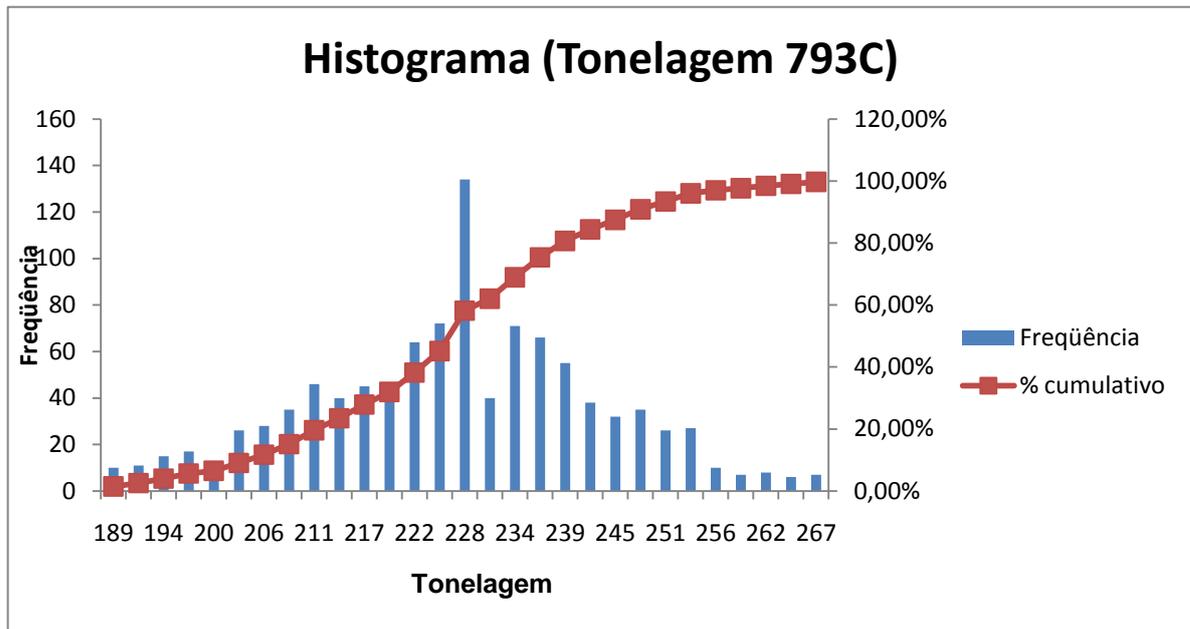


Figura 16: Histograma- Tonelagem 793C

Tabela 19: Estatística Descritiva: Tonelagem 793C

Estatística (Tonelagem 793C)			
Média	226	Curtose	-0,14
Mediana	228	Assimetria	-0,40
Moda	228	Mínimo	183
Desvio padrão	16	Máximo	273
Coeficiente de Variação	0,07	Soma	232.588
Variância da amostra	271,33	Contagem	1030

Por meio de cálculo de produtividade horária da Escavadeira usando as médias de tempo de ciclo e de tonelagem para as frotas de caminhão CAT 785C e CAT 793C, percebe-se uma perda de produtividade de 12,0% uma vez que a produtividade da escavadeira quando carrega os caminhões CAT 785C é de 4.005 t/h e quando carrega os caminhões CAT 793C é de 3.526 t/h.

3- Pá Carregadeira CAT 994 (PM 3702)

O último equipamento de carregamento a ser estudado é a pá carregadeira CAT 994 com caçamba de 14-36 m³ (32-35 toneladas). Projetado para carregar os caminhões 785C em frentes de minério, observa-se que 48,9% dos carregamentos

são em frentes de estéril e 79,9% dos carregamentos foram feitos na frota 785C. A pá movimentou 143.808 toneladas em 115 horas, resultando em uma produtividade média horária de 1250 t (com condição de sincronismo igual a 1 e Eficiência de 100%).

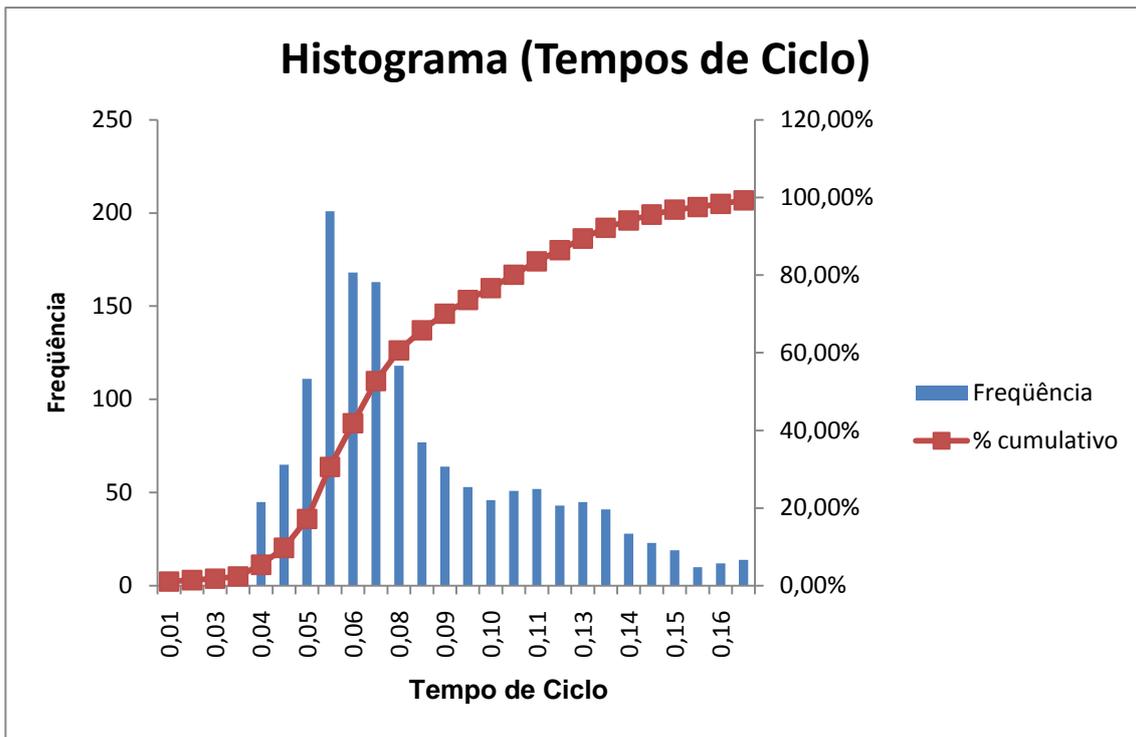


Figura 17: Histograma- Tempos de Ciclo CAT 994

Tabela 20: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo CAT 994

Estatística (Tempos de Ciclo)			
Média	0,08	Curtose	0,90
Mediana	0,07	Assimetria	0,88
Moda	0,06	Mínimo	0,00
Desvio padrão	0,03	Máximo	0,24
Variância	0,001	Soma	115
Coeficiente de Variação	0,44	Contagem	1496

Como a capacidade da caçamba da pá carregadeira é relativamente menor do que a caçamba das escavadeiras e, além disso, é necessário um tempo para realizar a manobra para carregar o caminhão, o tempo de ciclo total de carregamento da pá será maior do que o da escavadeira, como demonstrado na Figura 17 (Histograma – Tempos de Ciclo CAT 994). Uma observação que deve ser feita é que, como cada passada da pá é mais demorada do que uma passada da

escavadeira, o carregamento da pá é mais sensível à diferença de tamanho existente entre as caçambas das duas frotas de caminhão, fazendo com que o tempo de ciclo aumente de forma significativa quando se carrega a frota 793C.

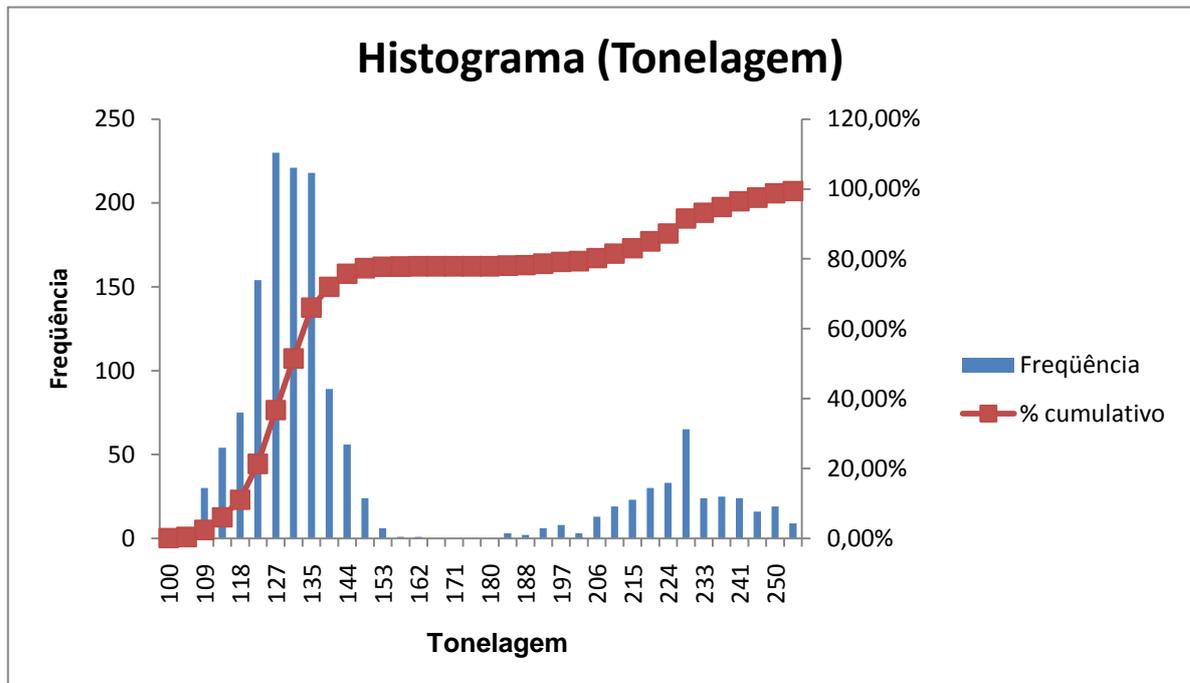


Figura 18: Histograma- Tonelagem CAT 994

Tabela 21: Estatística Descritiva- Tonelagem CAT 994

Estatística (Tonelagem)			
Média	149	Curtose	0,12
Mediana	130	Assimetria	1,33
Moda	130	Mínimo	100
Desvio padrão	42	Máximo	268
Variância da amostra	1798	Soma	222.607
Coeficiente de Variação	0,28	Contagem	1496

Por meio da Figura 18 (Histograma – Tonelagem CAT 994) pode-se observar o carregamento das duas frotas de caminhão. Assim como as escavadeiras, a pá não carregou com eficiência os caminhões, uma vez que 70,7% dos carregamentos da frota 785C ficaram abaixo das 130 toneladas e 63,4% dos carregamentos da frota 793C ficaram abaixo de 230 toneladas. Para observar melhor a perda de produtividade proveniente do uso da Pá Mecânica nos caminhões 793C, os histogramas de tempo de ciclo e de tonelagem serão subdivididos entre as frotas de

caminhão, de forma semelhante à realizada com a escavadeira P&H 2100, subdividindo os Histogramas de Tempo de Ciclo e Tonelagem nas Figuras 19, 20, 21 e 22 e as Tabelas de Estatística Descritiva nas Tabelas 22, 23, 24 e 25:

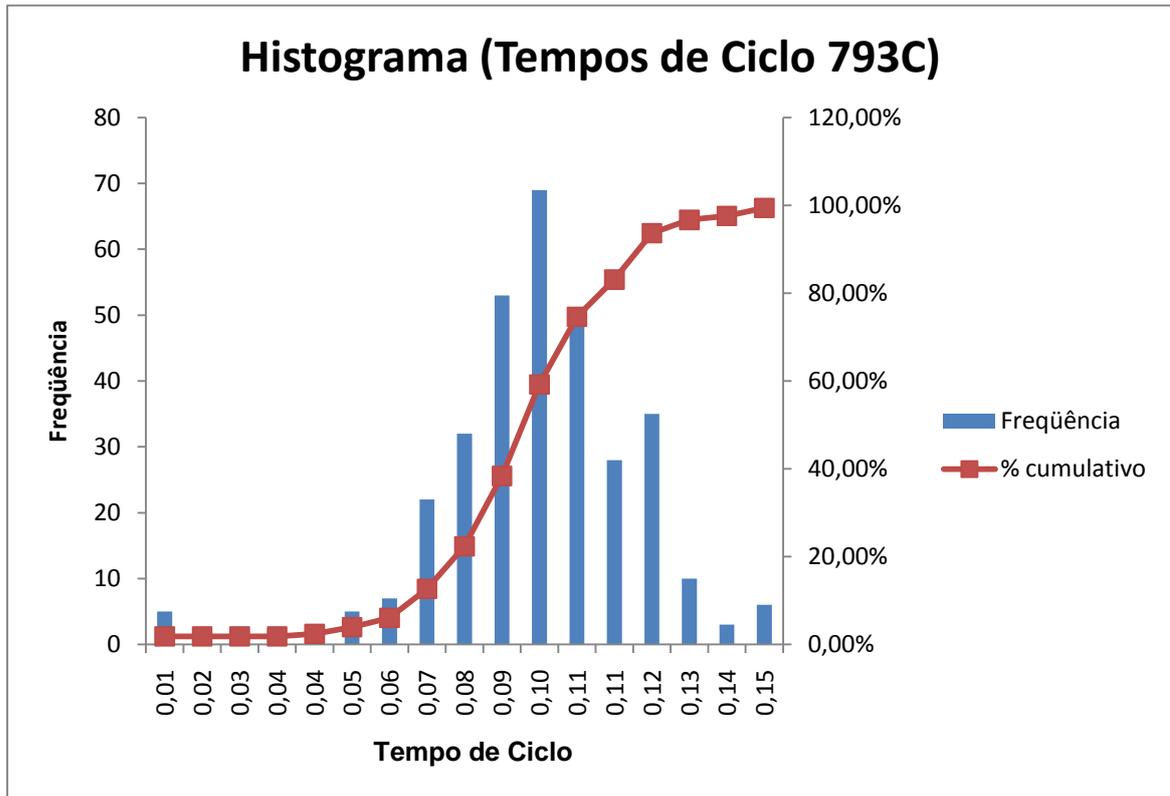


Figura 19: Histograma- Tempos de Ciclo 793C com CAT 994

Tabela 22: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo 793C com CAT 994

Estatística (Tempos de Ciclo 793C)			
Média	0,093	Curtose	2,98
Mediana	0,094	Assimetria	-0,14
Moda	0,096	Mínimo	0,00
Desvio padrão	0,02	Máximo	0,16
Coeficiente de Variação	0,25	Soma	30,89
Variância da amostra	0,00	Contagem	331

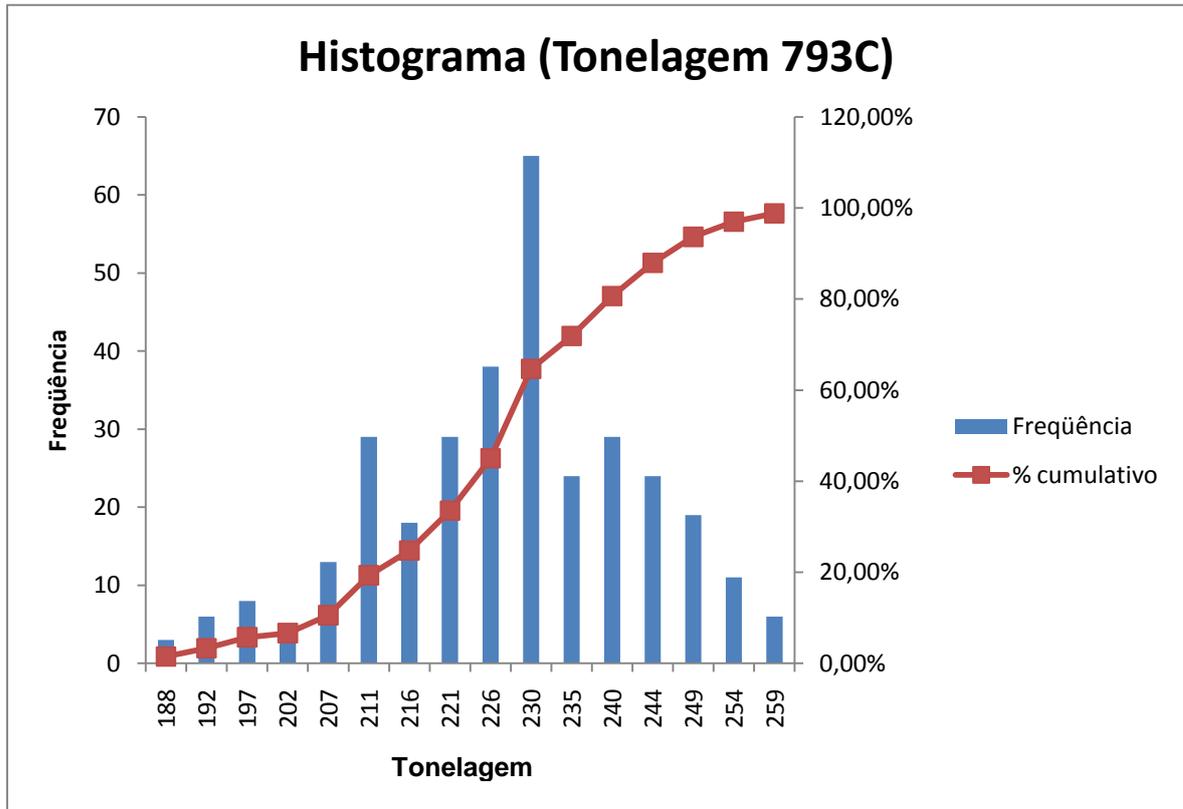


Figura 20: Histograma- Tonelagem 793C com CAT 994

Tabela 23: Estatística Descritiva- Tonelagem 793C com CAT 994

Estatística (Tonelagem 793C)			
Média	226	Curtose	0,03
Mediana	228	Assimetria	-0,44
Moda	228	Mínimo	183
Desvio padrão	16	Máximo	268
Coeficiente de Variação	0,07	Soma	74.701
Variância da amostra	252,35	Contagem	331

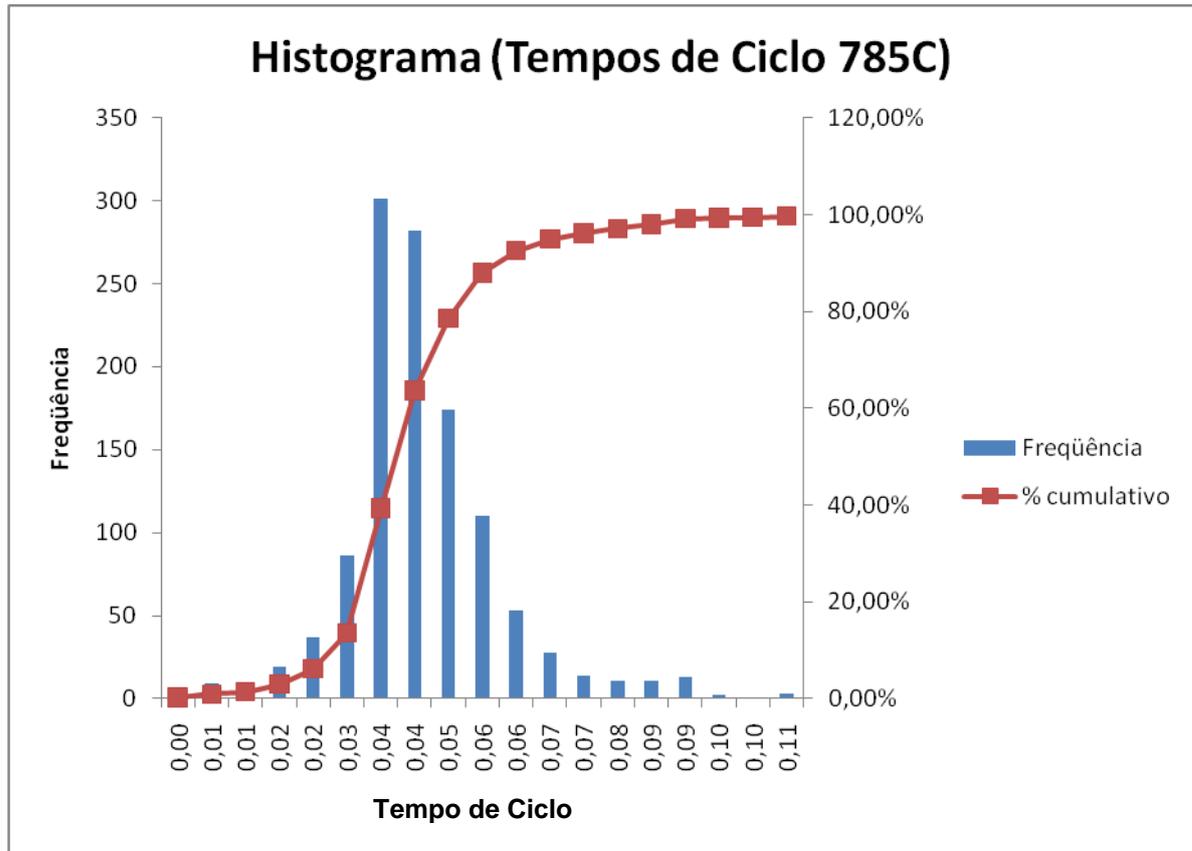


Figura 21: Histograma- Tempos de Ciclo 785C com CAT 994

Tabela 24: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo 785C com CAT 994

Estatística (Tempos de Ciclo 785C)			
Média	0,042	Curtose	15,71
Mediana	0,039	Assimetria	2,24
Moda	0,036	Mínimo	0,00
Desvio padrão	0,02	Máximo	0,21
Coeficiente de Variação	0,36	Soma	48,68
Variância da amostra	0,00	Contagem	1165

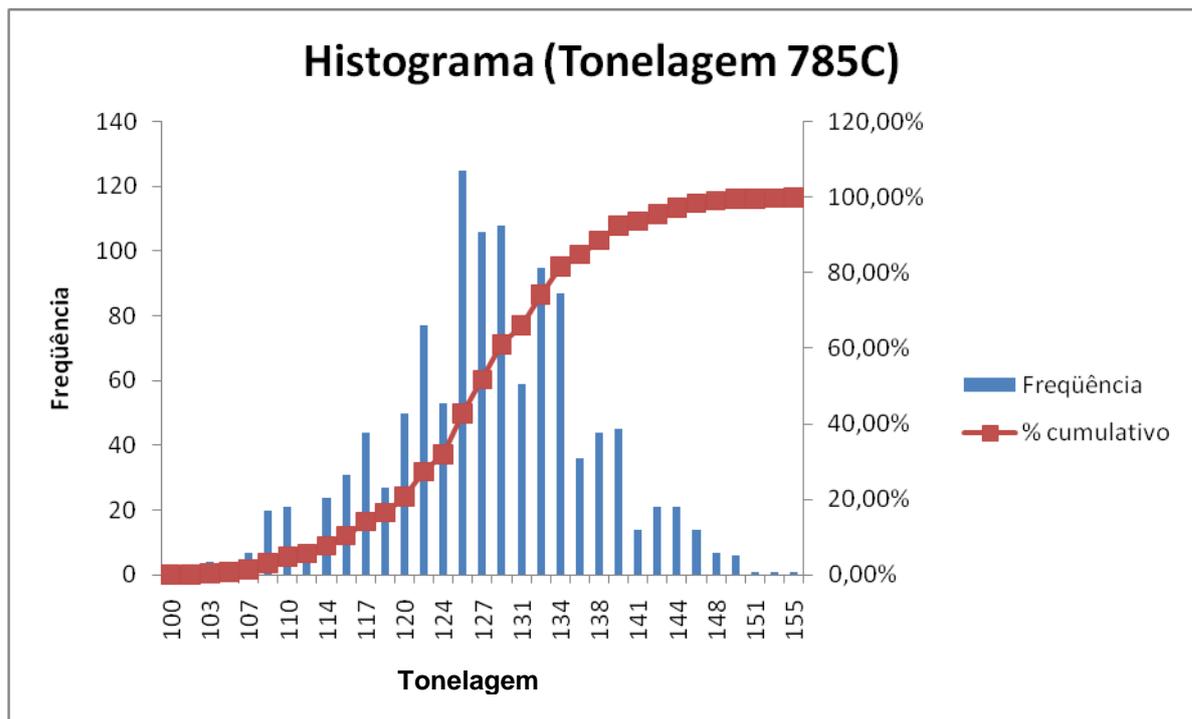


Figura 22: Histograma- Tonelagem 785C com CAT 994

Tabela 25: Estatística Descritiva- Tonelagem 785C com CAT 994

Estatística (Tonelagem 785C)			
Média	127	Curtose	0,21
Mediana	127	Assimetria	-0,33
Moda	130	Mínimo	100
Desvio padrão	9	Máximo	158
Coeficiente de Variação	0,07	Soma	147906
Variância da amostra	79,72	Contagem	1165,00

Por meio de cálculo de produtividade horária da Pá usando as médias de tempo de ciclo e de tonelagem para as frotas de caminhão 785C e 793C, percebe-se uma perda de produtividade de 20,5% uma vez que a produtividade da pá quando carrega os caminhões 785C é de 3.038 t/h e quando carrega os caminhões 793C é de 2.417 t/h. Outro detalhe importante que deve ser observado é em relação carga útil operacional para cada uma das frotas destes caminhões. A carga útil nominal para a frota 785C é de 35 toneladas, porém para a frota 793C é de 32 toneladas. Esta diferença ocorre pelo fato da caçamba do caminhão 793C necessitar de uma maior elevação do braço da pá-carregadeira. Desta forma, além do tempo de ciclo para carregar este caminhão ser maior, a carga de cada passo é 10% menor do que a carga do caminhão 785C.

Para comparação dos dados reais provenientes do Despacho, é feito um dimensionamento teórico (Tabela 26- Cálculo Teórico da Frota de Carregamento) dos equipamentos. Os cálculos seguem as etapas vistas na revisão bibliográfica (Tópicos 2.2 e 2.3), e para o tempo de ciclo médio de cada equipamento são utilizadas as médias do Despacho, uma vez que as condições operacionais do local não podem ser determinadas. As características do material (Fator de Empolamento e Fator de Enchimento) foram retirados da apresentação da Vale sobre Operação de Mina. Neste dimensionamento se deve ter especial cuidado com a diferença existente entre as toneladas métricas da Frota de Carregamento (Tonnes – 1000 kg) e as toneladas curtas da Frota de Transporte (Ton – 907 kg).

Tabela 26: Cálculo Teórico da Frota de Carregamento

Características do Material				
Fator de Empolamento (%)	Fator de Carregamento (%)	Densidade (t/m ³)	Densidade Solta (t/m ³)	
25,00%	80,00%	3,00	2,40	
Equipamento de Carregamento	Caçamba (m ³)	Carga Limite (tonnes)	Carga Calculada (tonnes)	Carga Calculada (ton)
P&H 4100	55,00	105,00	105,6	116,43
P&H 2300	23,00	45,40	44,16	48,69
CAT 994	17,00	35,00 ou 32,00	32,64	35,99
Equipamento de Carregamento	Número de Passadas - 785C	Número de Passadas - 793C	Tempo de Ciclo Médio (CAT 785C)	Tempo de Ciclo Médio (CAT 793C)
P&H 4100	1,29	2,06	0,000	0,024
P&H 2300	3,08	4,93	0,031	0,064
CAT 994	4,17	7,27	0,042	0,093
Equipamento	Produtividade Média (ton/h) (E= 100%)- CAT		Produtividade Média (ton/h) (E= 100%)- CAT	
	785C		793C	
P&H 4100	0,00		9.702,32	
P&H 2300	4.711,74		3.803,75	
CAT 994	3.428,57		2.483,87	

3.4. EFICIÊNCIA DE TRAJETOS DE TRANSPORTE

Este tópico visa à comparação dos dados obtidos pelo despacho com os cálculos teóricos apresentados no tópico 2.3.2. A análise dos dados do despacho foi feita de acordo com a metodologia descrita, sendo que seu histograma tem como população os tempos de ciclo de alguns trechos da mina bem como a carga útil movimentada. Após esta distribuição estatística dos dados, foi feita a comparação com os cálculos teóricos, que são feitos da seguinte forma:

- 1) Com as inclinações médias fornecidas de cada trajeto, é calculado um perfil de transporte. As rampas destes trajetos possuem 10% de inclinação (para cada 100 m de rampa percorridos, eleva-se na vertical 10 m), a parte horizontal possui 0% de inclinação e a resistência de rolamento foi desprezada por falta de informações acerca desta.
- 2) Após o cálculo do perfil de transporte são calculadas as velocidades máximas de cada trecho. Para tanto, usa-se os ábacos de Esforço Trator e Efeito Retardador fornecidos pelo fabricante para encontrar as velocidades máximas adequadas e também a marcha recomendada de cada frota de caminhão para o trecho em questão (Anexos 1, 2, 3, 4, 5 e 6). A determinação desta velocidade máxima é em função da carga total do caminhão e da resistência ou assistência total.
- 3) Com as velocidades máximas de cada trecho, calcula-se a velocidade média. Esta velocidade média é calculada por meio de um coeficiente (encontrado na Tabela 8 - Fatores de Redução da velocidade máxima à velocidade média) que é multiplicado pela velocidade máxima.
- 4) Por último, após os cálculos da velocidade média, encontra-se o tempo de ciclo (em minutos) do trecho com a Equação:

$$T_c = \frac{D \times 0,06}{V_m}$$

Onde “D” é a distância do trecho e “V_m” é a velocidade média (em km/h). Após o cálculo do tempo de ciclo de cada trecho, somam-se os valores (tanto de ida como de volta) para encontrar o tempo de ciclo total teórico do trajeto. Com este tempo de ciclo total, foram feitas as comparações com o tempo de ciclo obtido no despacho. A Tabela 27 (Perfis de Transporte) fornece informações (baseadas no despacho) para cada trajeto que foi analisado.

Tabela 27: Perfis de Transporte (Continua)

Trajeto (Origem/Destino)	Distância (metros)	Equipamento de Carregamento	Frota de Transporte	Ton. Média Transportada
SEQ3-072N / Britador	6157	Pá Mecânica	CAT 785C / 793C	140
SEQ3-072N2 / Sudeste 2-220	7688	Escavadeira / Pá Mecânica	CAT 793C / 785C	210

Tabela 27: Continuação

Trecho 1 (metros)	Trecho 2 (Rampa 10%) (metros)	Trecho 3 (metros)
517	2071	3569
1030	1837	4820

Trajeto 1: SEQ3-072N / Britador

O primeiro trecho estudado é uma das frentes de lavra que alimenta o britador, sendo responsável por 83.783 toneladas transportadas em um intervalo de tempo de 343,02 horas, resultando em uma produtividade média horária de 244,25 toneladas. Observa-se a grande restrição na produtividade que a frota de transporte está gerando sobre a frota de carregamento, uma vez que a produtividade da

escavadeira desta frente de lavra pode chegar a 4.750 t/h com 50% de eficiência e condição ideal de sincronismo. Este material foi carregado pelas pás mecânicas da Caterpillar (CAT 994).

Uma observação a ser feita acerca deste trajeto é sobre a frota de transporte. Cerca de 10% dos registros feitos pelo despacho deste trajeto foram movimentados pela frota CAT 793C (240 Toneladas Curtas – 218 Toneladas Métricas), e o restante pela frota 785C (150 Toneladas Curtas – 136 Toneladas Métricas). Deve-se observar que a pá mecânica não é o equipamento adequado para o carregamento deste caminhão, sendo necessário um maior número de passos para carregá-lo. Com o aumento do número de passos, têm-se um aumento no tempo de ciclo e, conseqüentemente, uma redução considerável na produtividade da pá. As Figuras 23 (Histograma- Tempos de Ciclo do Trajeto 1) e Figura 24 (Histograma- Tonelagem Trajeto 1) apresentam os histogramas do tempo de ciclo e da tonelagem média deste trajeto, bem como alguns parâmetros estatísticos calculados, indicados na Tabela 28- Estatística Descritiva dos Tempos de Ciclo do Trajeto 1 e Tabela 29- Estatística Descritiva das Tonelagens do Trajeto 1, fornecendo informações sobre a eficiência deste trajeto.

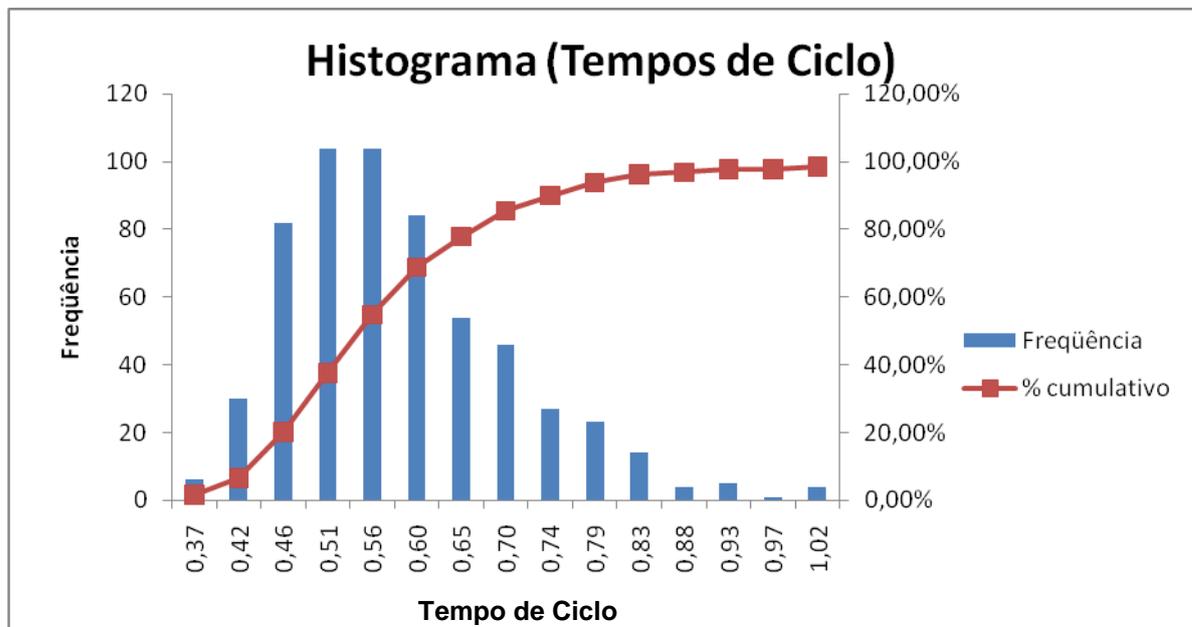


Figura 23: Histograma- Tempos de Ciclo Trajeto 1.

Tabela 28: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo Trajeto 1

Estatística (Tempos de Ciclo)			
Média	0,57	Curtose	5,87
Mediana	0,55	Assimetria	0,42
Moda	0,57	Mínimo	0,23
Desvio padrão	0,14	Máximo	1,34
Variância da amostra	0,02	Soma	343,02
Coeficiente de Variação	0,25	Contagem	600

Por meio da análise do histograma pode-se observar que a variância dos dados foi baixa. Cerca de 78,5% dos dados ficaram entre o intervalo 0,43 a 0,61 horas para o tempo de ciclo. Devido à assimetria para a esquerda presente nesta distribuição, o intervalo de dados abrangido pelo desvio padrão não será de 68,27% dos dados, como pôde ser observado acima. Os tempos de ciclo mais elevados são da frota 793C, uma vez que o tempo de viagem e o tempo de carregamento desta frota são substancialmente maiores.

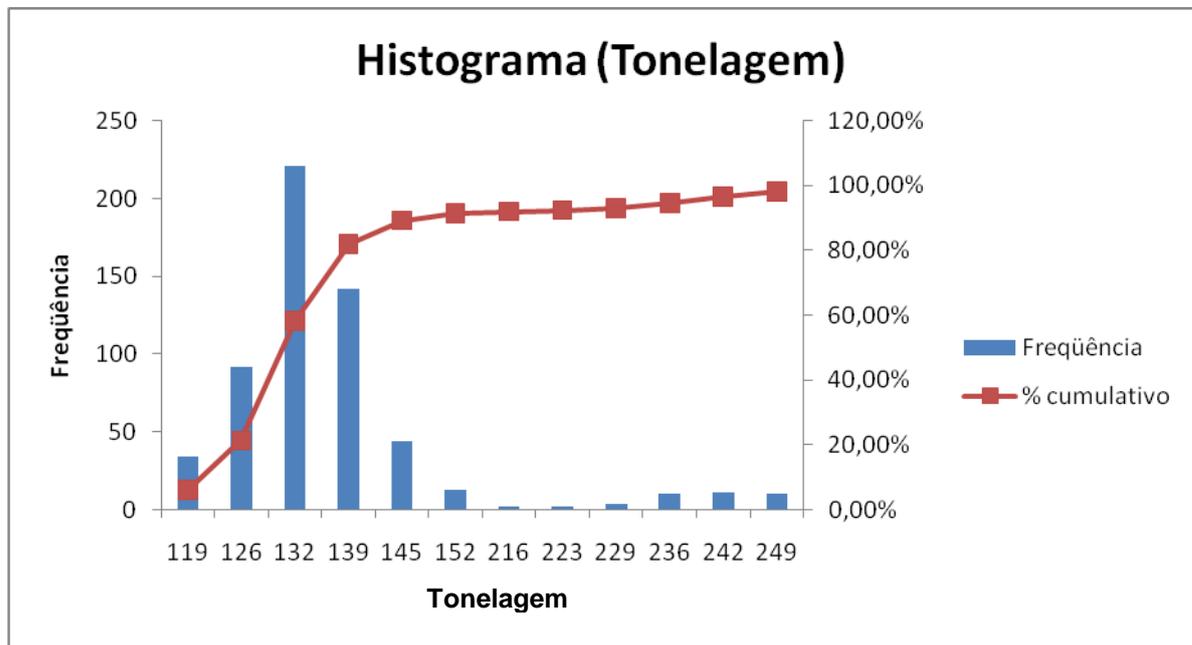


Figura 24: Histograma- Tonelagem Trajeto 1

Tabela 29: Estatística Descritiva- Tonelagem Trajeto 1

Estatísticas (Tonelagem)			
Média	140	Curtose	6,67
Mediana	131	Assimetria	0,84
Moda	129	Mínimo	113
Desvio padrão	32	Máximo	268
Variância da amostra	997	Soma	83783
Coefficiente de Variação	0,23	Contagem	600

A Figura 24 (Histograma das toneladas) demonstra claramente o comentário sobre as frotas de transporte deste trajeto, onde cerca de 10% da movimentação total desta frente de lavra foi feita pelos caminhões CAT 793C. Um fato a ser observado é em relação à homogeneidade do carregamento dos caminhões. A carga ótima do caminhão 785C é de 150 toneladas, porém apenas 10% dos transportes realizados ficaram no intervalo de 140-160 toneladas.

Por último, é feita uma comparação entre o tempo de transporte segundo os dados do despacho e o obtido pelo cálculo teórico visto no tópico 2.3.2. Vale lembrar que, como alguns dados não foram obtidos (tais como a resistência de rolamento do trajeto, e o perfil exato de transporte) esta comparação terá apenas caráter ilustrativo para demonstrar com mais clareza a metodologia de análise de eficiência operacional. A média dos tempos de ciclo para as frotas 785C e 793C foi:

- CAT 785C: Trajeto de Ida (Carregado): 0,24h; Trajeto de Volta (Vazio): 0,13h.
- CAT 793C: Trajeto de Ida (Carregado): 0,26h; Trajeto de Volta (Vazio): 0,13h.

A Tabela 30 (Cálculo Teórico do Tempo de Ciclo para o Trajeto 1) apresenta os valores encontrados para velocidade média e o como o tempo de ciclo de cada trecho, bem como o tempo de ciclo total.

Tabela 30: Cálculo Teórico do Tempo de Ciclo para o Trajeto 1 (Continua)

Trecho 1		
Ida (Carregado)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	517	
Velocidade Máxima (km/h)	45	45
Marcha	6 ^a	6 ^a
Coeficiente	0,74	0,74
Velocidade Média (km/h)	33,3	33,3
Tempo de Ciclo (min.)	1,83	1,83
Volta (Vazio)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	517	
Velocidade Máxima (km/h)	45	45
Marcha	6 ^a	6 ^a
Coeficiente	0,9	0,9
Velocidade Média (km/h)	40,5	40,5
Tempo de Ciclo (min.)	1,51	1,51

Trecho 2 (Rampa 10%)		
Ida (Carregado)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	2071	
Velocidade Máxima (km/h)	17,5	15
Marcha	2 ^a	2 ^a
Coeficiente	1	1
Velocidade Média (km/h)	18	15
Tempo de Ciclo (min.)	7,10	8,28
Volta (Vazio)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	2071	
Velocidade Máxima (km/h)	32,5	30
Marcha	4 ^a	4 ^a
Coeficiente	0,98	0,98
Velocidade Média (km/h)	31,85	29,40
Tempo de Ciclo (min.)	3,90	4,23

Tabela 30: Cálculo Teórico do Tempo de Ciclo para o Trajeto 1 (Continuação)

Trecho 3		
Ida (Carregado)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	3569	
Velocidade Máxima (km/h)	45	45
Marcha	6 ^a	6 ^a
Coeficiente	0,93	0,93
Velocidade Média (km/h)	41,85	41,85
Tempo de Ciclo (min.)	4,40	4,40
Volta (Vazio)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	3569	
Velocidade Máxima (km/h)	45	45
Marcha	6 ^a	6 ^a
Coeficiente	0,94	0,94
Velocidade Média (km/h)	42,3	42,3
Tempo de Ciclo (min.)	4,35	4,35

Total Carregado (min.)	13,33	14,52
Total Vazio (min.)	9,76	10,09
Tempo de Ciclo Total (min.)	23,09	24,60
Tempo de Ciclo Total (h)	0,38	0,41

Trajeto 2: SOS2-200N2 / SOS-Estéril-220:

O segundo trajeto movimenta material estéril da mina (sapolito e granito), sendo este material carregado somente pela escavadeira P&H 2300, e é transportado pelas duas frotas da mina, sendo a 793C responsável por 40% da movimentação total do trajeto. Com uma movimentação total de 278.149 toneladas em um tempo de ciclo de 500 horas, resulta em uma produtividade média horária de 557 t. Com este valor de 557 t/h, se observa como a frota de transporte está limitando a produtividade da escavadeira, no caso a P&H 2300, que possui uma produtividade horária de aproximadamente 1750 t com 50% de eficiência.

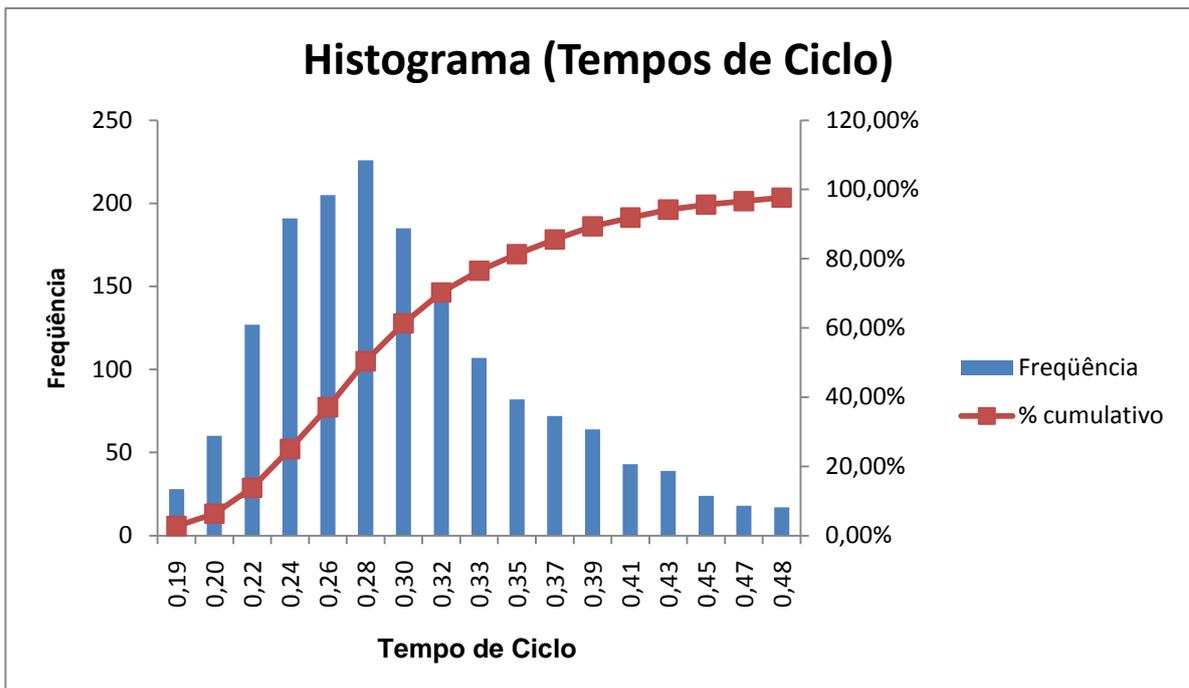


Figura 25: Histograma- Tempos de Ciclo Trajeto 2

Tabela 31: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo Trajeto 2

Estatística (Tempos de Ciclo)			
Média	0,29	Curtose	4,45
Mediana	0,28	Assimetria	0,375
Moda	0,32	Mínimo	0,11
Desvio padrão	0,08	Máximo	0,87
Coeficiente de Variação	0,26	Soma	500
Variância da amostra	0,01	Contagem	1699

Analisando a Figura 25 (Histograma – Tempos de Ciclo Trajeto 2) do tempo de ciclo, pode-se observar uma forte assimetria para a esquerda na distribuição. Uma observação interessante que deve ser feita é que, como a movimentação foi feita por duas frotas distintas e a movimentação que elas fizeram foi semelhante (sendo 60% para a frota 785C e 40% para a frota 793C), este histograma será subdividido nas Figuras 26 e 27 e nas Tabelas 32 e 33 para melhor analisar o tempo de ciclo de cada uma das frotas separadamente.

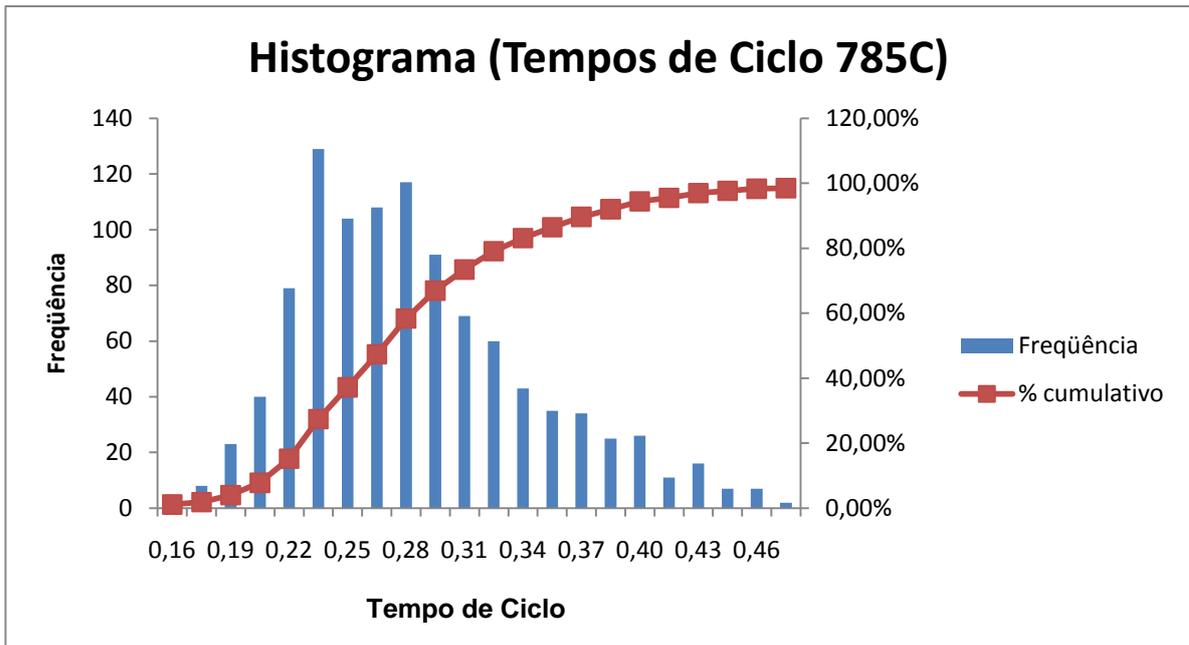


Figura 26: Histograma- Tempos de Ciclo Trajeto 2 Frota 785C

Tabela 32: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo Trajeto 2 Frota 785C

Estatística (Tempos de Ciclo 785C)			
Média	0,28	Assimetria	0,85
Mediana	0,26	Curtose	1,80
Moda	0,27	Mínimo	0,11
Desvio padrão	0,07	Máximo	0,59
Variância	0,005	Soma	293,87
Coeficiente de Variação	0,25	Contagem	1062,00

Neste histograma da frota 785C ainda se pode observar claramente a forte assimetria positiva da distribuição, fazendo o intervalo de seu desvio padrão (0,21 a 0,35 h) abranger 77,8% da distribuição.

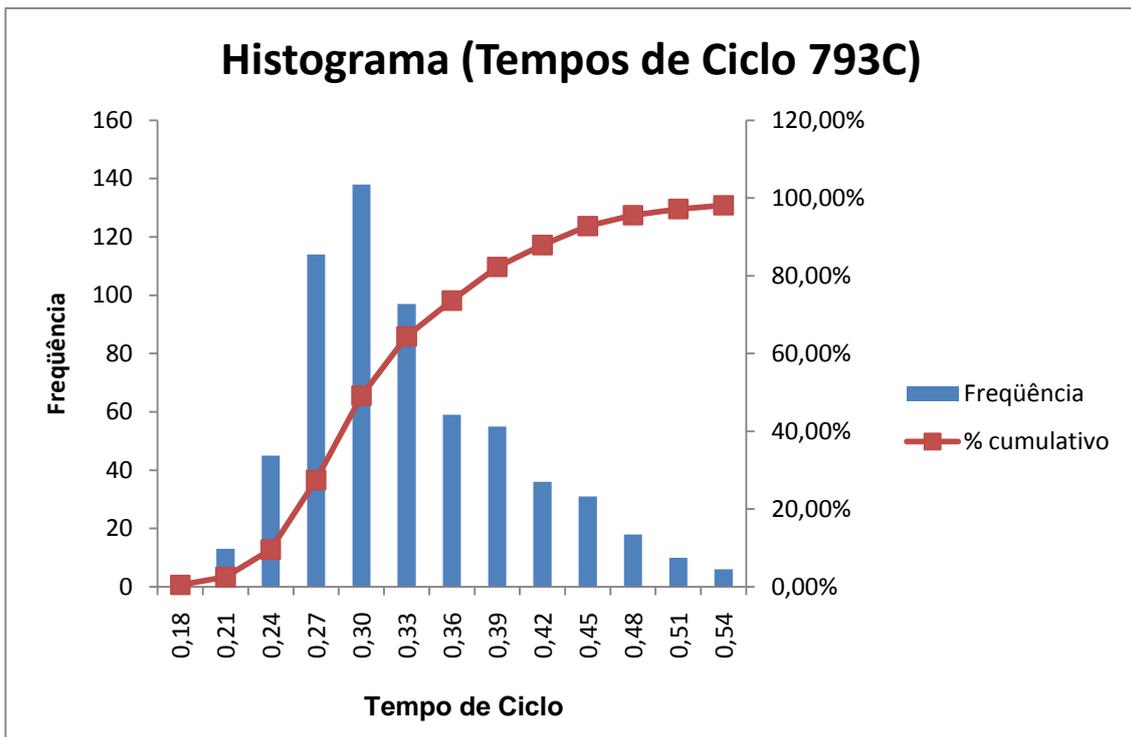


Figura 27: Histograma- Tempos de Ciclo Trajeto 2 Frota 793C

Tabela 33: Estatística Descritiva- Tempos de Ciclo Trajeto 2 Frota 793C

Estatística (Tempos de Ciclo 793C)			
Média	0,32	Assimetria	0,75
Mediana	0,30	Curtose	5,36
Moda	0,27	Mínimo	0,12
Desvio padrão	0,08	Máximo	0,87
Variância da amostra	0,007	Soma	205,68
Coeficiente de Variação	0,25	Contagem	637

Com relação ao tempo de ciclo da frota 793C, ainda observa-se uma assimetria bem parecida com a distribuição da frota 785C, fazendo com que o intervalo do desvio padrão (0,24 a 0,40 h) abranja 77,5% dos registros. Com relação à curtose, a desta distribuição está significativamente maior, indicando que alguns dados possuem uma frequência bem mais elevada que outros (intervalos 0,27 e 0,30). Um dado interessante com relação ao tempo de ciclo desta distribuição é que, apesar de serem duas populações de dados distintas, não se observa uma distribuição bimodal dos dados. Isto ocorre devido ao intervalo do desvio padrão das duas frotas serem relativamente próximos um do outro, sendo 0,21 a 0,35 para a frota 785C e 0,24 a 0,40 para a frota 793C. Isto não será mais observado com

relação à distribuição das tonelagens, uma vez que o intervalo do desvio padrão das duas frotas será significativamente diferente.

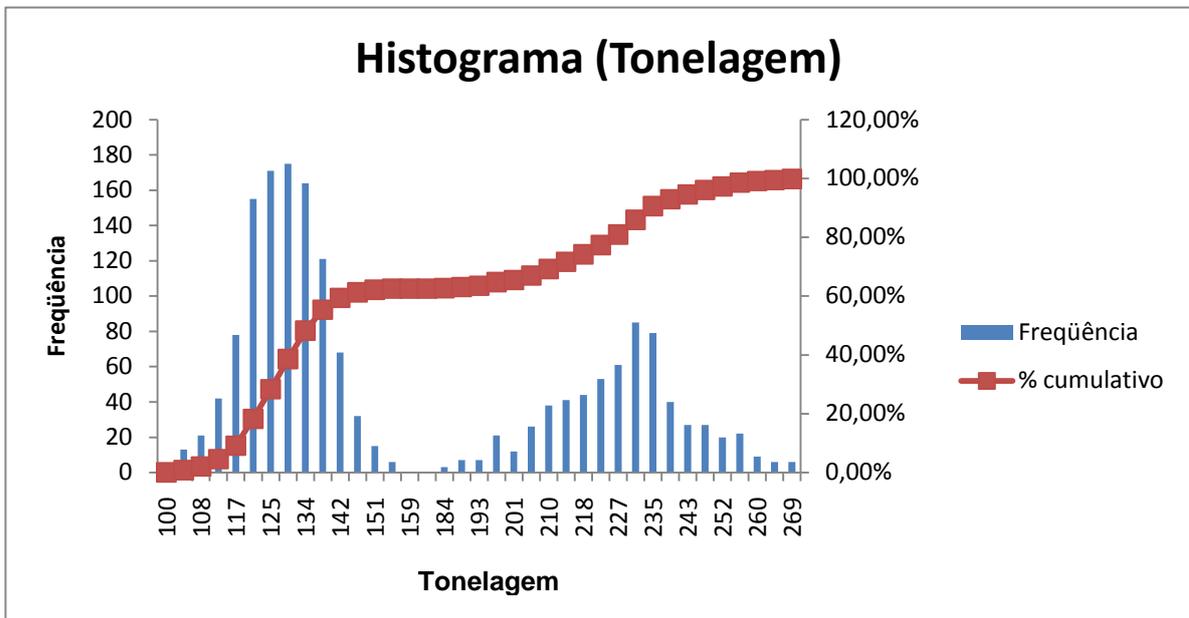


Figura 28: Histograma- Tonelagem Trajeto 2

Tabela 34: Estatística Descritiva- Tonelagem Trajeto 2

Estatística (Tonelagem)			
Média	164	Curtose	-1,40
Mediana	134	Assimetria	0,58
Moda	130	Mínimo	100
Desvio padrão	50	Máximo	273
Coeficiente de Variação	0,30	Soma	278149
Variância da amostra	2473	Contagem	1699

Neste histograma se pode observar claramente a distribuição bimodal presente neste conjunto de dados, e como a quantidade de material movimentado pelas duas frotas foi bem semelhante, a média dos dados ficou em uma região entre as duas distribuições. Mais uma vez, os dados serão subdivididos entre as duas frotas de caminhão.

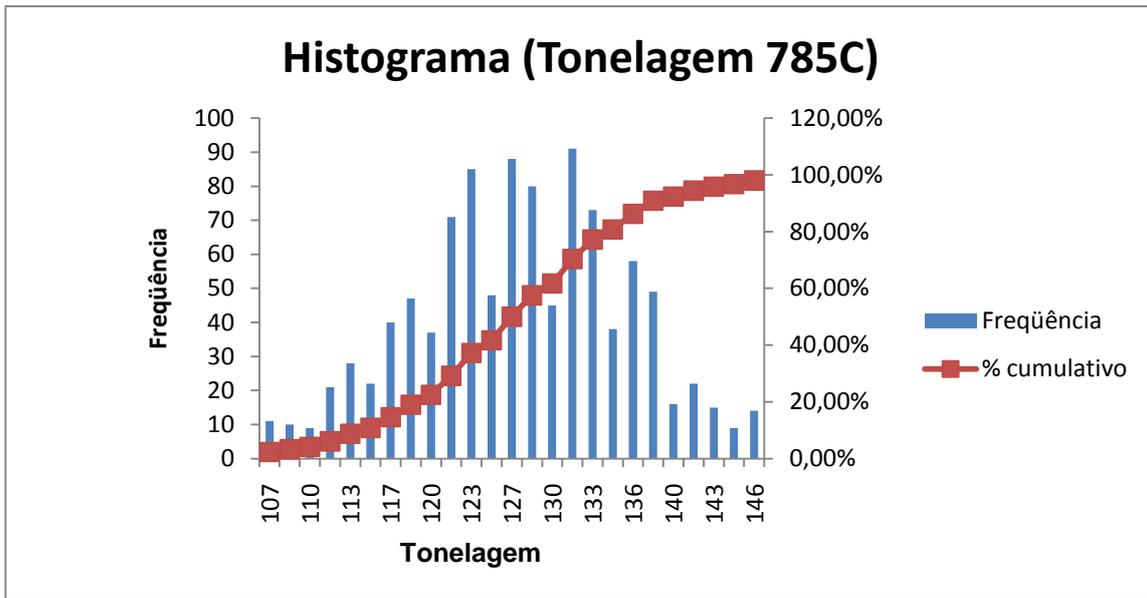


Figura 29: Histograma- Tonelagem Trajeto 2 Frota 785C

Tabela 35: Estatística Descritiva- Tonelagem Trajeto 2 Frota 785C

Estatística (Tonelagem 785C)			
Média	126	Assimetria	-0,33
Mediana	127	Curtose	-0,02
Moda	130	Mínimo	100
Desvio padrão	9	Máximo	153
Variância da amostra	90	Soma	134.341
Coeficiente de Variação	0,07	Contagem	1.062,00

No caso da tonelagem da frota 785C, como se pode observar na Figura 29 (Histograma – Tonelagem Trajeto 2 Frota 785C), além de não se aproveitar a capacidade ideal do caminhão, indicado claramente pela média de 126 t, aproximadamente 20% dos carregamentos usaram menos de 80% da capacidade ideal de carregamento do caminhão, e apenas 19% esteve entre 135 t e 155 t, reduzindo a produtividade significativamente. Apenas 8% dos carregamentos ficaram no intervalo de 140-155 t indicando, no mínimo, que o equipamento de carregamento não é o ideal para este caminhão.

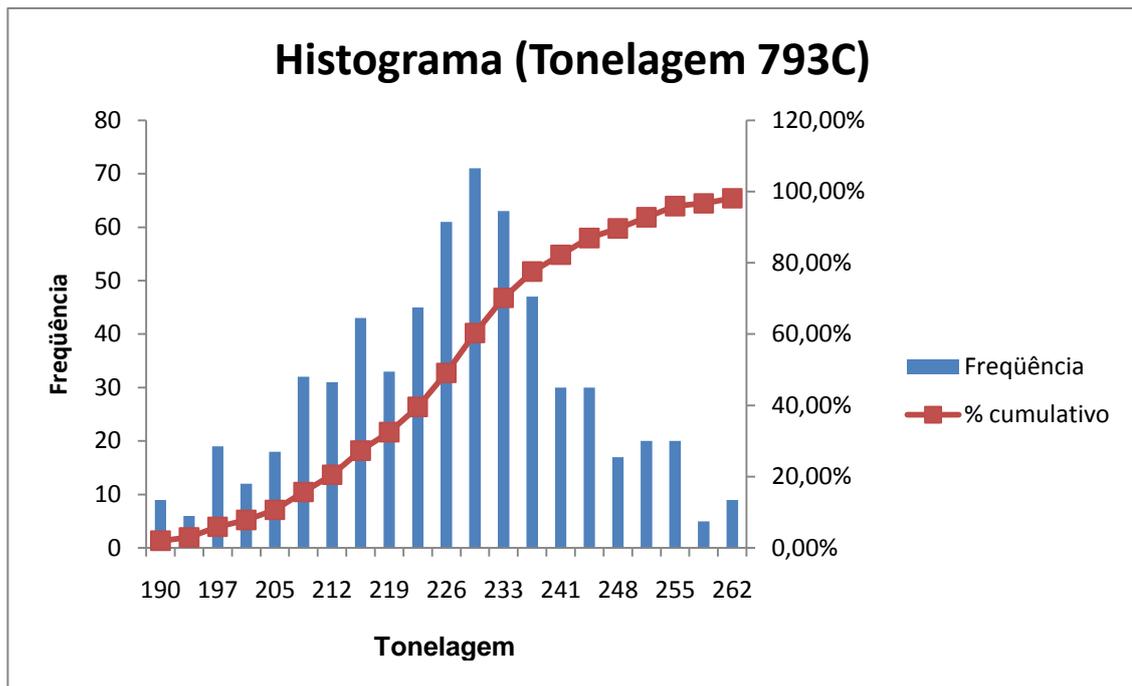


Figura 30: Histograma- Tonelagem Trajeto 2 Frota 793C

Tabela 36: Estatística Descritiva- Tonelagem Trajeto 2 Frota 793C

Estatística (Tonelagem 793C)			
Média	226	Assimetria	-0,17
Mediana	227	Curtose	-0,10
Moda	228	Mínimo	183
Desvio padrão	17	Máximo	273
Variância da amostra	284	Soma	143.808
Coeficiente de Variação	0,075	Contagem	637

Com relação à frota 793C, observa-se que ela teve uma melhor utilização de sua capacidade nominal, indicando, conseqüentemente, que o equipamento de carregamento utilizado é mais adequado para esta frota do que para a frota 785C, mas mesmo assim, ainda há necessidade de melhoras, uma vez que 27,5% dos carregamentos ficaram no intervalo de 230-245 t. Observa-se também que 8,5% dos carregamentos ficaram acima dos 5% da capacidade nominal do caminhão, prejudicando, desta forma, sua integridade mecânica. No que diz respeito aos tempos de ciclo dos percursos de viagem, a média para as duas frotas foi:

- CAT 785C: Trajeto de Ida (Carregado): 0,13h; Trajeto de Volta (Vazio): 0,05h.
- CAT 793C: Trajeto de Ida (Carregado): 0,13h; Trajeto de Volta (Vazio): 0,06h

A Tabela 37 (Cálculos Teóricos para Tempos de Ciclo do Trajeto 2) apresenta os valores encontrados de velocidade média e tempos de ciclo com base nos cálculos teóricos.

Tabela 37: Cálculos Teóricos para Tempos de Ciclo Trajeto 2 (Continua)

Trecho 1		
Ida (Carregado)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	560	
Velocidade Máxima (km/h)	45	45
Marcha	6 ^a	6 ^a
Coefficiente	0,72	0,72
Velocidade Média (km/h)	32,4	32,4
Tempo de Ciclo (min.)	1,04	1,04
Volta (Vazio)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	560	
Velocidade Máxima (km/h)	45	45
Marcha	6 ^a	6 ^a
Coefficiente	0,9	0,9
Velocidade Média (km/h)	40,5	40,5
Tempo de Ciclo (min.)	0,83	0,83

Trecho 2 (Rampa 10%)		
Ida (Carregado)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	311	
Velocidade Máxima (km/h)	17,5	15
Marcha	2 ^a	2 ^a
Coefficiente	1	1
Velocidade Média (km/h)	17,5	15
Tempo de Ciclo (min.)	1,07	1,24
Volta (Vazio)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	311	
Velocidade Máxima (km/h)	32,5	30
Marcha	4 ^a	4 ^a
Coefficiente	0,83	0,83
Velocidade Média (km/h)	26,975	24,9
Tempo de Ciclo (min.)	0,69	0,75

Tabela 37: Cálculos Teóricos para Tempos de Ciclo Trajeto 2 (Continuação)

Trecho 3		
Ida (Carregado)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	2239	
Velocidade Máxima (km/h)	45	45
Marcha	6 ^a	6 ^a
Coefficiente	0,93	0,93
Velocidade Média (km/h)	41,85	41,85
Tempo de Ciclo (min.)	3,21	3,21
Volta (Vazio)	CAT 785C	CAT 793C
Distância (m)	2239	
Velocidade Máxima (km/h)	45	45
Marcha	6 ^a	6 ^a
Coefficiente	0,94	0,94
Velocidade Média (km/h)	42,3	42,3
Tempo de Ciclo (min.)	3,18	3,18

Total Carregado (min.)	5,31	5,49
Total Vazio (min.)	4,70	4,75
Tempo de Ciclo Total (min.)	10,01	10,25
Tempo de Ciclo Total (h)	0,17	0,17

4. CONCLUSÃO

Como se pode observar, o correto dimensionamento e monitoramento das atividades operacionais das frotas de carregamento e transporte são de fundamental importância para o sucesso do empreendimento mineiro.

Os histogramas e tabelas de coeficientes estatísticos criados pelo Excel são ferramentas difundidas e eficientes para o estudo da eficácia destas operações. Com elas podemos verificar se:

- Os carregamentos feitos estão realmente dentro do intervalo de carregamento ótimo do caminhão, uma vez que um carregamento abaixo deste intervalo resulta em uma diminuição da produtividade do caminhão, e acima deste prejudica a integridade mecânica do mesmo,
- Como o impacto que o carregamento de duas frotas distintas de caminhões afeta o tempo de ciclo de uma unidade de carregamento e, conseqüentemente, sua produtividade.

Para o caso de operações de carregamento e transporte que não estejam sendo eficientes, são vários os fatores que podem estar influenciando para que isto aconteça.

- Para o caso do carregamento, se pode citar:
 - Altura inadequada da pilha;
 - Posição inadequada do caminhão carregado;
 - Equipamento mal-dimensionado para a realidade da mina;
 - Sincronismo inadequado com a frota de transporte.
- Com relação à frota de transporte, cita-se:
 - Praça e pistas com resistências (rolamento e inclinação) elevadas;
 - Baixa eficiência do motor;
 - Manutenção precária do equipamento.

- Além destes problemas, há também fatores heurísticos que podem interferir a produtividade do equipamento: clima, condições físicas e mentais do operador, entre outros.

Com estas ferramentas podem-se realizar alguns outros trabalhos de análise de eficiência de uma etapa de operação, como por exemplo, a influência que o excesso de peso no caminhão gera sobre a disponibilidade física e custos de manutenção deste, bem como o aumento no tempo de ciclo ocasionado pelo volume maior de material sendo transportado. Outros exemplos para trabalhos são: quantificar as perdas, em valores monetários, que esta perda de produtividade está gerando; realizar um estudo que verificará quantos caminhões serão necessários para fazer com que a condição de sincronismo das escavadeiras se torne ideal ou então verificar a possibilidade de se reduzir o número de escavadeiras para que se ajuste ao número de caminhões disponíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

HARTMAN, H. L. et al. **SME MINING ENGINEERING HANDBOOK**. 2ª Edição, Volume 1. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 1992

KENNEDY, B. A. et al. **SURFACE MINING**. 2ª Edição. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 1990

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **MANUAL PRÁTICO DE ESCAVAÇÃO: Terraplanagem e Escavação de Rocha**. 3ª Edição. São Paulo, SP: PINI. 2007

CONDURÚ, M. T.; Pereira, J. A. R. **Elaboração de Trabalhos Acadêmicos: Normas, Critérios e Procedimentos**. 2ª Ed. 2006. Editora Universitária UFPA

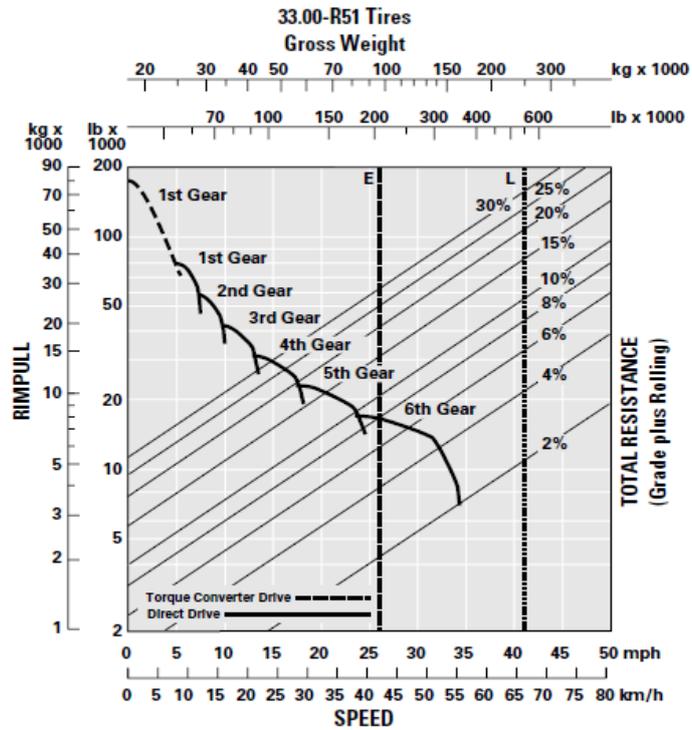
SPIEGEL, M. R.; **ESTATÍSTICA**: Resumo da teoria. Traduzido por: Pedro Consentino. 1ª Ed. 1971. São Paulo, SP: Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda.

PARDAL, P. **INTRODUÇÃO À ESTATÍSTICA**: Com Aplicação à Indústria. 1ª Edição 1980. Rio de Janeiro, RJ. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

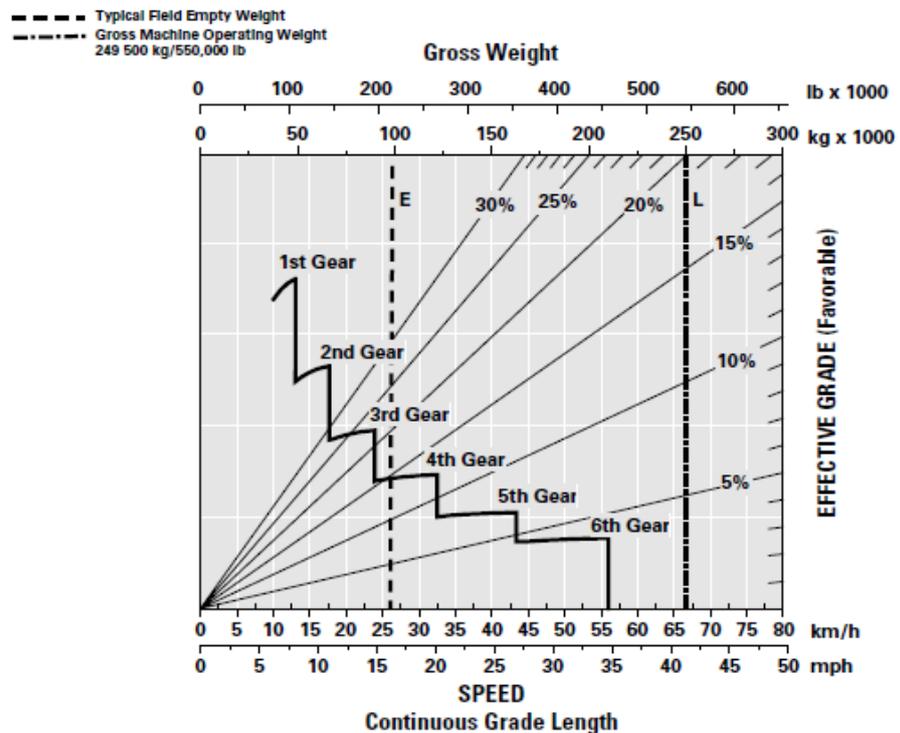
CATTERPILLAR, INC. **MANUAL DE ESCAVAÇÃO**. 31ª Edição, 2000, Peorla, EUA. Editora CAT®

Vale S/A, **APRESENTAÇÃO ENGENHARIA DE MINAS: Operação de Mina**

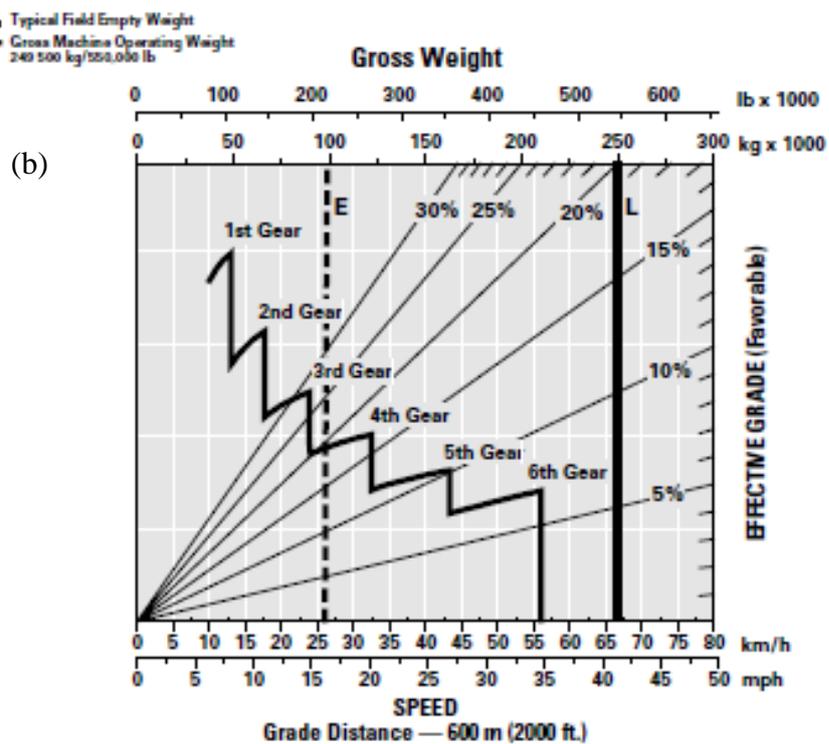
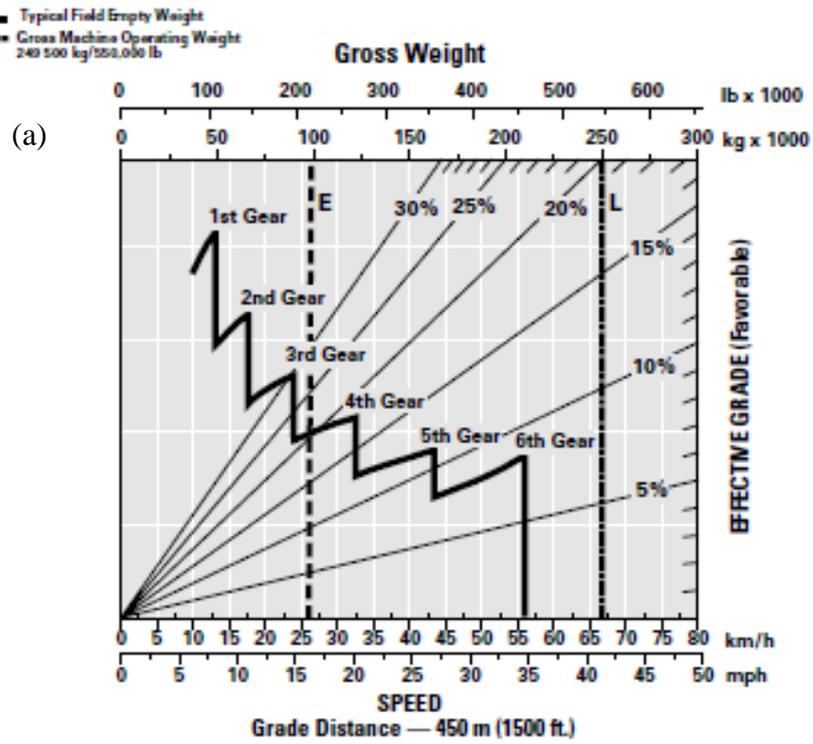
ANEXOS (Ábacos Originais do Manual do Equipamento)



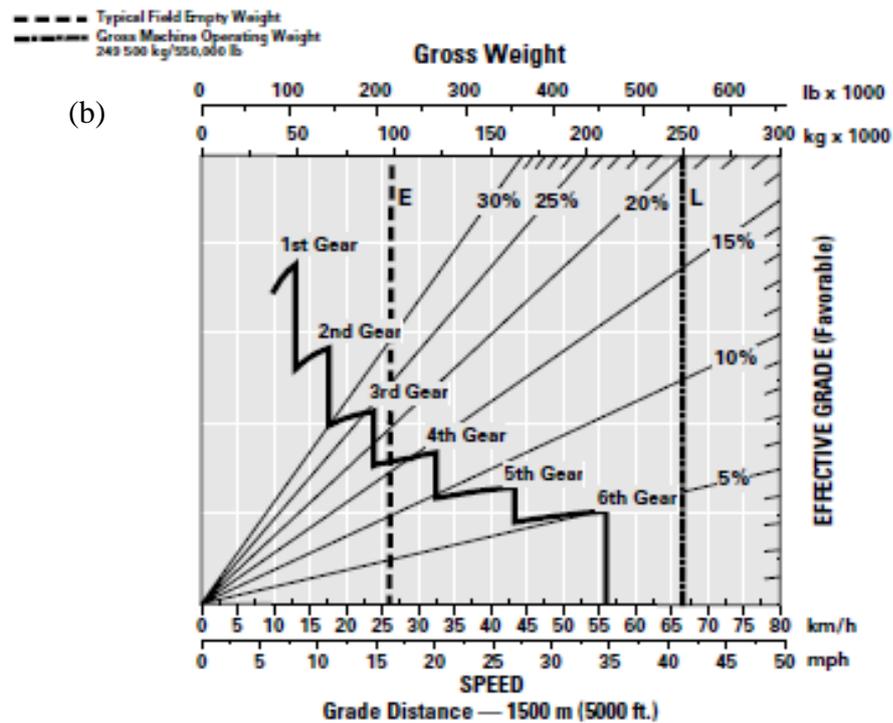
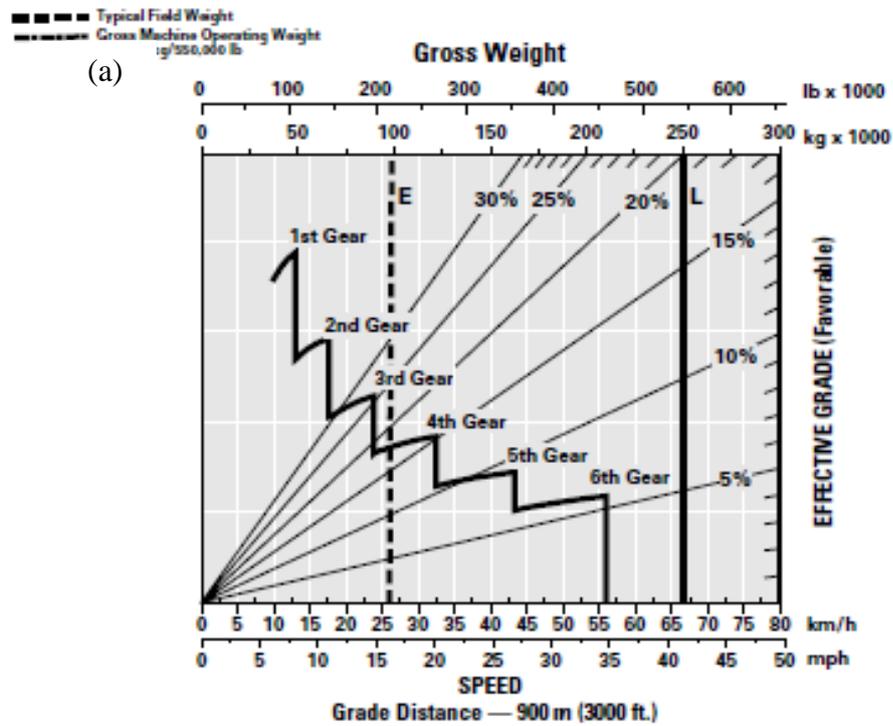
Anexo 1: Ábaco de Esforço Trator (Rimpull) do Caminhão 785C



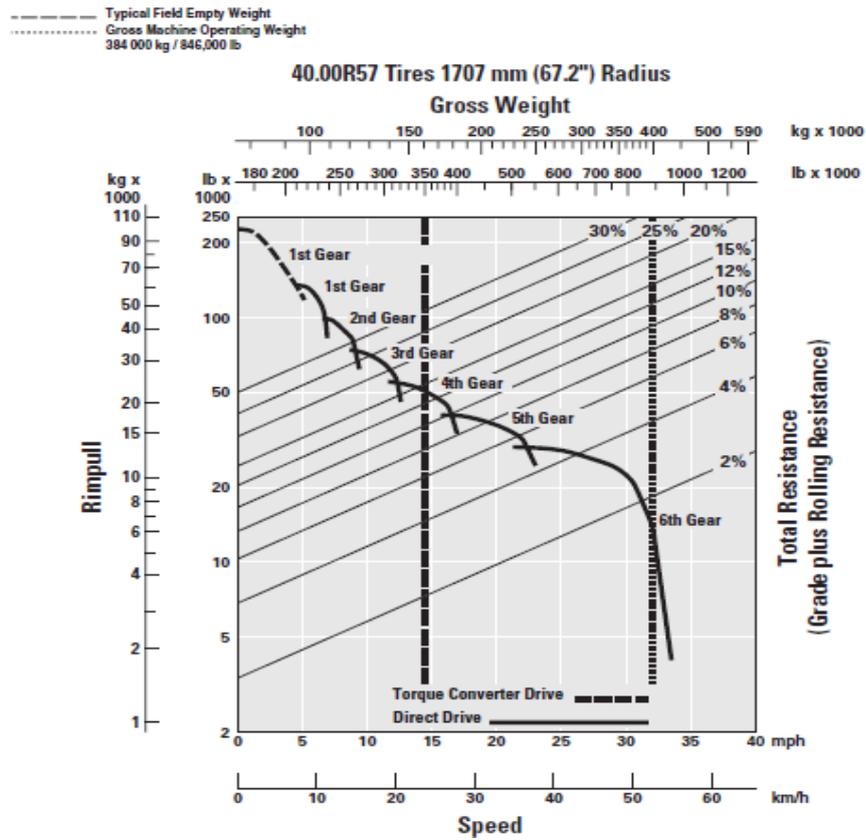
Anexo 2: Ábaco do Efeito Retardador do Caminhão 785C (Rampa Contínua)



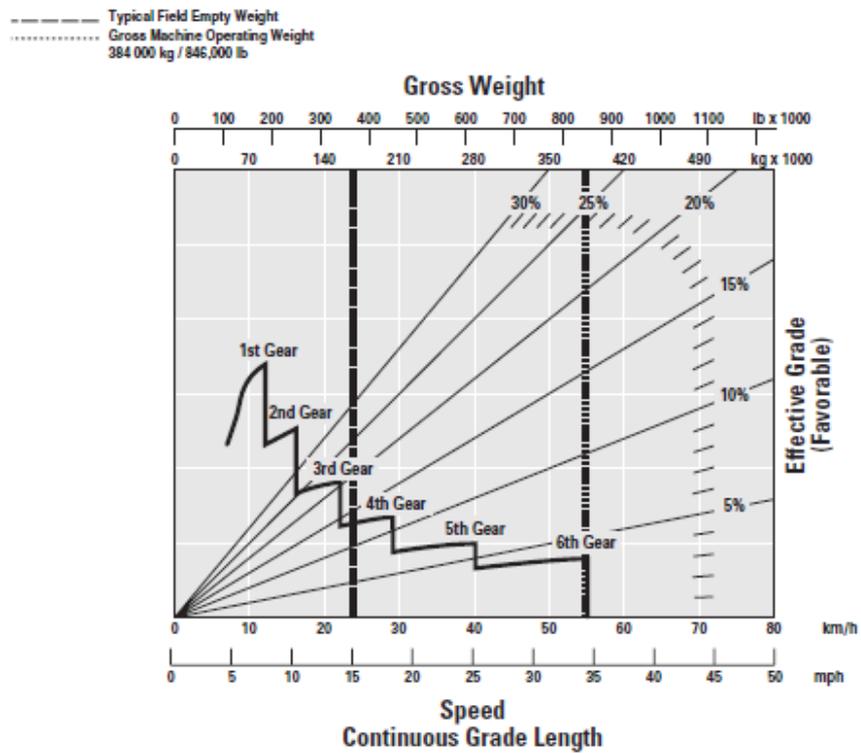
Anexo 3: Ábacos do Efeito Retardador do Caminhão 785C (Rampa de 450 (a) e 600m (b))



Anexo 3: Ábacos do Efeito Retardador do Caminhão 785C (Rampa de 900 (a) e 1500m (b))

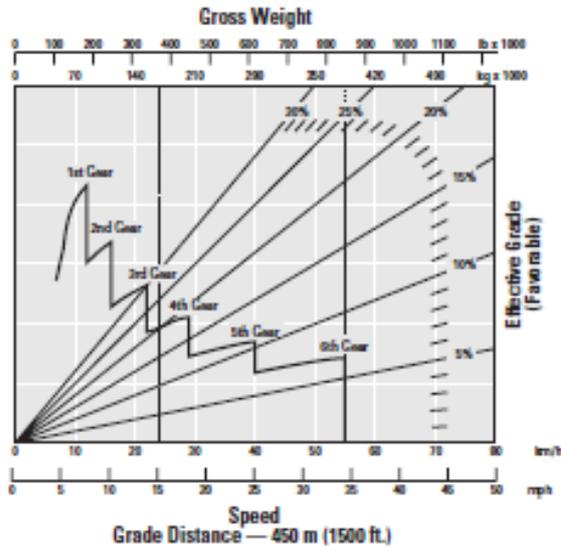


Anexo 4: Ábaco de Esforço Trator (Rimpull) do Caminhão 793C

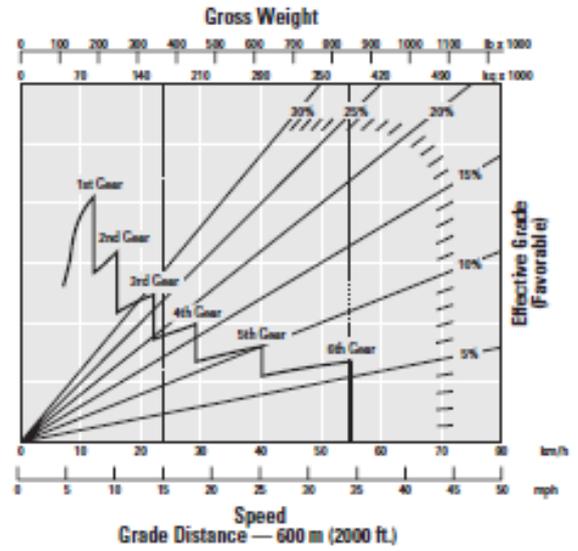


Anexo 5: Ábaco do Efeito Retardador do Caminhão 793C (Rampa Contínua)

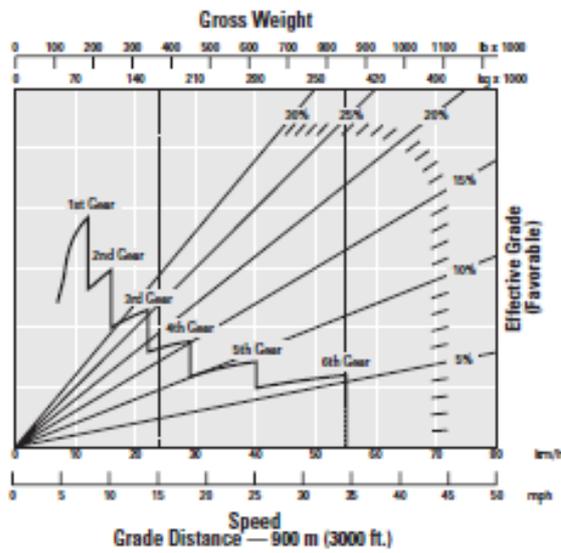
(a)



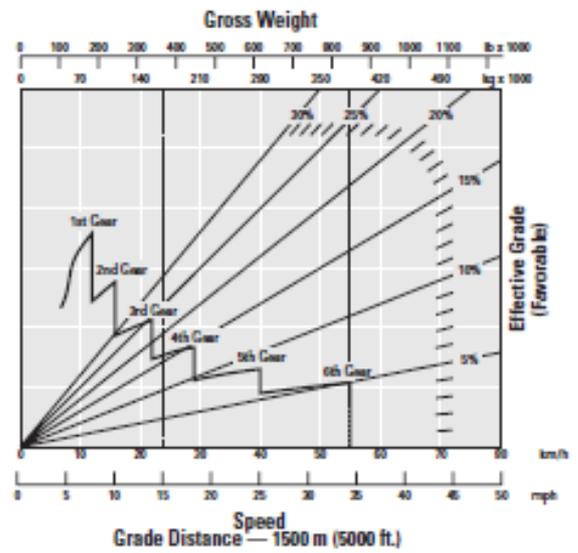
(b)



(c)



(d)



Anexo 6: Ábacos do Efeito Retardador no Caminhão 793C (Rampas de 450m (a), 600m (b), 900m (c) e 1500m (d))