



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



**ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUTIVIDADE NO CARREGAMENTO DE
CAMINHÕES: BALANÇA INTEGRADORA DE CORREIA *VERSUS* PÁ CARREGADEIRA**

DANILO DE ALMEIDA SILAMI

**OURO PRETO - MG
Dezembro de 2019**

DANILO DE ALMEIDA SILAMI

**ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUTIVIDADE NO CARREGAMENTO DE
CAMINHÕES: BALANÇA INTEGRADORA DE CORREIA *VERSUS* PÁ CARREGADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. ELTON DESTRO
(DEMIN/EM/UFOP)

**OURO PRETO - MG
Dezembro de 2019**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S581a Silami, Danilo de Almeida .

Análise comparativa da produtividade no carregamento de caminhões [manuscrito]: balança integradora de correia versus pá carregadeira. / Danilo de Almeida Silami. - 2019. 45 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 19 dias do mês de dezembro de 2019, às 10h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa da Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUTIVIDADE NO CARREGAMENTO DE CAMINHÕES: BALANÇA INTEGRADORA DE CORREIA VERSUS PÁ CARREGADEIRA”**, pelo aluno **Danilo de Almeida Silami**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Elton Destro (Orientador)**, **Prof. Dr. José Margarida da Silva** e **Eng.º de Minas Pablo Augusto Reis Batista**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por pela **aprovação** do candidato, com a nota **8,5** concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Prof. Dr. Elton Destro
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

Ouro Preto, 19 de dezembro de 2019.

Prof. Dr. José Margarida da Silva
Membro da Comissão Avaliadora

Eng.º de Minas Pablo Augusto Reis Batista
Membro da Comissão Avaliadora

Danilo de Almeida Silami

Prof. Ms.C. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família, principalmente aos meus pais: Marcelo e Leomilda, por todo apoio, dedicação e confiança. À Marina pelo carinho e paciência, e a todos os amigos e colegas de trabalho por toda aprendizagem.

AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro de Minas Rogério Ribeiro e ao supervisor Anivaldo Leonor pelo acompanhamento e ensinamentos durante a oportunidade de trabalho na empresa Gecal.

À UFOP e aos professores e mestres que tive a oportunidade de conhecer, pelo ensino gratuito e de qualidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Elton Destro, pela prontidão e conhecimento que proporcionaram a realização deste trabalho.

À minha família por toda base e apoio.

À República Verdes Mares, lugar em que vivi os melhores anos da minha vida, por todas as amizades criadas e por todos os ensinamentos e aprendizados conquistados.

RESUMO

Análises de produtividade, visando comparar novos métodos com os tradicionais, são de extrema importância para que seja identificada a metodologia mais adequada para o aumento da produção de uma maneira geral. O presente estudo tem como proposta comparar a produtividade de dois métodos de carregamento de caminhões: balança integradora de correia e pá carregadeira. A mina objeto de estudo realiza a extração de calcário e está localizada no município de Pains, na região centro oeste do estado de Minas Gerais. A implementação de novas tecnologias no setor minerário tende a ocorrer com mais frequência com o avanço das mesmas. Por meio da coleta de dados relativos ao tempo de carregamento dos caminhões pelos dois métodos analisados, foi possível realizar testes estatísticos sobre a diferença entre as médias amostrais para comparar a produtividade dos métodos utilizados pela empresa. Baseando-se nos valores das médias e dos desvios-padrão das produtividades calculadas, foram utilizados métodos de inferências estatísticas para as duas amostragens realizadas neste projeto aos níveis de confiança de 95% e 99% e, para estes mesmos níveis, também foram determinados os intervalos de confiança para a diferença entre as médias verdadeiras da produtividade no carregamento dos caminhões. Através das análises dos resultados fornecidos pela utilização dos procedimentos estatísticos, foi possível concluir que não há evidências para se rejeitar a hipótese nula, na qual foi admitida como sendo iguais as produtividades dos dois métodos de carregamento.

Palavras-chave: Carregamento de caminhões; Produtividade; Balança integradora de correia; Pá carregadeira; Teste de hipóteses.

ABSTRACT

Productivity analyses, comparing new methods with traditional ones, are extremely important for the implementation of new systems in order to increasingly improve the production in a general way. The present work aims to compare two loading systems in order to verify the productivity of their methods: integrating beltweigher and wheel loader. The mine under study carries out the extraction of limestone and is located in the city of Pains, center-west area of the state of Minas Gerais. The implementation of new technologies in the mining sector tends to occur more frequently as they advance. By collecting data on truck loading time by the two analyzed methods, it was possible to perform statistical tests on the difference between the true productivity means to compare the methods used by the company. Based on the use of the means and standard deviations of the productivity calculated for the two loading methods, confidence intervals at the 95% and 99% levels and the statistical procedure called hypothesis testing were accomplished, which enabled the verification of the null and alternative hypotheses. After analyses of the statistical output results, it was possible to conclude that there is no evidence to reject the null hypothesis, in which the productivity of the loading methods was assumed to be equal.

Keywords: Truck loading; Productivity, Integrating beltweigher; Wheel loader; Hypothesis testing.

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A - área da secção transversal (m^2)

CaO - Óxido de Cálcio

CLP - Controlador lógico programável

h - Hora

H0 - Hipótese nula

Ha - Hipótese alternativa

L - Comprimento do condutor (m)

min - Minutos

MgO - Óxido de Magnésio

n_{bal} - Número total de amostras do carregamento por balança integradora de correia

$n_{pá}$ - Número total de amostras do carregamento por pá carregadeira

R - Resistência

SiO_2 - Dióxido de Silício

s_{bal} - Desvio-padrão amostral da produtividade da balança integradora de correia

$s_{pá}$ - Desvio-padrão amostral da produtividade da pá carregadeira.

t - Tonelada

n - Número total de dados de uma amostragem

ν - Número de graus de liberdade

x - Valor da amostra

\bar{x}_{bal} - Valor da média amostral da balança integradora de correia

$\bar{x}_{pá}$ - Valor da média amostral da pá carregadeira

μ - Média real do parâmetro de interesse (neste trabalho, a produtividade)

ρ - Resistividade

s^2 - Desvio-padrão real do parâmetro de interesse (neste trabalho, a produtividade)

α - Nível de significância

$1 - \alpha$ - Nível de confiança

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conjunto display programador de uma balança integradora.....	14
Figura 2 - Ponte de Pesagem.....	15
Figura 3 - Célula de carga de uma balança integradora de correia.	15
Figura 4 - Ilustração do gerador de pulsos de uma balança integradora de correia.	16
Figura 5 - Foto do gerador de pulsos de uma balança integradora de correia.	16
Figura 6 - Ilustração da segunda Lei de Ohm em um condutor metálico.	17
Figura 7 - Ponte de Wheatstone	17
Figura 8 - Ponte de Wheatstone Desequilibrada	18
Figura 9 - Resistência em um circuito de balança integradora.	18
Figura 10 - Correia transportadora com balança integradora acoplada.	20
Figura 11 - Pá Carregadeira Caterpillar 950H.	21
Figura 12 - A média como um ponto de equilíbrio.....	22
Figura 13 - Distribuição t-Student com região de aceitação (sem hachura) e rejeição (região hachurada) em teste bilateral para um nível de significância α	24
Figura 14 - Balança Integradora de correia que realiza carregamento de um caminhão.	27
Figura 15 - Localização do município de Pains	29
Figura 16 - Localização via satélite da sede da Gecal.	30
Figura 17 - Vista das bancadas de calcário da mina na sede da Gecal.	31
Figura 18 - Pilhas de produção de calcário dolomítico.....	32
Figura 19 - Pilha de estéril do calcário magnesiano.	33
Figura 20 - Resultado da análise de T_0^* . Percebe-se 0,66 está localizado dentro da região de aceitação da hipótese nula ao nível de confiança de 95%.....	39
Figura 21 – Intervalo de confiança para a diferença entre as médias verdadeiras de produtividade ao nível de confiança de 95% (valores em t/h).	40
Figura 22 - Resultado da análise de T_0^* . Percebe-se que 0,66 está localizado dentro da região de aceitação da hipótese nula ao nível de confiança de 99%	41
Figura 23 - Intervalo de confiança para a diferença entre as médias verdadeiras de produtividade dos dois sistemas analisados ao nível de 99%..	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição t-Student.	26
Tabela 2 - Capacidade dos caminhões, tempos de ciclo e produtividade no carregamento por Pá Carregadeira.	35
Tabela 3 - Capacidade dos caminhões, tempos de ciclo e produtividade no carregamento por Balança Integradora de Correia.	36
Tabela 4 - Resultados de médias e desvios-padrão de cada método de carregamento.	37

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Balança Integradora de Correia.....	14
3.2 Ponte de Pesagem.....	14
3.3 Célula de Carga	15
3.4 Gerador de Pulsos	15
3.5 Segunda Lei de Ohm.....	16
3.6 Ponte de Wheatstone	17
3.7 Strain Gauge.....	18
3.8 Correias Transportadoras	19
3.9 Pá Carregadeira	20
3.10 Média Aritmética	21
3.11 Desvio-padrão	22
3.12 Teste da Hipótese Comparando Duas Médias Amostrais	22
3.12.1 Nível de confiança de um teste	22
3.12.2 Variável de teste.....	23
3.12.3 Região de aceitação ou região crítica.....	24
3.12.4 Grau de liberdade	24

3.12.5 Distribuição t-Student	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS	27
Inferências Estatísticas	28
5. ESTUDO DE CASO	29
5.1 Localização da Mina	29
5.2 Geologia Local	30
5.3 Perfil do Depósito da Mina	33
5.4 Dados Coletados	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
6.1 Teste de hipóteses	38
6.2 Intervalos de confiança	40
7. CONCLUSÕES	43
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais faz-se necessário um aumento da produtividade em todo o projeto operacional que envolve o setor minerário. O avanço da tecnologia proporciona o aumento da produção e estimula uma maior demanda por material. O carregamento de caminhões é a última etapa em que o minério está presente dentro da área da mineradora e afeta diretamente a produtividade da mina, sendo interesse de todos envolvidos que o mesmo seja realizado de forma correta, ágil e precisa.

A estatística pode ser considerada uma ferramenta para tomada de decisões, que permite realizar análises e avaliações objetivas, a partir da coleta de dados e processamento das informações requeridas, para se basear um conhecimento prático. A obtenção de indicadores de operações faz-se necessária para que o domínio operacional e conhecimento dos dados em análise permitam que os métodos quantitativos representados na estatística, contribuam para o sucesso do empreendimento.

Para identificar uma metodologia mais adequada para a produtividade do sistema (carregamento de caminhões), foram analisados dois métodos: balança integradora de correias e o tradicional enchimento por pás carregadeiras. A balança integradora é acoplada às correias transportadoras de minério e são equipamentos que pesam o material transportado e medem a velocidade deste equipamento, obtendo-se assim o fluxo de material em determinado tempo. As pás carregadeiras são máquinas pesadas, que fazem a movimentação de carga pelo enchimento de sua caçamba e posterior carregamento dos caminhões.

Para comparação da produtividade dos métodos foram realizadas coletas de dados de trinta ciclos de carregamento de caminhões de capacidades diferentes em cada método. Os dados relativos aos tempos coletados foram trabalhados e, posteriormente, utilizados em cálculos estatísticos. A utilização da média amostral da produtividade de cada sistema e os respectivos desvios-padrão foram utilizados para realizar testes de hipóteses e determinação de intervalos de confiança em dois níveis de confiança: 95% e 99%. Após a verificação das hipóteses testadas, foi permitido analisar os valores das regiões de aceitação para ambos os níveis admitidos e, com isso, realizar as inferências estatísticas que possibilitarão o embasamento da metodologia.

Motivado por essa necessidade, propõe-se com esse trabalho analisar a produtividade desse sistema (carregamento de caminhões) por balanças integradoras de correia em comparação com o método tradicional em que são utilizadas pás carregadeiras, através do uso de técnicas estatísticas como testes de hipóteses e determinação de intervalos de confiança.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Comparar a produtividade entre dois métodos de carregamento de caminhões: balança integradora de correias e o método tradicional de enchimento por pás carregadeiras.

2.2 Objetivos Específicos

- Coletar dados amostrais relacionados aos tempos de ciclo da operação de carregamento dos caminhões;
- Determinar a produtividade do carregamento realizado por pás carregadeiras e com o uso da balança integradora de correia;
- Calcular parâmetros estatísticos para serem utilizados nos testes de hipóteses e determinação dos intervalos de confiança aos níveis de confiança de 95% e 99%.
- Implementar uma metodologia para comparação das médias verdadeiras relacionadas à produtividade e que poderá ser utilizada em situações reais, além de possuir caráter didático-pedagógico, servindo de apoio aos alunos do curso de Engenharia de Minas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Balança Integradora de Correia

Por se tratar de um equipamento industrial, há poucas informações disponíveis na literatura. Sendo assim, este capítulo apresenta uma revisão baseada em informações contidas em manuais e relatórios técnicos, visando apresentar conceitos teóricos básicos.

Balanças integradoras são equipamentos que pesam o material transportado sobre correias, medindo a velocidade de deslocamento da mesma para obter o fluxo, em toneladas, e o total transportado em um determinado tempo.

O cálculo do fluxo é feito através dos valores de peso do material e velocidade da correia. Controladores lógicos programáveis (CLP) permitem controlar a execução do carregamento e obter a massa total de material que foi transportado.

A implementação de instrumentos de pesagem automáticos elimina a necessidade da intervenção de um operador durante a operação de pesagem, aumentando a precisão da operação de controle de carregamento. Com um display programador de fácil leitura (figura 1), o próprio motorista pode definir a carga que será colocada em seu caminhão.



Figura 1 - Conjunto display programador de uma balança integradora. Fonte: autor.

3.2 Ponte de Pesagem

A ponte de pesagem é o corpo da balança, que é constituído por cavaletes que são acoplados a roletes, cujo número varia de acordo com o tamanho da balança e o projeto para o qual é requerido. A ponte é conectada a uma célula de carga para que seja efetuada a medição do peso do

material transportado, conforme mostrado na figura 2.



Figura 2 - Ponte de Pesagem. Fonte: MINÉRIOS & MINERALES, 2019.

3.3 Célula de Carga

A célula de carga, mostrada na figura 3, é o equipamento responsável pela transformação dos esforços mecânicos em sinais elétricos. Este dispositivo é o elemento que detecta a carga sobre a correia, sendo, portanto, de vital importância para a operação (SCHENK, 1998). A célula de carga trabalha baseado na ponte de Wheatstone e na segunda lei de Ohm.

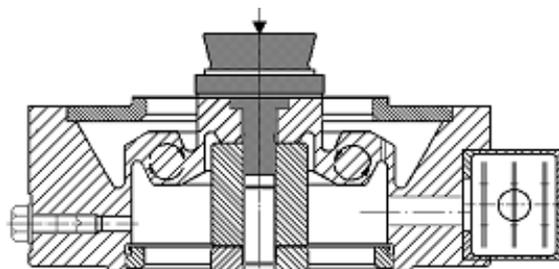


Figura 3 – Célula de carga de uma balança integradora de correia. Fonte: SCHENCK, 1998.

3.4 Gerador de Pulsos

Acoplado abaixo da ponte de pesagem existe uma roda de fricção posicionada por um braço móvel utilizado para aferição do deslocamento da correia e, conseqüentemente, a velocidade do material que está sendo transportado (figuras 4 e 5). A velocidade é determinada de acordo com o número de giros da roda, onde é gerado um pulso para cada giro dela. Através do número total destes pulsos, a velocidade da operação é determinada.

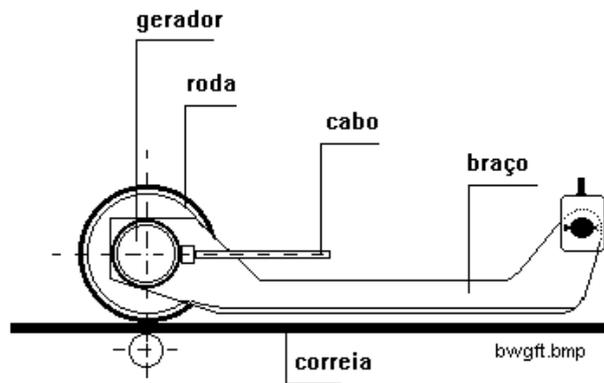


Figura 4 - Ilustração do gerador de pulsos de uma balança integradora de correia. Fonte: SCHENCK, 1998.



Figura 5 - Foto do gerador de pulsos de uma balança integradora de correia. Fonte: autor.

3.5 Segunda Lei de Ohm

George Simon Ohm (1787-1854) estabeleceu que a resistência elétrica de um condutor homogêneo de seção transversal constante, A , é diretamente proporcional ao seu comprimento, L , e inversamente proporcional à área de seção transversal e depende do material do qual ele é feito. A Figura 1 ilustra a Segunda Lei de Ohm em um condutor metálico.

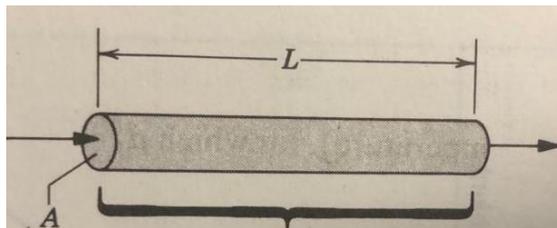


Figura 6 - Ilustração da segunda Lei de Ohm em um condutor metálico. Fonte: HALLIDAY, 2004.

A Segunda Lei de Ohm é representada algebricamente pela equação (1), sendo, ρ é a resistividade (depende do material do condutor e de sua temperatura); ℓ é a largura do condutor (em m) e A é a área da secção transversal (em m^2).

$$R = \frac{(\rho \times L)}{A} \quad (1)$$

3.6 Ponte de Wheatstone

Pontes são circuitos que possuem um estado de equilíbrio quando certas condições de seus elementos são atingidas. Usando componentes de valores conhecidos numa ponte, podemos determinar os valores de outros que sejam desconhecidos. Assim, usando pontes apropriadas, pode-se determinar o valor de resistências, capacitâncias e indutâncias (BRAGA, S, D). Na Figura 7, R_1 , R_2 , R_3 e R_4 representam as resistências à passagem da corrente elétrica no sistema

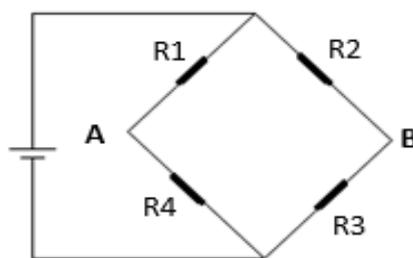


Figura 7 - Ponte de Wheatstone. Fonte: SCHENCK, 1998.

A configuração acima mostra uma ponte de Wheatstone e a condição de equilíbrio desta ponte se dá quando se tem o mesmo potencial nos pontos A e B. Para conseguir este equilíbrio, a condição definida pela equação 2 deve ser atendida.

$$R1 \times R3 = R2 \times R4 \quad (2)$$

Nesta condição, não há corrente circulando de A para B e nem de B para A, mas se o valor de uma destas resistências for modificado, a ponte será desequilibrada e, quanto maior for esta variação, maior será a corrente circulante. O uso de uma resistência variável desequilibra a ponte.

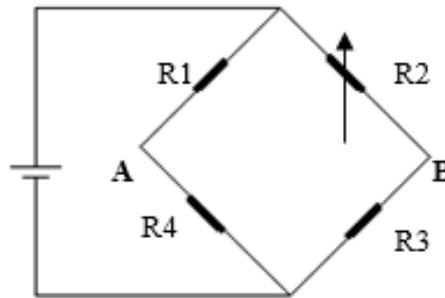


Figura 8 - Ponte de Wheatstone desequilibrada. Fonte: SCHENCK, 1998.

Quanto maior for a variação de R2, maior será a variação entre os produtos $R1 \times R3$ e $R2 \times R4$.

3.7 Strain Gauge

Os Strain Gauges fazem o papel da resistência em um circuito de balanças integradoras e nada mais é do que um condutor de bitola bem reduzida e que é confeccionado conforme configuração apresentada pela Figura 9.

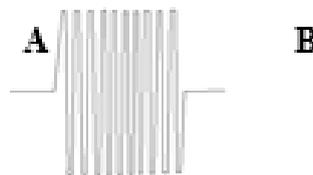


Figura 9 - Resistência em um circuito de balança integradora. Fonte: SCHENCK, 1998.

A Segunda Lei de Ohm estabelece que um certo trecho de condutor AB possui resistência diretamente proporcional ao seu comprimento e à resistividade, sendo inversamente proporcional

a sua área. Quando uma barra metálica é esticada, ela sofre um alongamento em seu comprimento e também uma diminuição do seu volume, resultando na diminuição da área da seção transversal desta barra. A resistência elétrica da barra metálica aumenta quando ela é esticada, também resultado da diminuição da área da seção transversal e do aumento do comprimento da barra. Da mesma maneira, quando a barra é comprimida, a resistência diminui devido ao aumento da área transversal e diminuição do comprimento. Os strain gauges são usados para promover alterações na resistência do dispositivo e, também, para medir variações de carga, pressão, torque, deslocamento, tensão, compressão, aceleração e vibração.

3.8 Correias Transportadoras

As correias transportadoras são utilizadas em diversas indústrias como forma de transporte e, também, em apoio à logística da empresa. No setor da mineração são muito importantes, devido ao seu uso trazer uma diminuição nos custos e nos tempos de operação, se comparado ao transporte da matéria-prima via caminhões ou outros meios. As correias são utilizadas para transporte de longa distância, e também dentro do mesmo empreendimento ligando áreas distintas da operação.

Em alguns casos, sem a utilização das correias, possivelmente alguns empreendimentos teriam seus custos de operação elevados ou, poderiam, até se tornar inviáveis quando a distância de transporte é muito longa. Elas se associam a diversos equipamentos e possuem algumas necessidades específicas, como a granulometria adequada do material e a largura da correia para determinado material transportado, inclinações adequadas para proteção do material, velocidade.

A figura 10 mostra a correia com o minério de calcário sendo transportado a uma distância suficiente para realizar o carregamento dos caminhões, ilustrando, também, um dos sistemas analisados neste projeto.



Figura 10 - Correia transportadora com balança integradora acoplada. Fonte: autor.

3.9 Pá Carregadeira

As pás carregadeiras são máquinas pesadas e executam um trabalho auxiliar de movimentação de carga nas mais diversas granulometrias, desde imediatamente após a detonação nas bancadas e empilhamento, até o enchimento das caçambas dos caminhões das pilhas pulmões para venda do produto. É requerido um padrão de confiabilidade na máquina e consequentes manutenções preventivas, para evitar eventuais paradas de produção, redução da produtividade e, também, proporcionar maior conforto para o seu operador.

É possível encontrar diversos tipos de pás carregadeiras com diversos portes e finalidades, que se movimentam sobre rodas ou sobre esteiras, cada uma definida de acordo com o tipo de serviço exigido, velocidade de deslocamento, capacidade de percorrer pequenas ou grandes distâncias e os tipos de solos onde vão ser operadas. A Figura 11 mostra a carregadeira sobre rodas no ambiente de trabalho da mina.



Figura 11 - Pá Carregadeira Caterpillar 950H. Fonte: autor.

3.10 Média Aritmética

A média aritmética de um conjunto de valores é o valor obtido somando-se todos e dividindo pelo número total de valores. Essa medida foi utilizada nos cálculos/análises estatísticas implementados neste trabalho. A média pode ser calculada pela equação (3):

$$\text{Média} = \frac{\sum x}{n} \quad (3)$$

Sendo: $\sum x$ o somatório de todos os valores de uma dada amostra; e n a quantidade total de valores de uma dada amostra.

A Figura 12 representa um apoio colocado na posição da média. Em tal posição, o histograma ficará em equilíbrio.

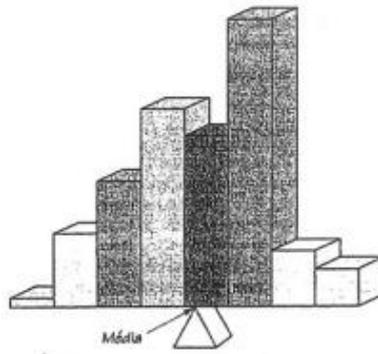


Figura 12 - A média como um ponto de equilíbrio. Fonte: TRIOLA, 2005.

3.11 Desvio-padrão

De modo geral, o desvio-padrão é a mais importante e mais útil medida de variação de um conjunto de dados. Geralmente, o cálculo do desvio-padrão é mais trabalhoso que a determinação da média se for realizado manualmente. O desvio-padrão é utilizado nos testes de hipóteses e na determinação dos intervalos de confiança, necessários ao embasamento das conclusões deste projeto. A Equação (4) foi utilizada para encontrar o desvio-padrão das produtividades definidas através dos dados amostrais:

$$s^2 = \frac{\sum (x - \mu)^2}{n - 1} \quad (4)$$

Sendo: \sum o somatório dos valores de uma dada amostra; x o valor amostral; μ a média dos dados da amostra e n a número total de dados.

3.12 Teste de Hipóteses: Comparando Duas Médias Amostrais

É uma inferência estatística usada para tomada de decisões através da aceitação ou rejeição de uma hipótese nula e utiliza os dados observados em um experimento (ou amostragem). Denomina-se hipótese nula a hipótese formulada com o intuito de ser testada, sendo denotada por H_0 e representada na Equação (5):

$$H_0: \mu_{pá} = \mu_{bal} \quad (5)$$

Sendo: $\mu_{pá}$ é a média real da produtividade da pá carregadeira e, μ_{bal} , a média real da produtividade da balança integradora de correia.

A hipótese alternativa, H_a , é a hipótese considerada caso as informações obtidas com a amostragem sugerirem a rejeição da hipótese nula e é representada na Equação (6):

$$H_a: \mu_{pá} \neq \mu_{bal} \quad (6)$$

3.12.1 Nível de confiança de um teste

O nível de confiança é especificado antes de se aplicar o teste. Usualmente seus valores são 95% ou 99%. Para encontrar os intervalos de confiança para a diferença entre as médias reais da produtividade dos dois métodos, as expressões 7 e 8, propostas por SNEDECOR e COCHRAN (1989), foram utilizadas:

$$\sigma^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} = \frac{\sigma_{pá}^2}{n_{pá}} + \frac{\sigma_{bal}^2}{n_{bal}} \quad (7)$$

Sendo: $\sigma^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}}$ o desvio-padrão populacional da diferença entre as duas médias amostrais da produtividade; σ_{bal}^2 o desvio-padrão populacional da produtividade relativo à balança integradora de correia; $\sigma_{pá}^2$ o desvio-padrão populacional da produtividade relativo à pá carregadeira; n_{bal} é o número total de amostras do carregamento por balança integradora de correia e, $n_{pá}$, o número total de amostras do carregamento por pá carregadeira. Para o intervalo de confiança, utilizou-se

$$\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal} \pm t' \times s^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} \quad (8)$$

Sendo: $\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}$ é a diferença das duas médias amostrais de produtividade; t' o *score* t-Student crítico para o nível de significância especificado e número de graus de liberdade calculado, e $s^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}}$ o desvio-padrão amostral da diferença entre as duas médias amostrais da produtividade.

3.12.2 Variável teste

Denomina-se variável teste a variável aleatória que é função das observações da amostra, utilizada para a tomada de decisão relativa à aceitação ou rejeição de H_0 . A Equação (9) mostra a fórmula algébrica para se definir a variável da estatística teste utilizada neste trabalho, t_0^* .

$$t_0^* = \frac{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}}{\sqrt{\frac{s_{pá}^2}{n_{pá}} + \frac{s_{bal}^2}{n_{bal}}}} \quad (9)$$

Sendo: $\bar{x}_{pá}$ é a média amostral da produtividade da pá carregadeira (neste trabalho, em t/h); \bar{x}_{bal} é a média amostral da produtividade da balança (em t/h); $s_{pá}^2$ é o desvio-padrão amostral da produtividade relativa à pá carregadeira; s_{bal}^2 o desvio-padrão amostral da produtividade relativa à balança integradora de correia; $n_{pá}$ o número total de amostras do carregamento por pá carregadeira e n_{bal} o número total de amostras do carregamento por balança integradora de correia.

3.12.3 Região de aceitação e região crítica

Ao se estabelecer o nível de significância, α , de um teste de hipóteses (ou para determinação do intervalo de confiança), o domínio da variável de teste é dividido em duas regiões. Uma dessas regiões é constituída de valores da variável teste que levam à aceitação de H_0 . Esta região é denominada região de aceitação. A outra região é constituída do conjunto de valores da variável de teste que levam à rejeição de H_0 , denominada região crítica. Os limites que separam a região de aceitação da região de rejeição são denominados valores críticos. Num teste unilateral existe apenas um valor crítico e, no caso de um teste bilateral, existem dois valores críticos simétricos em relação ao valor esperado da variável de teste.

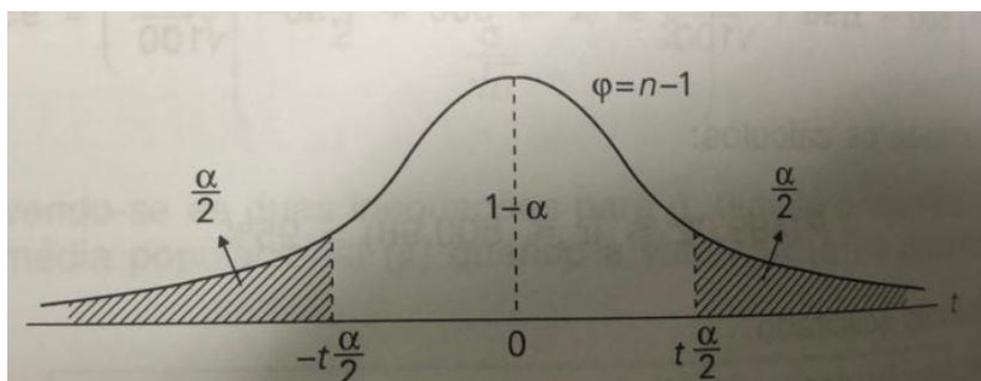


Figura 13 - Distribuição t-Student com região de aceitação (sem hachura) e rejeição (região hachurada) em teste bilateral para um nível de significância α . Fonte: FONSECA *et al.*, 2011.

3.12.4 Graus de liberdade

O número de graus de liberdade para a determinação do *escore* t-Student crítico no teste de hipóteses (e, também, definição dos intervalos de confiança) é calculado pela relação 10:

$$v = \frac{\left(\frac{s_{pá}^2}{n_{pá}} + \frac{s_{bal}^2}{n_{bal}}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_{pá}^2}{n_{pá}}\right)^2}{n_{pá} + 1} + \frac{\left(\frac{s_{bal}^2}{n_{bal}}\right)^2}{n_{bal} + 1}} - 2 \quad (10)$$

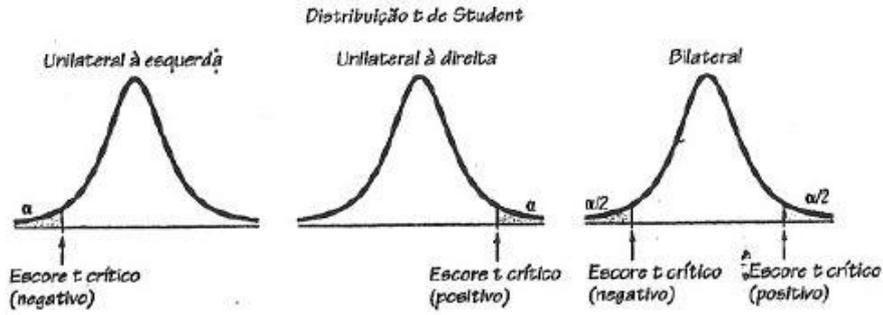
Sendo: v o número de graus de liberdade; $s_{pá}^2$ o desvio-padrão amostral da produtividade da pá carregadeira; $n_{pá}$ o número total de amostras do carregamento por pá carregadeira; s_{bal}^2 o desvio-padrão amostral da produtividade da balança integradora de correia e n_{bal} o número total de amostras do carregamento por balança integradora de correia.

3.12.5 Distribuição t-Student

A distribuição t-Student é uma das distribuições mais utilizadas na estatística, com aplicações para diversos testes estatísticos, entre eles os testes de hipóteses.

As condições atendidas para se utilizar a distribuição t de Student neste trabalho foram as seguintes: o desvio-padrão populacional, σ , é desconhecido e a população original tem distribuição essencialmente normal. Satisfazendo as condições relacionadas, os dados da tabela 1 foram utilizados para a determinação do *escore* t crítico utilizado nos testes de inferência estatística. A condição de normalidade dos dados amostrais foi garantida pelo Teorema Central do Limite (número de amostras coletadas maior ou igual a 30 ou $n_{amostras} \geq 30$).

Tabela 1 – *Escore t-Student crítico*. Fonte: TRIOLA, 2005.



Graus de liberdade		α					0,25 (unilateral) 0,50 (bilateral)
		0,005 (unilateral) 0,01 (bilateral)	0,01 (unilateral) 0,02 (bilateral)	0,025 (unilateral) 0,05 (bilateral)	0,05 (unilateral) 0,10 (bilateral)	0,10 (unilateral) 0,20 (bilateral)	
1		63,657	31,821	12,706	6,314	3,078	1,000
2		9,925	6,965	4,303	2,920	1,886	0,816
3		5,841	4,541	3,182	2,353	1,638	0,765
4		4,604	3,747	2,776	2,132	1,533	0,741
5		4,032	3,365	2,571	2,015	1,476	0,727
6		3,707	3,143	2,447	1,943	1,440	0,718
7		3,500	2,998	2,365	1,895	1,415	0,711
8		3,355	2,896	2,306	1,860	1,397	0,706
9		3,250	2,821	2,262	1,833	1,383	0,703
10		3,169	2,764	2,228	1,812	1,372	0,700
11		3,106	2,718	2,201	1,796	1,363	0,697
12		3,054	2,681	2,179	1,782	1,356	0,696
13		3,012	2,650	2,160	1,771	1,350	0,694
14		2,977	2,625	2,145	1,761	1,345	0,692
15		2,947	2,602	2,132	1,753	1,341	0,691
16		2,921	2,584	2,120	1,746	1,337	0,690
17		2,898	2,567	2,110	1,740	1,333	0,689
18		2,878	2,552	2,101	1,734	1,330	0,688
19		2,861	2,540	2,093	1,729	1,328	0,688
20		2,845	2,528	2,086	1,725	1,325	0,687
21		2,831	2,518	2,080	1,721	1,323	0,686
22		2,819	2,508	2,074	1,717	1,321	0,686
23		2,807	2,500	2,069	1,714	1,320	0,685
24		2,797	2,492	2,064	1,711	1,318	0,685
25		2,787	2,485	2,060	1,708	1,316	0,684
26		2,779	2,479	2,056	1,706	1,315	0,684
27		2,771	2,473	2,052	1,703	1,314	0,684
28		2,763	2,467	2,048	1,701	1,313	0,683
29		2,756	2,462	2,045	1,699	1,311	0,683
Grande (i)		2,575	2,327	1,960	1,645	1,282	0,675

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a análise deste trabalho (comparação entre as produtividades), foram colhidas medidas de tempos de carregamento em campo referentes aos dois sistemas utilizados nesta atividade. O primeiro foi o enchimento das caçambas dos caminhões feito através da balança integradora em uma correia de transporte de minério e, o segundo, através do carregamento por pás carregadeiras.

No primeiro sistema (figura 14), o próprio motorista do caminhão pode definir no display programador de controle da balança (mostrado na figura 1) a quantidade total de minério que é requerida, cujo valor pode variar de 30 a 40 toneladas, para o caso estudado, de acordo com a necessidade de compra ou capacidade de cada caminhão. Esse sistema de carregamento dispensa a utilização de mão-de-obra auxiliar para ser utilizado, além de o sistema estar disponível 24 horas por dia, respeitando suas devidas manutenções preventivas.



Figura 14 - Balança integradora de correia que realiza carregamento de um caminhão. Fonte: autor.

O segundo sistema utiliza o trabalho tradicional do operador de uma pá carregadeira fazendo

o trabalho de coleta da pilha de material e, em seguida, carregando a caçamba do caminhão.

A carregadeira de rodas utilizada para a coleta de dados neste projeto, foi a 950H, da marca Caterpillar, movida a diesel e com uma capacidade máxima da sua caçamba de 3,5m³. As caçambas dessa linha possuem elevados fatores de preenchimento dependendo da aplicação da máquina e do tipo de material trabalhado.

Neste trabalho, foram medidos os tempos de 30 carregamentos em cada método, sendo contado desde o posicionamento do caminhão para o início do carregamento até a sua saída.

Inferências estatísticas

As expressões 3 a 10 foram utilizadas para a realização dos testes de hipóteses e a determinação dos intervalos de confiança.

Primeiramente, as médias amostrais relativas às produtividades dos dois métodos de carregamento foram calculadas. Estes valores, substituídos adequadamente nas equações 7 a 10 permitiram realizar as inferências estatísticas.

Para iniciar os cálculos, foi necessário encontrar o número de graus de liberdade, v , utilizando a equação 10. Se o resultado de v não for um número inteiro, arredonda-se para o menor inteiro mais próximo. Com o valor do número de graus de liberdade, puderam-se determinar os valores *escore t-Student* críticos utilizando os dados da tabela 1.

Posteriormente, a equação 9 permitiu determinar o valor da estatística teste t_0^* que, por sua vez, foi utilizado para se concluir pela aceitação ou rejeição da hipótese nula.

Em seguida, os intervalos de confiança aos níveis de 95% e 99% foram determinados por meio das expressões 7 e 8.

5. ESTUDO DE CASO

5.1 Localização da Mina

Fundada em 15 de maio de 1985, no município de Pains – MG, na região do centro-oeste mineiro, a Gecal é uma empresa familiar que busca converter a sua matéria-prima, o calcário, em produtos de qualidade para o mercado brasileiro. A Figura 15 mostra a localização do município de Pains.

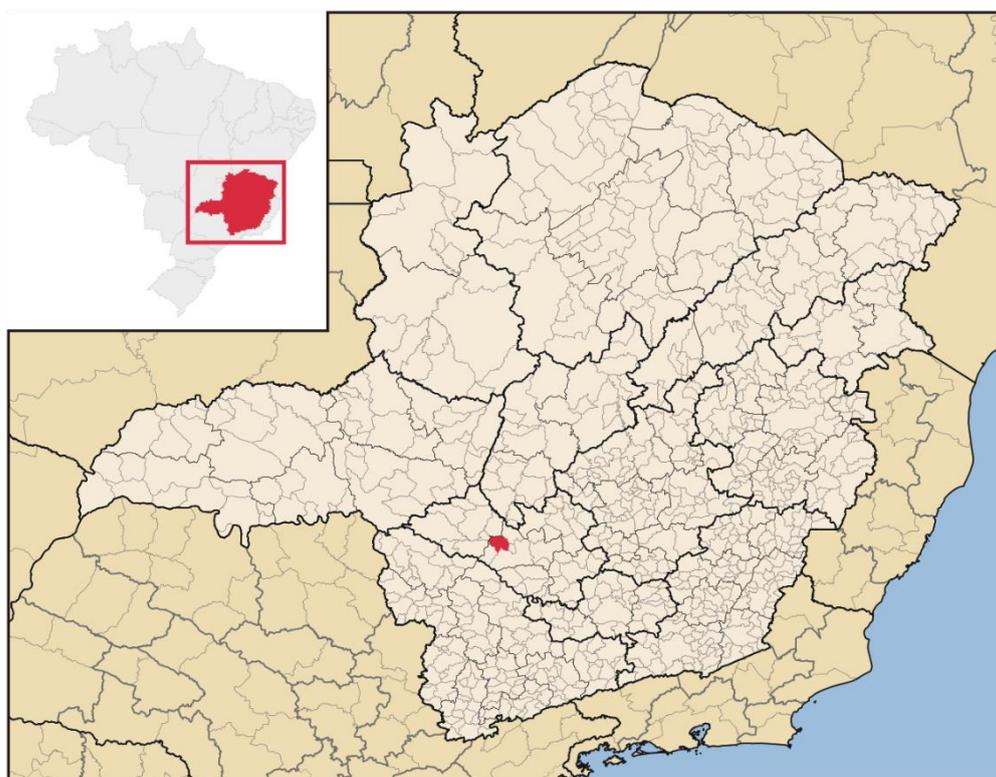


Figura 15 - Localização do município de Pains no estado de Minas Gerais. Fonte: WIKIPEDIA, 2019.

Para o setor industrial, a empresa produz a cal dolomítica, a cal calcítica e o calcário em pó. A cal é utilizada em diversos meios, desde o ambiental, como um elemento básico no tratamento de águas residuais, águas potáveis e para o abastecimento público de modo a neutralizar os ácidos, ajustar o pH entre outras funções, até o siderúrgico, como um elemento purificador do ferro e do aço, necessário para formar a escória, na remoção da sílica e outras impurezas, também necessária na parte de dessulfuração de ferro gusa e para redução dos teores de enxofre e fósforo.

Ainda, também é utilizada nos gases de combustão, produção de papel e celulose, na indústria do vidro para melhoria de resistência e transparência e, também, na indústria química para produção de soda cáustica entre outros elementos.

No agronegócio, é produzido a linha de calcário corretivo agrícola e a linha geox, que são produtos para a correção da acidez do solo, que é considerado como uma das práticas que mais contribui para o aumento da produtividade e rentabilidade agropecuária, é a etapa do preparo do solo para o cultivo agrícola.

Por fim, na linha da construção civil, os principais produtos são o calcário britado P3, P4 e a cal hidratada, sendo ingrediente principal para argamassas de assentamento, reboco e revestimento, sendo também usada para melhorar a funcionalidade e característica do solo para a construção de estradas, que contribui para o aumento da estabilidade, impermeabilidade e capacidade de suporte. A Figura 16 mostra uma vista aérea da região da mina.



Figura 16 - Localização via satélite da sede da Gecal. Fonte: GOOGLE MAPS, 2019.

5.2 Geologia Local

Afloram na área da Mina Gecal apenas rochas da Formação Sete Lagoas, representadas em suas porções mais elevadas por calcários e dolomitos que, devido a processos erosivos, formam pináculos e paredões. As partes baixas do relevo são preenchidas por coberturas de solo e argila, resultados da alteração do calcário. A figura 17 apresenta as bancadas de calcário da mina.



Figura 17 - Vista das bancadas de calcário da mina na sede da Gecal. Fonte: autor.

O calcário é uma rocha sedimentar originada de material precipitado por agentes químicos e orgânicos. O cálcio, quando constituinte dos calcários, tem origem nas rochas ígneas. Por meio das atividades de erosão e corrosão, incluindo a solução de ácidos carbônicos ou outros de origem mineral, as rochas são desintegradas e o cálcio em solução é conduzido para o mar por meio da drenagem das águas. Após atingir o oceano, parte do carbonato de cálcio dissolvido precipita-se, em decorrência da sua baixa solubilidade na água marinha. A evaporação e as variações de temperatura podem reduzir o teor de dióxido de carbono contido na água, causando a precipitação do carbonato de cálcio em consequência das condições de saturação. O carbonato de cálcio depositado, segundo esse procedimento, origina um calcário de alta pureza química. Também, por processo químico de deposição, formam-se calcários como travertino, turfa calcária, estalactites e estalagmites, muito comuns nas cavernas (LUZ *et al.*, 2005).

O calcário dolomítico, que é um produto com maior concentração de óxido e de cálcio de magnésio, era o material nobre da mina, com maior valor de venda. Com isso, por decisão dos gerentes e engenheiros, o calcário magnesiano, que poderia ser blendado com o dolomítico para aproveitamento, foi descartado, tornando-se, assim, o material estéril da mina. A substituição do cálcio pelo magnésio decorrente das águas com elevados teores de sais de magnésio são os

responsáveis pela formação dos calcários magnesianos e dolomíticos.

Além desses, a mina possuía o calcário silicoso, utilizado para corretivo agrícola caso tivesse alta porcentagem de magnésio e, também, o calcário calcítico, que era um projeto futuro da empresa, pois se encontrava abaixo da camada do calcário magnesiano que ainda não havia sido retirada por completo. As figuras 18 e 19 mostram, respectivamente, as pilhas de produção do calcário dolomítico em diversas granulometrias e a pilha de estéril do calcário magnesiano.



Figura 18 - Pilhas de produção de calcário dolomítico. Fonte: autor.



Figura 19 - Pilha de estéril do calcário magnesiano. Fonte: autor.

5.3 Perfil do Depósito da Mina

O solo da mina é argiloso e avermelhado pela decomposição do calcário *in situ*, com fragmentos de quartzo leitoso e chert. As camadas de calcário calcítico e dolomítico são intercaladas pela camada de calcário magnesiano.

O calcário calcítico silicoso tem as seguintes características: cinza escuro, granulação fina, nódulos e lentes de chert cinza escuro a preto, muito dobrado na superfície, compacto e coerente, óxido de ferro avermelhado nas juntas e entre camadas, óxido de manganês nas suturas argilocarbonosas, vênulas brancas de calcita:



O calcário magnesiano, cinza médio a cinza claro, sub-horizontal, granulação fina a microcristalina, muito coerente e compacto, maciço, alguns intervalos brechados recristalizados, com veios e vênulas de calcita branca, suturas com óxido de manganês e material argilocarbonoso:

MgO% de 2,0 à 15,0; $SiO_2 > 2,0$

Calcário dolomítico, cinza claro com passagens cinza médio, sub-horizontal, granulação fina a microcristalina com intervalos de granulação média a grossa, maciço, bastante compacto e coerente, poucas vênulas de calcita, um pouco de óxido de manganês entre camadas:

MgO% $> 15,0$; $SiO_2 < 2,0$

Calcário calcítico, cinza escuro, horizontal a sub-horizontal, granulação fina com intervalos de granulação média, bastante homogêneo, maciço, compacto, pouco a nenhuma matéria argilocarbonosa:

CaO% $> 52,0$; MgO% $< 2,0$; $SiO_2 < 2,0$.

5.4 Dados Coletados

A Tabela 2 representa os tempos obtidos pelo carregamento por pá carregadeira. Foram definidos uma contagem de 30 caminhões com suas devidas cargas requeridas e seu tempo de produtividade para esta operação. Em alguns casos, o caminhão retornou para adequação da carga, a medida de tempo reiniciou-se até a devida conclusão do seu ciclo de carregamento.

Tabela 2 – Capacidade dos caminhões, tempos de ciclo e produtividade no carregamento por Pá Carregadeira. Fonte: autor.

PÁ CARREGADEIRA				
Frota	Capacidade (t)	Tempo (min)	Tempo (h)	Produtividade (t/h)
Caminhão 1	30	4,42	0,074	407,24
Caminhão 2	30	4,97	0,083	362,17
Caminhão 3	30	9,17	0,153	196,29
Caminhão 4	32	5,83	0,097	329,33
Caminhão 5	32	14,25	0,238	134,74
Caminhão 6	32	6,5	0,108	295,38
Caminhão 7	32	10,42	0,174	184,26
Caminhão 8	32	6,75	0,113	284,44
Caminhão 9	32	7,5	0,125	256,00
Caminhão 10	32	15,58	0,260	123,23
Caminhão 11	32	6,83	0,114	281,11
Caminhão 12	32	8,65	0,144	221,97
Caminhão 13	32	9,5	0,158	202,11
Caminhão 14	32	11,38	0,190	168,72
Caminhão 15	36	5,25	0,088	411,43
Caminhão 16	36	6,12	0,102	352,94
Caminhão 17	36	5,22	0,087	413,79
Caminhão 18	36	7,8	0,130	276,92
Caminhão 19	36	9,5	0,158	227,37
Caminhão 20	36	18,73	0,312	115,32
Caminhão 21	36	7,22	0,120	299,17
Caminhão 22	36	6,25	0,104	345,60
Caminhão 23	36	6,83	0,114	316,25
Caminhão 24	36	8,5	0,142	254,12
Caminhão 25	36	10,67	0,178	202,44
Caminhão 26	40	9,53	0,159	251,84
Caminhão 27	40	7,17	0,120	334,73
Caminhão 28	40	18,33	0,306	130,93
Caminhão 29	40	6,42	0,107	373,83
Caminhão 30	40	7,53	0,126	318,73
Total da frota (t)	1038			
Tempo total (min)		262,82		
Tempo total (h)			4,38	
Tempo total produtividade (t/h)				8072,41

Em seguida, foram coletados os dados relativos aos tempos de carregamento pelo sistema caracterizado pela balança integradora de correia, os quais estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Capacidade dos caminhões, tempos de ciclo e produtividade no carregamento por Balança Integradora de Correia. Fonte: autor.

BALANÇA INTEGRADORA DE CORREIA				
Frota	Capacidade (t)	Tempo (min)	Tempo (h)	Produtividade (t/h)
Caminhão 1	30	7,67	0,128	234,68
Caminhão 2	30	7,7	0,128	233,77
Caminhão 3	30	7,35	0,123	244,90
Caminhão 4	30	7,68	0,128	234,38
Caminhão 5	30	7,69	0,128	234,07
Caminhão 6	32	8,09	0,135	237,33
Caminhão 7	32	8,05	0,134	238,51
Caminhão 8	32	8,07	0,135	237,92
Caminhão 9	32	8,11	0,135	236,74
Caminhão 10	32	8,09	0,135	237,33
Caminhão 11	32	8,05	0,134	238,51
Caminhão 12	32	8,02	0,134	239,40
Caminhão 13	32	8,04	0,134	238,81
Caminhão 14	32	8,02	0,134	239,40
Caminhão 15	35	8,84	0,147	237,56
Caminhão 16	36	9,03	0,151	239,20
Caminhão 17	36	9,06	0,151	238,41
Caminhão 18	36	9,07	0,151	238,15
Caminhão 19	36	9,07	0,151	238,15
Caminhão 20	36	9,05	0,151	238,67
Caminhão 21	36	9,04	0,151	238,94
Caminhão 22	36	9,05	0,151	238,67
Caminhão 23	36	9,02	0,150	239,47
Caminhão 24	36	9,02	0,150	239,47
Caminhão 25	38	9,5	0,158	240,00
Caminhão 26	38	9,52	0,159	239,50
Caminhão 27	40	10,05	0,168	238,81
Caminhão 28	40	10,07	0,168	238,33
Caminhão 29	40	10,07	0,168	238,33
Caminhão 30	40	10,06	0,168	238,57
Total da frota (t)	1033			
Tempo total (min)		260,15		
Tempo total (h)			4,34	
Tempo total produtividade (t/h)				7145,96

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização dos testes de hipóteses e determinação dos intervalos de confiança para a produtividade dos sistemas de carregamento analisados, as médias amostrais e os desvios-padrão foram calculados a partir da amostragem realizada por meio de medidas dos tempos de carregamento dos caminhões e quantidade (massa) carregada. Os resultados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Médias amostrais e desvios-padrão da produtividade para cada método de carregamento. Fonte: autor.

PÁ CARREGADEIRA	
Média capacidade caminhões (t)	34,60
Média Tempo para carregamento (h)	0,15
Média da produtividade (t/h)	269,08
Desvio Padrão da produtividade (σ)	88,22
BALANÇA INTEGRADORA DE CORREIA	
Média capacidade caminhões (t)	34,43
Média Tempo para carregamento (h)	0,14
Média da produtividade balança (t/h)	238,25
Desvio Padrão da produtividade (σ)	2,09

6.1 Testes de Hipóteses

As hipóteses em análise são as mesmas definidas pelas equações (4) e (5), as quais representam, respectivamente, as hipóteses nula e alternativa. A primeira hipótese ou hipótese nula (H_0), estabelece que as médias de produtividade verdadeiras são iguais. A hipótese alternativa, H_a , afirma o contrário, isto é, as médias verdadeiras de produtividade são diferentes.

$$H_0: \mu_{pá} = \mu_{bal}$$

$$H_a: \mu_{pá} \neq \mu_{bal}$$

O número de graus de liberdade foi calculado utilizando-se a equação 10:

$$v = \frac{\left(\frac{S_{pá}^2}{n_{pá}} + \frac{S_{bal}^2}{n_{bal}} \right)^2}{\frac{\left(\frac{S_{pá}^2}{n_{pá}} \right)^2}{n_{pá} + 1} + \frac{\left(\frac{S_{bal}^2}{n_{bal}} \right)^2}{n_{bal} + 1}} - 2$$

$$v = \frac{\left(\frac{88,22^2}{30} + \frac{2,09^2}{30} \right)^2}{\frac{\left(\frac{88,22^2}{30} \right)^2}{30 + 1} + \frac{\left(\frac{2,09^2}{30} \right)^2}{30 + 1}} - 2$$

$$v = \frac{67377,22}{2171,02} - 2$$

$$v = 29,03$$

Após o arredondamento, o número de graus de liberdade é $v = 29$.

Posteriormente, foi calculado o valor da estatística teste utilizando a equação (9):

$$t_0^* = \frac{\bar{X}_{pá} - \bar{X}_{bal}}{\sqrt{\frac{S_{pá}^2}{n_{pá}} + \frac{S_{bal}^2}{n_{bal}}}}$$

$$t_0^* = \frac{269,08 - 238,25}{\sqrt{\left(\frac{88,22^2}{30} + \frac{2,09^2}{30}\right)}}$$

$$t_0^* = \frac{30,83}{\sqrt{259,57}}$$

$$t_0^* = \frac{30,83}{16,11}$$

$$t_0^* = 1,91$$

Para um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), pode-se definir as regiões de aceitação e rejeição da hipótese nula. Admitindo-se $v = 29$ e $\alpha = 0,05$, o *escore t-Student* crítico é 2,045 (Tabela 1).

Como o resultado $t_0^* = 1,91$ encontra-se dentro da região de aceitação da hipótese nula, pode-se concluir que não há evidências suficientes para se rejeitar a hipótese nula sendo admitido um nível de confiança de 95%.

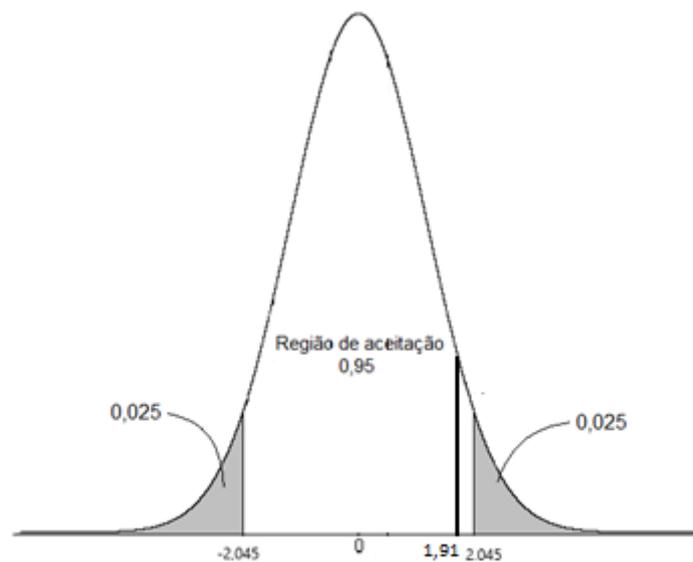


Figura 20 – Resultado da análise de t_0^* . Percebe-se 1,91 está localizado dentro da região de aceitação da hipótese nula ao nível de confiança de 95%. Fonte: autor.

Vale ressaltar que a diferença entre as médias verdadeiras de produtividade dos dois sistemas analisados não é necessariamente igual a zero, existindo outros valores possíveis para essa diferença.

6.2 Intervalos de confiança

O valor encontrado com o uso da expressão 8 foi utilizado para se definir o intervalo de confiança para a diferença entre as médias verdadeiras de produtividade dos dois métodos de carregamento a um nível de confiança de 95% (figura 21).

$$S^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} = \frac{S_{pá}^2}{n_{pá}} + \frac{S_{bal}^2}{n_{bal}}$$

$$S^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} = \sqrt{\frac{88,22^2}{30} + \frac{2,09^2}{30}}$$

$$S^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} = \sqrt{259,57}$$

$$S_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} = 16,11$$

E, finalmente,

$$\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal} \pm t'_{0,05;29} S^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}}$$

$$269,08 - 238,25 \pm 2,045 \times 16,11$$

$$30,83 \pm 32,94 \text{ t/h}$$

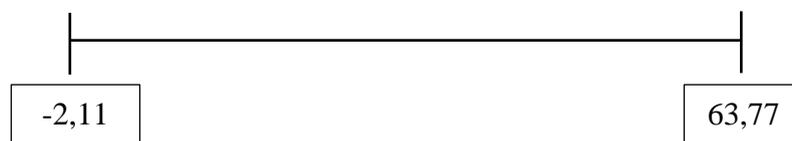


Figura 21 – Intervalo de confiança para a diferença entre as médias verdadeiras de produtividade ao nível de confiança de 95% (valores em t/h). Fonte: autor.

O nível de confiança de 99% também foi utilizado nos procedimentos de inferência estatística, ou seja, na realização dos testes de hipóteses e determinação dos intervalos de confiança.

Para este nível de confiança (99%) e admitindo-se o mesmo número de graus de liberdade (ν

= 29), o *escore t-Student* crítico, $t'_{0,05;29}$, foi obtido da tabela 1 da distribuição. O valor encontrado foi 2,756 define os limites negativos e positivos mostrados na figura 23 que, por sua vez, estabelecem as regiões de aceitação e rejeição da hipótese nula H_0 . Novamente, como $t_0^* = 1,91$ está dentro da região de aceitação, a hipótese nula não pode ser rejeitada.

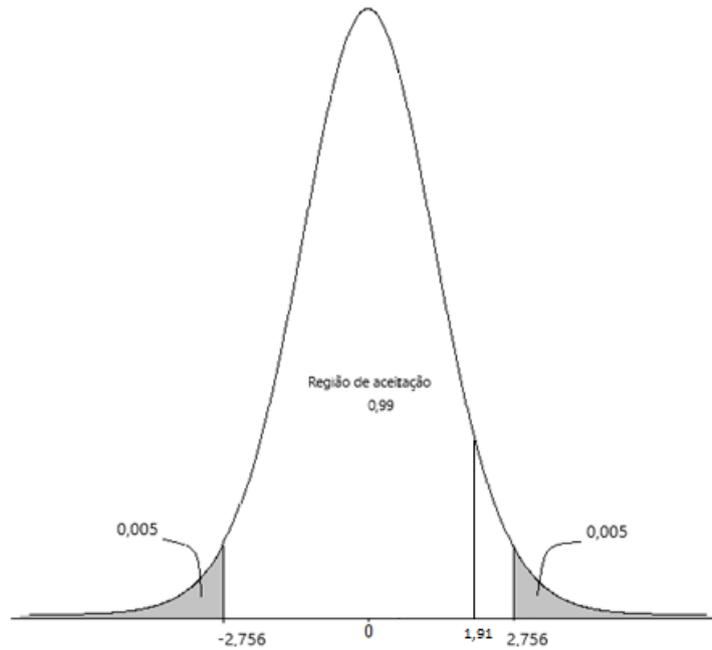


Figura 22 - Resultado da análise de T_0^* . Percebe-se que 1,91 está localizado dentro da região de aceitação da hipótese nula ao nível de confiança de 99%. Fonte: autor.

O intervalo de confiança também foi determinado para este nível de significância ($\alpha = 0,01$) utilizando-se as expressões 7 e 8.

$$S^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} = \frac{S_{pá}^2}{n_{pá}} + \frac{S_{bal}^2}{n_{bal}}$$

$$S^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} = \sqrt{\frac{88,22^2}{30} + \frac{2,09^2}{30}}$$

$$S^2_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} = \sqrt{259,57}$$

$$S_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}} = 16,11$$

$$\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal} \pm t'_{0,005;29} S_{\bar{x}_{pá} - \bar{x}_{bal}}$$

$$269,08 - 238,25 \pm 2,756 \times 16,11$$

Por fim, o intervalo de confiança é $30,83 \pm 44,40$ t/h, ilustrado pela figura 22.

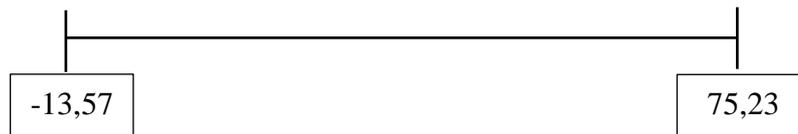


Figura 23 – Intervalo de confiança para a diferença entre as médias verdadeiras de produtividade dos dois sistemas analisados ao nível de 99%. Fonte: autor.

Analisando os resultados das expressões dos intervalos de confiança para a diferença entre as médias verdadeiras de produtividade, de ambos os níveis, para os dois métodos de carregamento, que poderemos obter valores reais, com o zero presente dentro desse intervalo, mas não necessariamente será igual a zero.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostra um estudo comparativo sobre a média das produtividades verdadeiras de dois sistemas de carregamento de caminhões em uma mina de calcário: carregamentos por pá carregadeira e balança integradora de correia.

Para a realização das inferências estatísticas utilizadas neste trabalho, foi necessária a coleta de dados relativos à carga (em t) e aos tempos de carregamento dos caminhões (em min). Com estes dados, a produtividade amostral relativa aos dois sistemas utilizados foi determinada juntamente com a média e os desvios-padrão desta medida populacional.

Testes de hipóteses foram realizados além da determinação dos intervalos de confiança para dois níveis de significância: 1% e 5%, correspondentes aos níveis de confiança de 99% e 95%, respectivamente. A hipótese nula, que estabelecia a igualdade entre as produtividades verdadeiras dos métodos de carregamento analisados, não foi rejeitada em ambos os níveis de confiança utilizados. Apesar do resultado encontrado, não é possível afirmar que a diferença entre as médias verdadeiras de produtividade dos dois métodos seja necessariamente igual a zero em ambos os níveis de significância estatística, existindo outros valores possíveis para essa diferença.

Vale ressaltar que a metodologia proposta pode ser utilizada em outras aplicações reais que exijam comparação entre parâmetros populacionais de sistemas utilizados na execução de alguma operação de empresas de mineração, além de possuir caráter didático-pedagógico, servindo de apoio aos alunos do curso de Engenharia de Minas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As expressões utilizadas neste trabalho para a realização dos testes de hipóteses e determinação dos intervalos de confiança, consideram que os desvios-padrão populacionais, relativos aos dois sistemas de carregamento dos caminhões, são diferentes. Assim, propõe-se para trabalhos futuros, análises relacionadas à significância estatística desta suposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, N. C. **Ponte de Wheatstone**. Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/instrumentacao/108-artigos-diversos/875-ponte-de-wheatstone-ins013>>, acesso em 12/07/2019

FONSECA, J. S. e MARTINS, G. A. **Curso de Estatística**. 6ª ed., Editora Atlas, São Paulo, 2011, 320p.

GEAL. **História de fundação e produtos da empresa**. Disponível em <<https://www.gecal.com.br/>>

GOOGLE MAPS. **Visão Aérea da sede da Gecal**. Disponível em <<https://www.google.com/maps/place/Gecal/@-20.381081,-45.611739,1906m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x9f0519afde203824!8m2!3d-20.381081!4d-45.611739?hl=pt-BR>> Acesso em 20/11/2019

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, D. S. **Física 3**. Vol. 2, 5ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, 2004, 384 p.

LUZ, B. A.; LINS F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais – usos e especificações**. 2ª ed., CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2005, 990p.

MANUAL SCHENCK. **Intecont Plus**. São Paulo, 1998.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, 2009, 464p.

REVISTA MINÉRIOS & MINERALES. N° 401, Editora M3, São Paulo, 2019, 36p.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical Methods**. 8th ed., Iowa State University Press, Ames, 1989.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 9ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, 2005, 836p.

WIKIPEDIA. **Localização do Município de Pains**. Disponível em <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Pains>> Acesso em 20/11/2019.