



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS



MAXSUELL MENDES GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE ABRASÔMETRO ASTM G65
PARA SIMULAÇÃO DE DESGASTE ABRASIVO NA
SUPERFÍCIE DE ROLETES DE CARGA

OURO PRETO - MG
2017

MAXSUELL MENDES GONÇALVES

maxsuellmg@gmail.com

**DESENVOLVIMENTO DE ABRASÔMETRO ASTM G65
PARA SIMULAÇÃO DE DESGASTE ABRASIVO NA
SUPERFÍCIE DE ROLETES DE CARGA**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Ouro Preto como
requisito para a obtenção do título de
Engenheiro Mecânico

Professor orientador: Prof^ª. DSc. Zirlene Alves Da Silva Santos

**OURO PRETO – MG
2017**

G635d Gonçalves, Maxsuell Mendes.
Desenvolvimento de abrasômetro ASTM G65 para simulação de desgaste abrasivo na superfície de roletes de carga [manuscrito] / Maxsuell Mendes Gonçalves. - 2017.

67f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Zirlene Alves da Silva Santos.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Desgaste mecanico. 2. Esteira rolante - Roletes de carga. 3. Equipamento e acessórios - Abrasômetro. 4. Abrasivos. I. Alves da Silva Santos, Zirlene. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

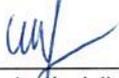
ATA DA DEFESA

Aos 04 dias do mês de Abril de 2017, às 16h, no Auditório FG, localizado na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno **Maxsuell Mendes Gonçalves**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof^ª. DSc. Zirlene A.S. Santos; Prof. DSc. Washington Luís Vieira da Silva, e Prof. DSc. Luis Antônio Bortolaia. O candidato (a) apresentou o trabalho intitulado: “**DESENVOLVIMENTO DE ABRASÔMETRO ASTM G65 PARA SIMULAÇÃO DE DESGATE ABRASIVO NA SUPERFÍCIE DE ROLETES DE CARGA**”, sob orientação do Prof^ª. DSc. Zirlene Alves da Silva Santos. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo, os presentes consideram o(a) aluno(a) aprovado com a nota/conceito 9,2.

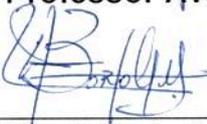
Ouro Preto, 04 de Abril de 2017.



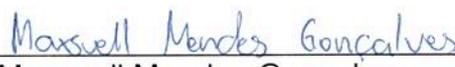
DSc. Zirlene A.S. Santos
Professora Orientadora



DSc. Washington Luís Vieira da Silva
Professor Avaliador



Prof. DSc. Luis Antônio Bortolaia
Professor Avaliador



Maxsuell Mendes Gonçalves
Aluno(a)

AGRADECIMENTO

À Professora Margarida Márcia Fernandes, do Departamento de Engenharia de Controle e Automação – UFOP, pelo fornecimento do equipamento de ensaio de dureza vickers para a realização deste trabalho.

Ao técnico Marconi Cosme Silva do Departamento de engenharia de controle e automação (DECAT-UFOP) pelo auxílio e análises prestados.

A fundação Gorceix pela ajuda na construção do equipamento.

A minha Orientadora Zirlene Alves Da Silva Santos, pelo incentivo, pela oportunidade, dedicação e paciência que teve comigo. Contribuindo não só para meu crescimento acadêmico, mas também profissional e pessoal.

A professora Maria Aparecida e o Técnico Denilson do DEMET pelo espaço cedido no laboratório de fundição para a realização dos ensaios

Aos meus familiares Terezinha, José, Allan, Whinter e Ingrid. Pessoas que desde meu primeiro minuto de vida me desejam o melhor e continuam a sempre me orgulhar de fazer parte dessa família.

Aos meus colegas de curso, de infância e durante este percurso estiveram comigo todos esses anos, passando pelos mesmos desafios e superando cada um deles.

*“Nulla tenaci in via est via” (Aos
persistentes nenhum caminho é impossível)*

Spyker Cars N.V.

RESUMO

GONÇALVES, Maxsuell Mendes. Tribologia: Sistema de Análise de Desgaste Abrasivo. 2017. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Ouro Preto.

O presente trabalho contempla o desenvolvimento do Abrasômetro e análise da contribuição para simular o desgaste abrasivo na superfície dos roletes de carga. O desgaste abrasivo é o principal responsável por quebras de equipamentos e paradas para manutenção ou reposição de peças, pois causa a perda progressiva de material das partes móveis em contato e movimento relativo. Para o estudo do desgaste abrasivo foi desenvolvido um Abrasômetro com os parâmetros da norma ASTM G65. Para simular o desgaste abrasivo na superfície do rolete de carga, foi utilizada metodologia de pesquisa exploratória e descritiva bem como procedimentos técnicos de cunho bibliográfico e experimental. Para confecção do Abrasômetro foi feita uma estrutura em aço SAE 1020 e as partes da máquina unidas mediante a solda e arrebites. Os procedimentos de ensaio se resumem em três etapas começando pela preparação das amostras, realização do ensaio bem como o cálculo do volume de desgaste. Com o resultado das análises foi constatado que o desgaste predominante é o abrasivo por 3 corpos. Esse promove a perda gradual de material da superfície dos roletes de carga, podendo inutilizá-los antes do término da sua vida útil, forçando uma parada não programada e comprometendo a produção de minério. Foi possível constatar também que o revestimento que é utilizado na superfície dos roletes diminui consideravelmente o desgaste, pois causa uma diminuição da rugosidade superficial. A máquina demonstrou boa confiabilidade no ensaio, uma vez que mostrou um baixo coeficiente de variação do volume de material arrancado em amostras de mesmo perfil superficial, sendo possível validar o ensaio. A máquina Abrasômetro ASTM G65 contribuiu para entender o fenômeno de desgaste abrasivo a três corpos, e em diferentes perfis superficiais. Assim, é possível realizar novos estudos com intuito de minimizar o desgaste abrasivo para que a vida útil e disponibilidade física dos componentes mecânicos seja maior.

Palavras-chave: desgaste, abrasivo, rolete de carga, abrasômetro.

ABSTRACT

This paperwork contemplates the development of the Abrasometer and contribution analysis to simulate the abrasive wear on the surface of the pipe rollers. Abrasive wear is primarily responsible for equipment breaks and stops for maintenance or replacement of parts as it causes the progressive loss of material from moving parts in contact and relative movement. For the abrasive wear study, an Abrasometer with the parameters of ASTM G65 was developed. To simulate abrasive wear on the surface of the pipe rollers. Exploratory and descriptive research methodology as well as bibliographic and experimental technical procedures were used. For the confection of the Abrasometer, a SAE 1020 steel structure was made and the machine parts joined by means of the weld and rivets. The test procedures are summarized in three steps beginning with sample preparation, performing the test as well as calculating the wear volume. As a result of the analyzes it was verified that the predominant wear is the abrasive by 3 bodies. This promotes the gradual loss of material from the surface of the pipe rollers, which can render them unusable before the end of their useful life, forcing an unscheduled stop and compromising ore production. It has also been found that the coating that is used on the surface of the pipe rollers considerably reduces wear since it causes a decrease in surface roughness. The machine demonstrated good reliability in the test. Since it showed a low coefficient of variation of the volume of material stripped in samples of the same surface profile, it is possible to validate the test. The ASTM G65 Abrasive Machine contributed to understand the phenomenon of abrasive wear to three bodies, and in different surface profiles. Thus, it is possible to perform new studies in order to minimize the abrasive wear so that the useful life and physical availability of the mechanical components is greater.

Key-words: wear. abrasive. pipe roller. abrasometer

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Percentual de ocorrência de diferentes tipos de desgaste	2
Figura 2 (A) Coeficiente de atrito (B): Superfície de cabeça metálica polida e aparentemente lisa a olho nu (C): à microscopia, irregularidades ou asperezas em sua superfície (D): perfil mensurado (em Ra- rugosidade média)	8
Figura 3: Componentes do sistema tribológico	10
Figura 4: subdivisões de desgaste.....	12
Figura 5: Desenho esquemático dos tipos de desgaste abrasivos.....	13
Figura 6: Imagens de microscopia eletrônica de varredura mostrando os diferentes aspectos de um material que sofreu desgaste abrasivo (a) por deslizamento a dois corpos ou três corpos e (b) por rolamento a três corpos.....	14
Figura 7: Mecanismos de desgaste	15
Figura 8: Ilustração do desgaste em baixas tensões	16
Figura 9: Ilustração do desgaste em altas tensões	17
Figura 10: Partícula idealizada deslizando sobre a superfície de um material dúctil.....	17
Figura 11: Abrasômetro do tipo roda de borracha.....	19
Figura 12: Dimensões da roda de borracha	20
Figura 13: Dimensões do bico dosador	21
Figura 14: Marcas de desgaste uniforme (a) e não uniforme (b), respectivamente.....	22
Figura 15: Ilustração dos elementos de um transportador de correias	24
Figura 16: Correia Lisa.....	26
Figura 17: Tambores de acionamento revestido.....	27
Figura 18: Roletes de impacto	28
Figura 19: Sistema de freios de uma correia transportadora	30
Figura 20: Roletes de carga em correia transportadora	31
Figura 21: Tópicos abordados no capítulo 3	33
Figura 22: Fluxograma de métodos utilizados na pesquisa.....	36

Figura 23: Projeto base proposto pela norma ASTM G65	39
Figura 24: Estrutura em aço do Abrasômetro.....	40
Figura 25: Sistema de acionamento motor polia	41
Figura 26: Máquina de desgaste abrasivo	42
Figura 27: Configuração dos roletes de carga dentro do sistema do transportador de correias.....	43
Figura 28: Rolete de carga doado pela empresa Samarco	44
Figura 29: Corpos de prova preparados para ensaio	45
Figura 30: Leitura da rugosidade superficial com rugosímetro.....	46
Figura 31: Amostra sem revestimento (esq) amostra com revestimento (dir)	47
Figura 32: Indicador comparativo de volume perdido das amostras ensaiadas	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos desgastes	11
Tabela 2: Parâmetros do equipamento de ensaio	20
Tabela 3: Variáveis e Indicadores	37
Tabela 4: Dados amostrais da amostra 1	48
Tabela 5: Dados amostrais amostra 2.....	48
Tabela 6: Dados amostrais da amostra 3 com revestimento	49
Tabela 7: Dados amostrais da amostra 4 com revestimento	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Tribologia	7
2.1.1	Fenômenos tribológicos.....	8
2.2	Desgaste Abrasivo	13
2.3	Equação De Archard para o desgaste abrasivo.....	17
2.3	Abrasômetro roda de borracha	18
2.4	Transportadores de correia	23
2.5	Roleta de carga	30
2.5.1	Ciclos de vida	31
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	Tipos de pesquisa.....	33
3.2	Materiais e métodos.....	35
3.3	Variáveis e indicadores.....	37
3.4	Instrumento de coleta de dados	38
3.5	Tabulação e análise de dados.....	38
3.6	Considerações finais	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	52
5.1	Conclusões.....	52
5.2	Recomendações	53
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

O Brasil é um dos principais países produtores de minérios. A geografia brasileira com sua vasta diversidade de terrenos e formações geológicas, ao longo de seus oito milhões e meio de quilômetros quadrados, proporciona-lhe uma alta diversidade de minérios, totalizando uma produção de setenta e duas substâncias minerais, sendo que vinte e três são metálicas, quarenta e cinco não metálicas e quatro são energéticas (PINHEIRO, 2011).

Um dos principais elementos de competitividade da indústria de mineração é a eficiência operacional. Para tanto, a disponibilidade física do equipamento é essencial para o apoio a estratégia. Uma forma de garantir a disponibilidade física é por meio de eficientes sistemas de gestão de manutenção (IBRAM, 2015).

A Caterpillar Global Mining (2008) ressalta que o principal produto para a manutenção de qualquer empresa mineradora são as horas disponíveis que o setor de operações pode utilizar para alcançar suas metas de produção, isto é, o desempenho neste setor é mensurado em termos de disponibilidade.

De acordo com Kardec e Nascif (2009), a manutenção pode ser compreendida como a garantia da disponibilidade das funções dos equipamentos e das instalações que possibilitem o atendimento de um processo de produção e, por conseguinte, de preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custo adequados.

Ademais, o termo manutenção reporta à ideia de um conjunto de técnicas, ações e recursos aplicados durante o ciclo de vida de um sistema ou produto, a fim de restaurá-lo e mantê-lo nos parâmetros funcionais de fábrica, de modo que sustente seu efetivo desempenho e, assim, garanta qualidade, disponibilidade, confiabilidade e cumprimento de prazos e de custos das atividades produtivas (SILVA, 2015).

Ainda segundo Silva (2015), a função manutenção deve ser encarada de forma estratégica, uma vez que dá suporte ao setor de produção, mantendo a continuidade dos processos e retardando a deteriorização dos recursos produtivos. Diante disso, uma manutenção eficiente contribui para o aumento da disponibilidade dos equipamentos, maior produtividade, nível de serviço entregue ao cliente mais satisfatório, resultando em um melhor posicionamento competitivo diante do mercado.

Preocupações quanto aos custos diretos e indiretos é outro problema que aflige técnicos e engenheiros nas indústrias de mineração. As áreas de manutenção das indústrias

relacionadas vêm combatendo o desgaste, visando aumentar o tempo médio entre falhas, reduzir as paradas não programadas e otimizar a troca de componentes. O objetivo é reduzir os custos diretos de regeneração e reposição de componentes e custos indiretos de parada de produção, manutenção e estoque (SUZUKI, 2013).

Ainda segundo Suzuki (2013) em setores minero metalúrgicos onde o desgaste causa a parada ou a diminuição da produção, ou envolve elevados custos de manutenção, não é suficiente adquirir conhecimentos apenas em materiais e processos metalúrgicos e/ou mecânicos de fabricação.

A necessidade de envolvimento com problemas tribológicos de atrito e desgaste, neste caso, é perfeitamente justificável pois esses fenômenos afetam quase todos os aspectos de funcionamento das máquinas.

Dentre os diversos tipos de desgaste, o desgaste abrasivo é o principal responsável por quebras de equipamentos, paradas não programadas e reposição de peças, pois causa a perda progressiva de material das partes móveis em contato e movimento relativo. Além do desgaste abrasivo, outros mecanismos como o desgaste erosivo, por deslizamento e por fadiga também são frequentemente observados (DALLMANN, 2012).

Segundo Eyre (1991), o desgaste abrasivo é responsável por 50% das causas de falhas das máquinas ou componentes. De todos os diferentes tipos de desgaste é possível notar na figura 1 que o desgaste abrasivo é o que ocorre em mais de 50% dos casos, sendo considerado como o mais severo e o mais comumente encontrado na indústria.

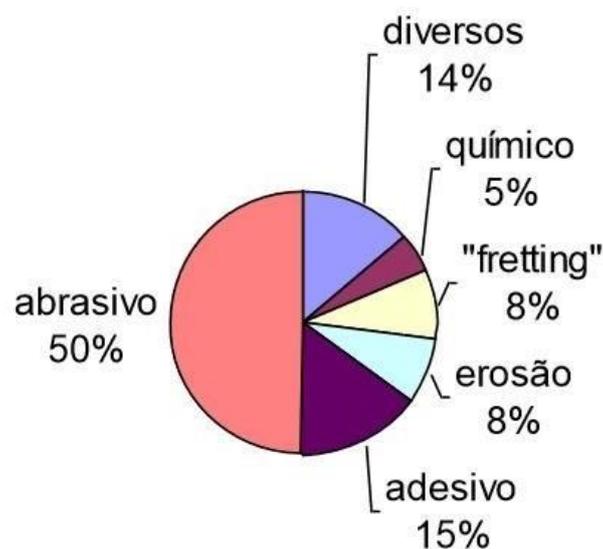


Figura 1: Percentual de ocorrência de diferentes tipos de desgaste
Fonte: 58º Congresso anual (ABM, Rio De Janeiro 2003)

Normann (1948) afirma que devido à complexidade dos fenômenos de desgaste, ainda não existe um dispositivo universal para os estudos do mesmo. Diante de tal situação vários dispositivos de ensaio foram criados para reproduzir configurações particulares de desgaste. No geral, os resultados obtidos em ensaios apresentam caráter estimativo da resistência ao desgaste dos diversos materiais.

Este tipo de estudo é normalmente feito através de ensaios em equipamentos que simulam as condições tribológicas existentes no funcionamento do sistema na aplicação real. Desta forma, os equipamentos que se destinam à simulação de sistemas tribológicos devem ser específicos para o tipo ou o mecanismo de desgaste que se pretende estudar (YAMAGUCHI,1990).

Como consequência, os resultados de estudos comparativos são estritamente válidos para as condições de laboratório, estando qualquer extrapolação para as condições práticas sujeitas a restrições (FANG, 1993).

Com intuito de estudar o maior causador de desgaste de equipamentos mecânicos que é a abrasão, foram desenvolvidas máquinas de ensaio de desgaste abrasivo com métodos capazes de realizar com boa reprodutibilidade resultados satisfatórios. Os equipamentos mais utilizados recentemente são: Abrasômetro do tipo roda de borracha, máquina de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa e máquina de ensaio abrasivo pino sobre disco.

O abrasômetro tipo roda-de-borracha é um dos dispositivos mais antigos para avaliação de desgaste abrasivo em laboratório. Ele foi responsável pela maioria dos dados de desgaste disponíveis na literatura até a década de 70 (BORIK 1972).

Este equipamento foi apresentado pela primeira vez por Haworth em 1948 e consiste em uma roda-de-borracha que gira em contato com a superfície do corpo-de-prova, com abrasivo na interface. Este equipamento permite realizar ensaios a seco ou a úmido, com alta confiabilidade de resultados, sendo empregado tradicionalmente na indústria de mineração. Usa-se para classificar materiais quanto a sua resistência ao desgaste. Este método reproduz o ensaio de desgaste abrasivo de 3 corpos, situação em que as máquinas ficam submetidas nas atividades agrícolas, de transporte e de mineração (VILLABÓN e SINATORA, 2006).

Mais tarde o abrasômetro roda de borracha foi padronizado pela norma internacional ASTM (*American Society for Testing and Materials*). A ASTM desenvolve e publica normas técnicas para uma ampla gama de materiais, produtos, sistemas e serviços. ASTM, fundada em 1898, precede outras organizações, tais como BSI (1901), DIN (1917) e AFNOR (1926),

porém, diferentemente destas, não é um organismo nacional de normalização, papel exercido pela ANSI nos EUA. A ASTM dá suporte a milhares de comitês técnicos voluntários, cujos membros de todo o mundo, coletivamente, desenvolvem e mantêm mais de 12000 normas, sendo que a norma que define os parâmetros de ensaios do abrasômetro roda de borracha é chamada de ASTM G65. A sigla G é do comitê técnico para assuntos correlacionados a Corrosão, deterioração e degradação de materiais (ASTM, 2015).

O ensaio de abrasão do tipo roda de borracha pela norma ASTM G65 realiza uma simulação de desgaste abrasivo a 3 corpos a baixa tensão, caso que ocorre com mais frequência na indústria minero metalúrgica e objeto da presente pesquisa.

Com base no contexto apresentado a questão problema que permeia o estudo é:

Como o desenvolvimento do Abrasômetro ASTM G65 contribui na simulação de desgaste abrasivo na superfície dos roletes de carga de transportadores de correia utilizados nas operações de indústrias minero metalúrgicas?

1.2 Justificativa

Uma das maiores preocupações na indústria minero metalúrgica é o desgaste de equipamentos, pois as maiores causas de paradas inesperadas e consequente perda de produtividade provêm de falhas do maquinário ou parte dele.

Dentre os diversos tipos de desgaste, o desgaste abrasivo é o principal responsável por quebras de equipamentos e paradas para manutenção ou reposição de peças, pois causa a perda progressiva de material das partes móveis em contato e movimento relativo (EYRE,1991).

Analisando este problema recorrente no setor minero metalúrgico, este trabalho contribui para analisar o desgaste por abrasão que os componentes de máquinas e equipamentos são submetidos. O que é um dos principais fatores de depreciação de capital e uma importante fonte de despesas com manutenção. Tão importante quanto isso, é pesquisar, estudar e entender os processos de desgaste que atuam em condições específicas.

Segundo Gregolin (1990) o desgaste por abrasão influi nos custos diretos de produção devido as necessidades de reposição ou recuperação de peças desgastadas, e também nos custos indiretos de produção pela necessidade de superdimensionamento de componentes e pelas limitações na produção devido a equipamentos deteriorados.

A literatura sobre desgaste na tribologia, é bastante extensa por ser um tema de grande necessidade de conhecimento. Porém, no Brasil, a discussão acadêmica e industrial, sobre o tema desgaste de materiais de engenharia ainda é incipiente.

A pesquisa contribuirá para aumentar o acervo bibliográfico sobre o tema, colaborando no plano de ações para solução de depreciação de capital bem como a redução das paradas não programadas e controle da troca de componentes. A partir deste trabalho será possível estudar novos componentes que possa suportar condições de operações na indústria minero metalúrgica em ambiente severo de desgaste, aumentando a sua vida útil.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver abrasômetro ASTM G65 para simular o desgaste abrasivo na superfície dos roletes de transportadores de correia utilizados na indústria minero metalúrgica.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica acerca dos temas: tribologia – conceitos e definições, tipos de desgaste e desgaste abrasivo;
- Desenvolver equipamento Abrasômetro ASTM G65;
- Identificar e classificar o tipo de rolete utilizado nos transportadores de correia no que tange ao material da superfície, dureza e condições de campo para teste do equipamento Abrasômetro;
- Demonstrar as vantagens do Abrasômetro ASTM G65 para simular o desgaste abrasivo a 3 corpos, nas operações dos transportadores de correia especificamente na superfície dos roletes de carga;

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos e será escrito de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, - ABNT e do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal De Ouro Preto – UFOP conforme a seguinte estrutura:

No primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para realização do trabalho e os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito da tribologia e a norma ASTM (American Society for Testing and Materials).

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada para elaborar a pesquisa bem como as propostas para realiza-la.

O quarto capítulo trata das discussões sobre a máquina, sua construção e validação bem como os resultados obtidos.

O quinto e último capítulo trata das conclusões que se chegou sobre o tema assim como sugestões e recomendações para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica do tema abordado se baseia nos desgastes explicando as interações na área da tribologia e a conceituação dos desgastes abrasivos.

As condições ambientes em que os roletes de carga trabalham e o desgaste abrasivo que o rolete sofre em sua superfície serão evidenciados, com intuito de que a partir deste trabalho seja possível estudar novos componentes que possam suportar as condições de operações na indústria minero metalúrgica.

2.1 Tribologia

Segundo Stoaterau (2004) a palavra tribologia é derivada das palavras grega TRIBOS que significa atrito, e LOGOS que significa estudo, de forma que uma tradução literal significa 'Estudo do Atrito', ou a ciência que estuda o Atrito. Tribologia é definida como “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas”.

Stoaterau (2004) ainda afirma que a palavra tribologia, em sua atual conotação, surgiu pela primeira vez na Inglaterra, em 1966, em um relatório do Departamento de Educação e Ciência. Embora a palavra seja nova, o assunto a que se refere não o é, incluindo os tópicos relativos ao atrito, desgaste e lubrificação

Após a renascença, Leonardo Da Vinci (1452 – 1519), que pode ser considerado o pai da tribologia moderna, deu importantes contribuições para o entendimento dos fenômenos de atrito e desgaste. Como em outros campos do conhecimento, Da Vinci antecipou em séculos algumas descobertas que não foram aproveitadas por seus contemporâneos e seguidores. Através de seus estudos ele mediu forças de atrito em planos horizontais e inclinados, demonstrou que são dependentes da força normal ao deslizamento dos corpos e independentes da área de contato aparente, propôs uma distinção entre atrito de escorregamento e de rolamento e destacou o coeficiente de atrito como sendo proporcional à força normal (ZUM-GAHR, 1987).

Ainda segundo Zum-Gahr (1987) a investigação científica dos diferenciados tipos de atrito, lubrificação e desgaste e também as aplicações técnicas do conhecimento tribológico é feita pela tribologia, que é definida como a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo e das práticas relacionadas.

“O movimento da superfície de um sólido sobre outro é fundamentalmente importante para o funcionamento de vários tipos de mecanismos” (HUTCHINGS, 1992, p.1).

2.1.1 Fenômenos tribológicos

a) Atrito

O conceito de atrito diz respeito à obstrução (atrito estático) ou à restrição (atrito cinético) ao movimento relativo entre as superfícies de corpos em contato, quando sujeitos a uma força externa. A força de atrito é gerada pela deformação na superfície de contato entre os materiais, e pela adesão entre os átomos e moléculas das superfícies opostas. Age tangencialmente à superfície e seu módulo independe da área de contato aparente entre os corpos, porém é função direta do valor da força normal (FISCHER, 2006).

Desta forma define-se coeficiente de atrito (μ), como a relação entre a força de atrito (F_a) e a força normal (F_n), que por este fato é uma grandeza adimensional, como mostra a figura 2A. O atrito pode ocorrer pelas irregularidades superficiais (rugosidade) em nível microscópico, cujo perfil pode ser avaliado por aparelhos como o rugosímetro como mostra a figura 2 B, C e D.

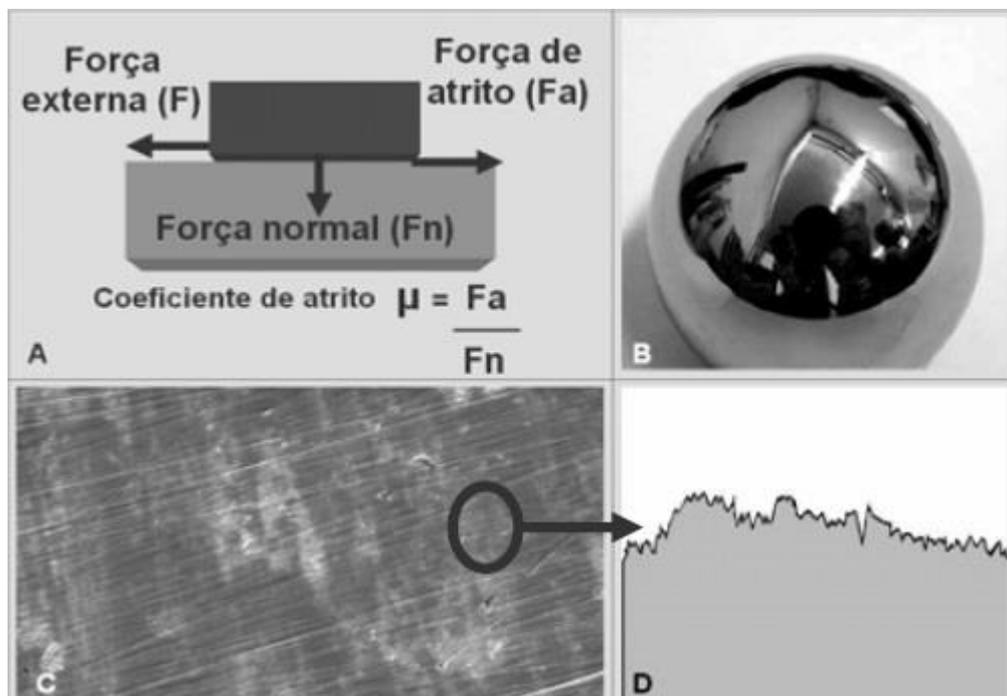


Figura 2 (A) Coeficiente de atrito (B): Superfície de cabeça metálica polida e aparentemente lisa a olho nu (C): à microsocopia, irregularidades ou asperezas em sua superfície (D): perfil mensurado (em Ra- rugosidade média)

Fonte: Fisher, J (2006)

Também é possível observar na figura 2 C e D que a rugosidade é um dos defeitos característicos da irregularidade superficial, sendo um fator que influencia o comportamento tribológico de uma ligação funcional, influenciando o valor do coeficiente de atrito em contato seco ou a eficácia de uma película lubrificante em contato lubrificado.

b) Lubrificação

A força de fricção total depende, principalmente, da resistência ao cisalhamento das junções de asperezas formadas. A lubrificação tem como objetivo introduzir um filme de baixa resistência ao cisalhamento, que acaba enfraquecendo a resistência destas junções, reduzindo a fricção. Em alguns casos, o lubrificante não pode prevenir completamente o contato entre as asperezas, embora possa reduzir a severidade deste. Em outras situações, o lubrificante separa completamente as superfícies e não são formadas junções de asperezas. Assim, a uma maior ou menor extensão, o uso de lubrificantes sempre reduzirá a taxa de desgaste, sendo que esta será uma função direta do tipo de lubrificação presente (FULLER 1984).

Dependendo do tipo de lubrificante utilizado, pode-se causar danos ao equipamento, como a corrosão das superfícies em contato. As propriedades físicas fundamentais do lubrificante, que determinam a sua lubrificação e o seu desempenho tal como a viscosidade, a dependência da temperatura da viscosidade, o índice de viscosidade, o ponto de fluidez, o ponto de fulgor, a volatilidade, a estabilidade à oxidação, a estabilidade térmica entre outras, juntamente com as unidades e as formas apropriadas para medir estes valores, devem ser consideradas (STACHOWIAK, 2007).

Stachowiak (2007) ainda afirma que óleos minerais e sintéticos, emulsões, graxas e fluidos têm sido utilizados para lubrificar maquinarias. Os princípios de seleção do lubrificante são: resistência à oxidação, ao desgaste e à corrosão, a manutenção da viscosidade a altas temperaturas e disposição para lubrificação de película fina. Poucos lubrificantes satisfazem estes critérios, portanto são adicionados aditivos líquido ou semi-sólido para melhorar suas propriedades, o que não resolve todos os problemas, a incompatibilidade do lubrificante de base com o aditivo pode causar falhas industriais caras. Na tentativa de resolver estes problemas, os lubrificantes sintéticos avançam em todos os sentidos.

c) Desgaste

O desgaste é um fenômeno que pode ser determinado por testes em tribossistemas, onde parâmetros como propriedades da superfície, composição química do material, distância de deslizamento, velocidade e carga aplicada, devem ser analisados para uma melhor compreensão dos mecanismos de desgaste. Em decorrência é necessário especificar um sistema bem definido de modo a delimitar o campo de validade das propriedades tribológicas (HUTCHINGS, 1992).

Segundo Horst Czichos (1978) criador das propostas de tribossistema, a estrutura consiste em quatro elementos constituindo o sistema: O tipo, evolução e volume de desgaste dependem do material e acabamento que estes componentes e eventuais materiais intermediários possuem. A figura 3 ilustra a região delimitada dos componentes envolvidos

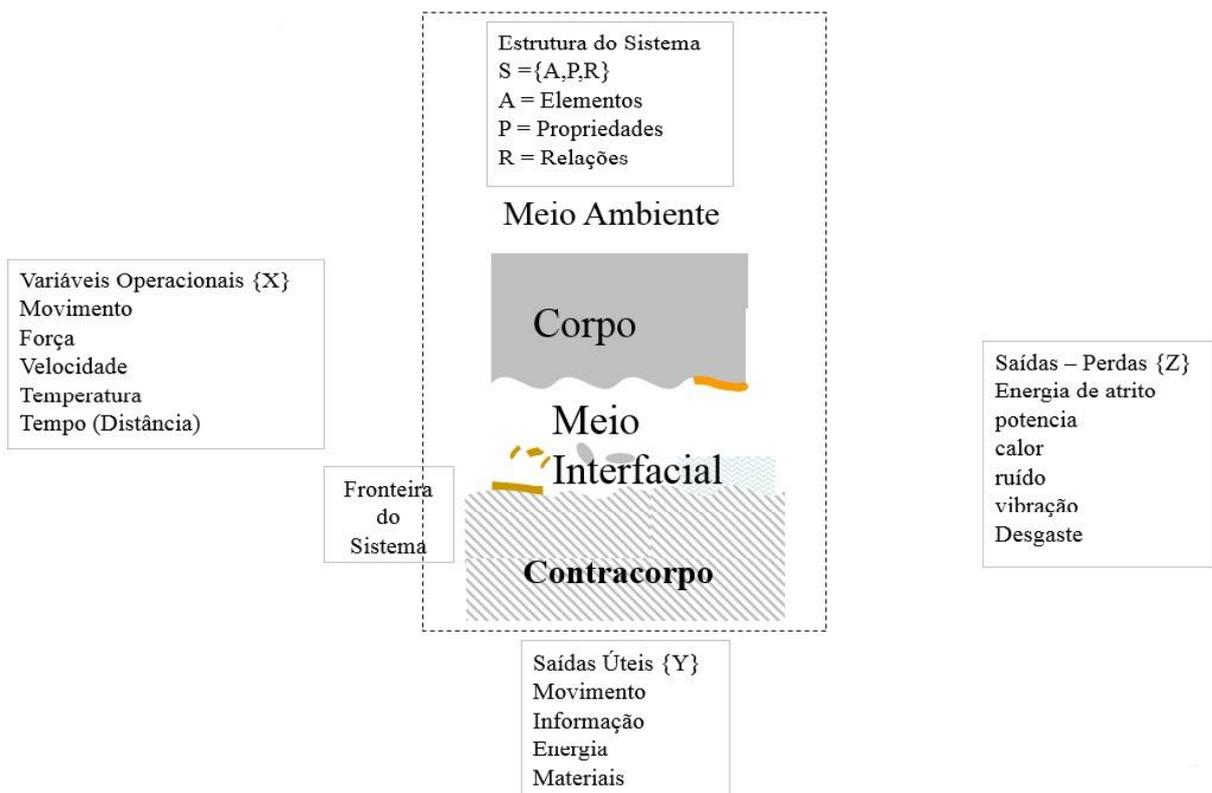


Figura 3: Componentes do sistema tribológico

Fonte: Czichos (1978)

bem como as variáveis operacionais:

Observando a figura 3, a região delimitada demarca a interação das superfícies e o abrasivo no meio interfacial, as variáveis operacionais vão definir a caracterização do desgaste.

Stoeterau (2004) afirma que todas as superfícies sólidas possuem irregularidades, mesmo as que parecem espelhadas possuem irregularidades em escala nanométrica. As rugosidades são um conjunto de irregularidades da superfície de um material e o aumento dessas rugosidades causa o aumento do desgaste, quanto mais rugoso, maior será o atrito e maior a perda de material quando existir movimento relativo entre dois corpos.

A classificação pura e simples dos desgastes é complexa, não é relacionada a valores numéricos, é dividida em leves e severos. Diante disso, para avaliar essa classificação Stoeterau (2004) definiu em seu estudo a classificação dos desgastes que está demonstrada na tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos desgastes

DESGASTE LEVE	DESGASTE SEVERO
Resulta em superfícies extremamente suaves, geralmente mais suaves do que a original.	Resulta em superfícies ásperas, com ranhuras profundas, em geral muito mais rugosa do que a original.
Produz partículas extremamente pequenas, na ordem de 0,1 mm de diâmetro	Produz partículas grandes, tipicamente com diâmetro médio acima de 0,01 mm.
Alta resistência elétrica de contato, pouco contato metálico real.	Baixa resistência elétrica de contato, formação de contatos metálicos.

Fonte: Stoeterau (2004)

A tabela 1 apresenta uma distinção entre ambas as classificações de desgaste.

Uma força normal atua sobre as pontas das irregularidades e cria deformações elásticas e adesões. A força de atrito que impõe o movimento relativo entre as superfícies é definida como a força necessária para cisalhar as asperezas aderidas e elasticamente intravadas (STOETERAU 2004).

Por sua vez Kato (2001), descreveu os três principais movimentos relativos que causam desgaste, sendo eles: O deslizamento, o rolamento e o movimento que é a combinação dos dois.

Ainda segundo Kato (2001), o desgaste é de fato um fenômeno complexo, que existem separadamente ou em combinações de modos diferentes de desgaste. Existem quatro subdivisões de desgaste que estão ilustradas na figura 4:

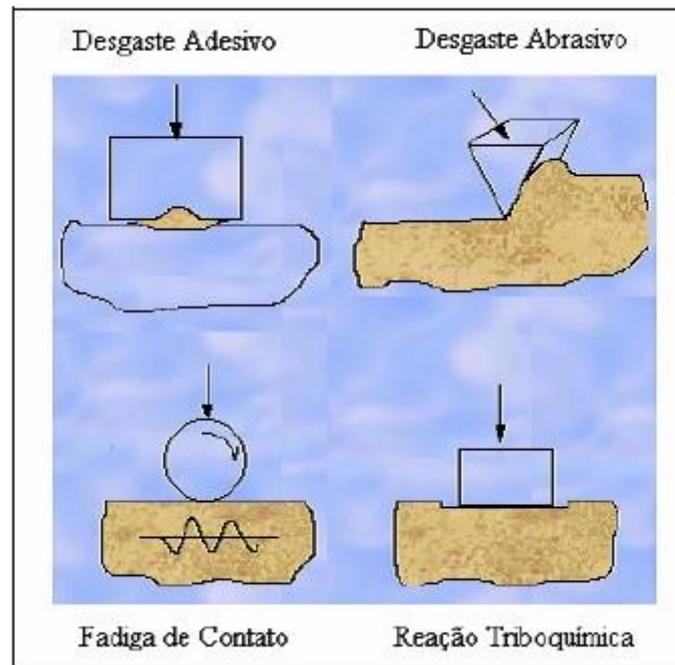


Figura 4: subdivisões de desgaste
 Fonte: Zum ghar (1987)

De uma maneira simplificada, pode-se diferenciar os quatro tipos de mecanismos de desgaste da seguinte maneira (KATO, 2001):

- Adesão:

Formação e ruptura da união adesiva interfacial (exemplos: Junções soldadas a frio, desgaste por atrito);

- Abrasão:

Remoção de material mediante processo de riscamento (processo de microcorte);

- Fadiga de superfície ou contato:

Fadiga e formação de trincas em regiões superficiais devido a ciclos de tensão, resultando em separações de material;

- Reações triboquímicas:

Desenvolvimento de produtos resultantes de reações químicas desenvolvidas entre o par de desgaste e o meio interfacial.

Essas subcategorias podem se apresentar em um sistema tribológico de forma combinada e estão integradas complexamente a vários fatores, incluindo dureza, tenacidade, ductilidade, módulo de elasticidade, tensão de escoamento, propriedades relativas a fadiga, estrutura cristalina, composição das superfícies, geometria, pressão de contato, temperatura, estado de tensão, distribuição de tensão, coeficiente de atrito, distancia de escorregamento,

velocidade relativa, acabamento superficial, lubrificantes, contaminantes e atmosfera ambiente (ZUM GHAR,1987).

2.2 Desgaste Abrasivo

Stachowiak e Batchelor (2005) afirmam que o desgaste abrasivo ocorre quando um objeto sólido é pressionado contra um material que tem dureza igual ou superior. Hutchings (1992) menciona que, no desgaste abrasivo o material é removido ou deslocado de uma superfície por partículas duras ou, algumas vezes, protuberâncias duras de um contracorpo (asperezas).

Segundo Hutchings (1992), uma distinção frequentemente é feita entre desgaste abrasivo a dois corpos e a três corpos. Muitas vezes o desgaste abrasivo a dois corpos é denominado por deslizamento e a três corpos por rolamento. O desgaste abrasivo é denominado de dois corpos quando uma superfície dura e rugosa, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície de menor dureza, produzindo nela diversas ranhuras, pode ser causada por protuberâncias duras pertencentes ou engastadas em uma das superfícies.

Já abrasão a três corpos ocorre quando as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre as duas superfícies. A taxa de desgaste no caso de três corpos é geralmente menor, pois as partículas abrasivas soltas passam 90% do tempo rolando, e apenas 10% do tempo em contato com a superfície (ZUM GAHR, 1998). A figura 5 ilustra a abrasão a dois corpos e três corpos:

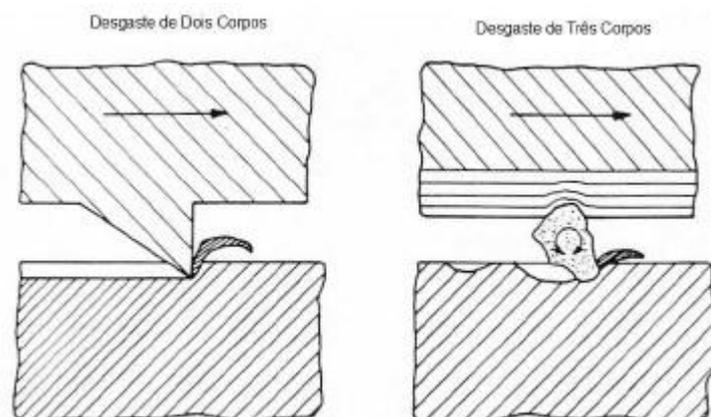


Figura 5: Desenho esquemático dos tipos de desgaste abrasivos.
Fonte: Zum ghar (1987)

Visualmente, o aspecto das superfícies submetidas aos dois modos de desgaste abrasivo é bem distinto, quando observada ao microscópio. Uma análise através de microscopia eletrônica de varredura pode auxiliar a diferenciar os dois modos. A Figura 6 apresenta imagens de microscopia eletrônica de varredura mostrando os diferentes aspectos de materiais que sofreram desgaste abrasivo por deslizamento e por rolamento (TREZONA, ALLSOP, HUTCHINGS, 1999).

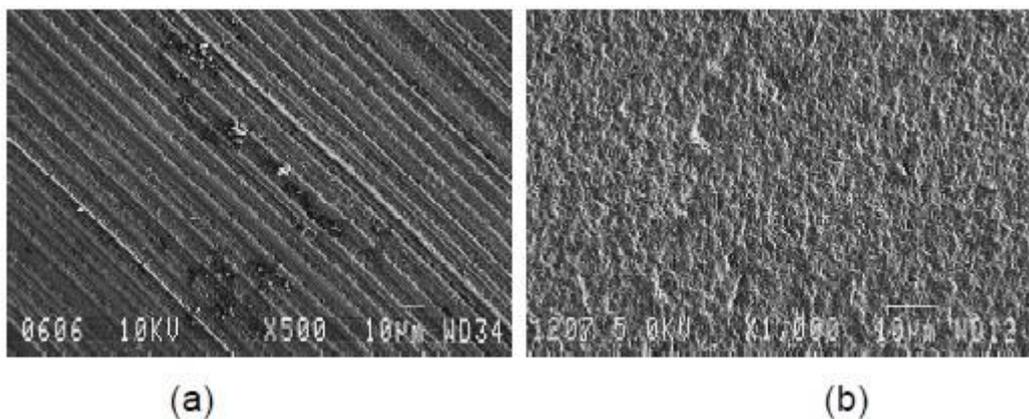


Figura 6: Imagens de microscopia eletrônica de varredura mostrando os diferentes aspectos de um material que sofreu desgaste abrasivo (a) por deslizamento a dois corpos ou três corpos e (b) por rolamento a três corpos.

Fonte: Trezona, Allsop, Hutchings, 1999

Segundo Rabinowicz (1995), o material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste geralmente soltas, pequenas e duras. Possuem extremidades afiadas, tal como de grãos de areia, partículas de metal ou óxido que atrim uma superfície de metal.

O desgaste produzido por uma partícula abrasiva pode ser provocado por um processo de micro corte, fadiga causada pelo micro sulcamento ou por micro lascamento, se a superfície for frágil (TOMANIK, 2000). A Figura 7 mostra os mecanismos envolvidos no desgaste abrasivo.

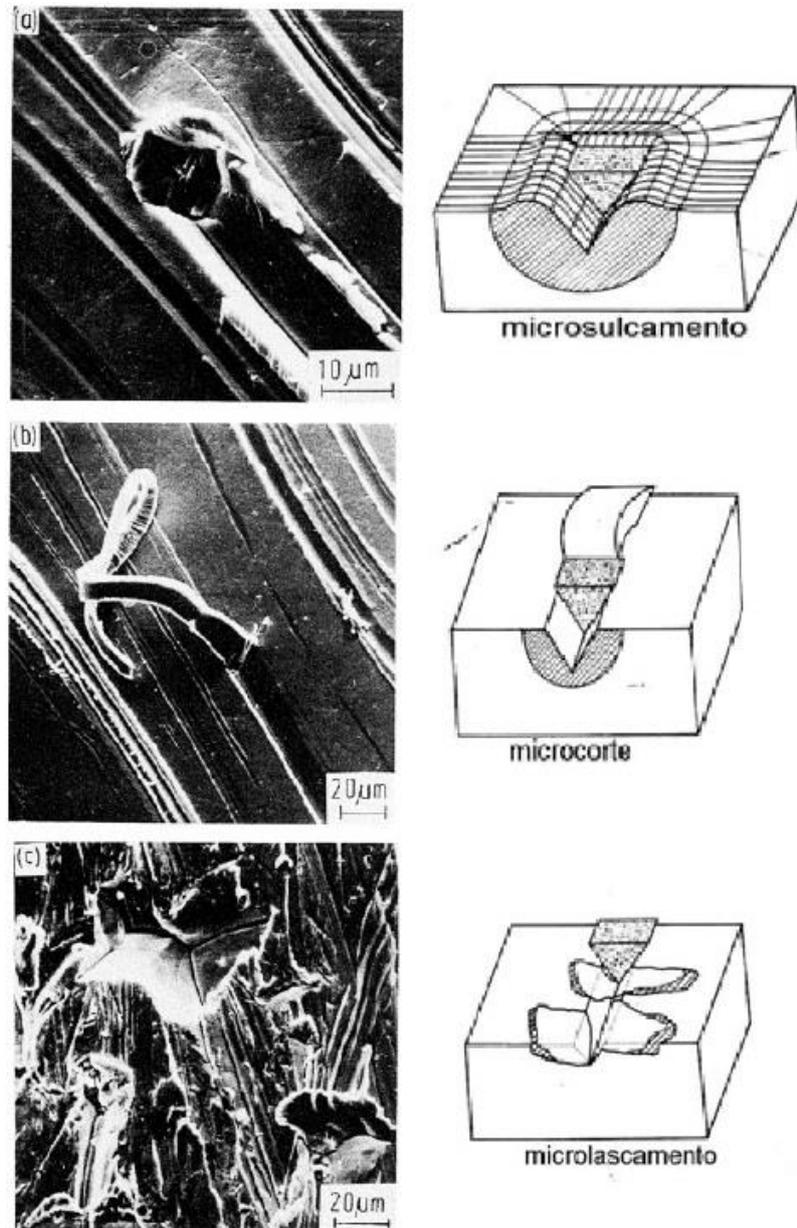


Figura 7: Mecanismos de desgaste
Fonte: Zum ghar (1987)

Como ilustra a figura 7 somente no processo de micro corte há formação de micro cavacos e remoção de material na formação da ranhura com pequena ou nenhuma deformação lateral de material.

Outra classificação é apontada por Budinski et al (1988) quanto há tensão no desgaste, sendo assim classificado como desgaste abrasivo em alta e baixa tensão.

1- Desgaste abrasivo em baixa tensão:

Os resultados deste tipo de desgaste são riscos na superfície do metal, sendo que os sulcos ou riscos são de pequenas dimensões. A tensão imposta às partículas abrasivas não ultrapassa a sua resistência à ruptura (CARPINETTI, 1985 e TCCHIPTSCHIN, 1990).

Ocorre quando as partículas abrasivas estão sujeitas às tensões abaixo da necessária para sua fragmentação. Ocorre o micro corte, que consiste na formação de micro cavacos devido à tensão cisalhante localizada na frente da partícula abrasiva. Ocorre em máquinas agrícolas, equipamentos de escavação e transporte. A figura 8 ilustra bem este desgaste em baixa tensão:

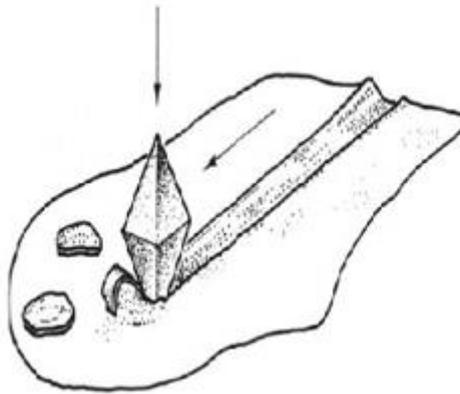


Figura 8: Ilustração do desgaste em baixas tensões
Fonte: Surface engineering for wear resistance, Budinskietal, 1988.

Nota-se na figura 8 que no desgaste a baixa tenção não ocorre a fragmentação do abrasivo, a fragmentação ocorre somente em desgaste sob altas tensões.

2- Desgaste abrasivo em alta tensão:

Este tipo de desgaste ocorre na fragmentação progressiva do abrasivo, que já é inicialmente de pequeno tamanho e tem lugar sobre as superfícies empregadas para moer ou britar o abrasivo. O termo alta tensão é utilizado para deixar claro que a resistência à ruptura do abrasivo foi excedida. O desgaste seria causado por concentração de tensões nos pontos de impacto com o abrasivo, provocando deformações plásticas e fadiga dos microconstituintes dúcteis e trincamento dos microconstituintes frágeis da liga metálica (CARPINETTI, 1985 e TCCHIPTSCHIN, 1990).

Ocorre quando as partículas abrasivas são fragmentadas durante o contato com a superfície. Isto promove maior penetração do abrasivo na superfície e maior deformação plástica. É frequente em equipamentos de moagem de minérios, nas bolas, barras e também em revestimentos de moinhos. Ocorre o lascamento, processo pelo qual grandes fragmentos são arrancados da superfície ativa devido à formatação e propagação de fissuras. Este

mecanismo é restrito aos materiais frágeis. Ele atua no caso em que as tensões produzidas pelas partículas abrasivas excedem certos limites críticos (BUDINSKI ET AL, 1988). A figura 9 ilustra o desgaste abrasivo em altas tensões:

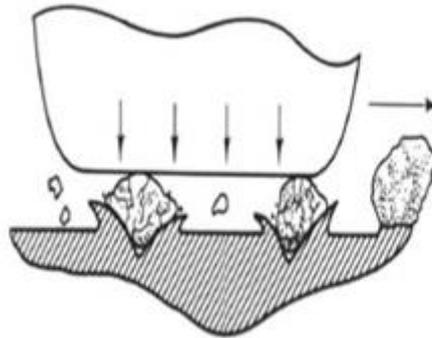


Figura 9: Ilustração do desgaste em altas tensões
Fonte: Surface Engineering for Wear Resistance, Budinskiet all, (1988).

A figura 9 mostra o desgaste sob altas tensões onde ocorre a fragmentação do material.

2.3 Equação De Archard para o desgaste abrasivo

Na Figura 10 tem-se uma partícula cônica deslizando sobre uma superfície plana de um material dúctil e sob a ação de uma carga normal ΔF_N .

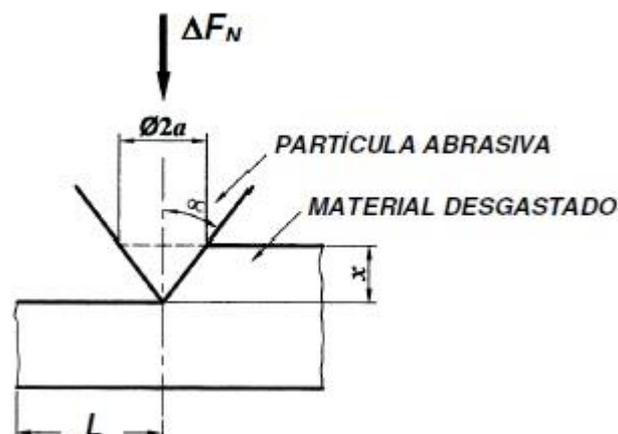


Figura 10: Partícula idealizada deslizando sobre a superfície de um material dúctil
Fonte: Hutchings (1992)

A figura 10 mostra a partícula idealizada sob ação de uma força normal que faz um ângulo α do centro da partícula com o material desgastado.

A taxa de desgaste gerada pelas partículas abrasivas atuantes no sistema pode ser definida pela equação de Archard para o desgaste abrasivo (Equação 1) (Hutchings, 1992).

$$Q = K \frac{F}{H} \quad (1)$$

Na Equação 1, Q é a taxa de desgaste, que é interpretada, nesse caso, como o volume de material removido por unidade de distância de deslizamento $\frac{mm^3}{m}$. K mede a severidade do desgaste (quanto maior for K , maior será a taxa de desgaste). É um valor adimensional e sempre menor que 1. Para o desgaste abrasivo por riscamento, K está entre $\cong 5.10^{-3}$ e $\cong 50.10^{-3}$ e, para o desgaste abrasivo por rolamento, entre $\cong 0, 50.10^{-3}$ e $\cong 5.10^{-3}$ (Hutchings, 1992). F é a força normal total aplicada sobre o sistema e H é a dureza do material desgastado. Fazendo $k = \frac{K}{H}$ e substituindo na Equação 1, a Equação de Archard para o desgaste abrasivo torna-se:

$$Q = k. F_N \quad (2)$$

Neste caso, o coeficiente de desgaste (k) pode ser interpretado como o volume de material desgastado por unidade de força e por unidade de distância de deslizamento $\frac{mm^3}{m}$. Pode-se dizer, também, que k é a taxa de desgaste, considerando, além da distância de deslizamento, a força normal.

A Equação 2 apresenta algumas limitações: **i**) a equação não considera se o desgaste é por riscamento ou por rolamento; **ii**) não são considerados a dureza e o tamanho médio das partículas abrasivas; **iii**) todas as partículas são consideradas como cones ideais (na prática, as partículas terão formatos variados, desgastando a superfície de maneiras diferentes).

2.3 Abrasômetro roda de borracha

O tipo mais comum de ensaio de desgaste abrasivo é mostrado na figura 11.

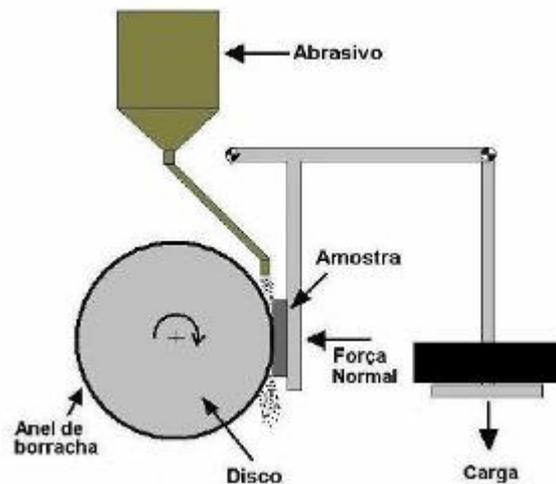


Figura 11: Abrasômetro do tipo roda de borracha
Fonte: Castro (2010)

A Figura 11 representa a configuração do equipamento de desgaste abrasivo a 3 corpos proposto pela norma ASTM G65

A amostra ensaiada possui uma superfície plana, com a forma de uma placa ou um bloco que é pressionado com uma carga constante contra a superfície de um disco recoberto de borracha, que ao girar desgasta a amostra. Este ensaio é normalizado pela norma americana: *American Standards of Testing Materials, ASTM*, (ASTM G65 – *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*).

Segundo a norma ASTM G65, o disco consiste de um aro de borracha, de dureza definida, que é moldado sobre a superfície curva de um disco de aço. Tanto a largura como a espessura da borracha devem ser de 12,7 mm (1/2”) e o diâmetro total de 228,6 mm. O disco ou a roda gira com uma rotação constante de 200 RPM com variação permitida de ± 10 RPM, e um fluxo de abrasivo é direcionado entre a face da roda e da amostra, com vazão compreendida numa faixa entre 300 e 400 g/min (ASTM G65, 2015).

Os parâmetros para o ensaio e o equipamento, segundo a norma ASTM G65, estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do equipamento de ensaio

Potência do motor	750 W
Rotação do disco de borracha (RPM)	200 ±10
Revoluções durante o ensaio	100 a 6000
Carga aplicada sobre a amostra (N)	45 a 130 (±3%)
Vazão de abrasivo (g/min)	300 a 400
Dimensões da amostra (mm)	25 x 75 x 12,7 (LxAxEsp.)
Diâmetro externo do disco (mm)	228,6
Dureza da borracha (Shore A)	60 ± 2

Fonte: ASTM G65 (2015)

A Figura 12 ilustra as dimensões da Roda de Borracha, e a Figura 13 traz as dimensões do Bico Dosador.

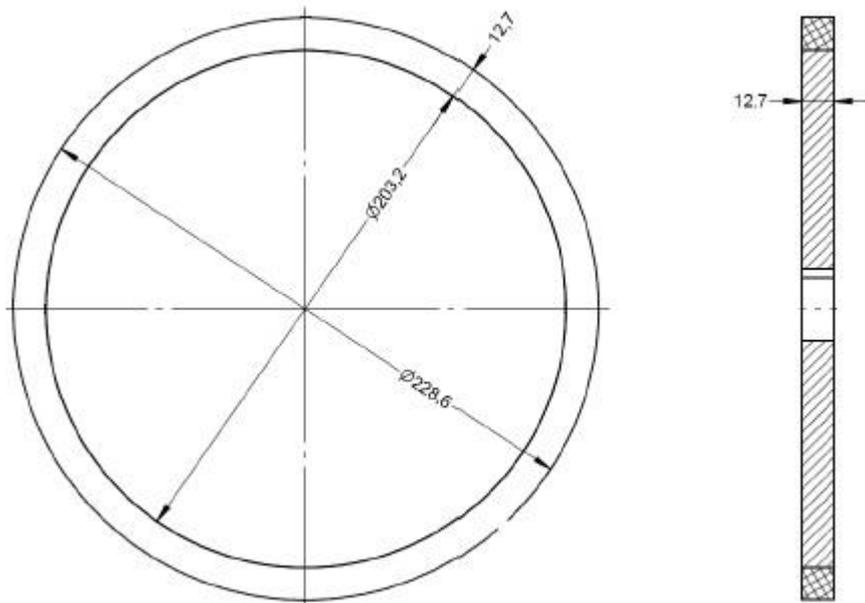


Figura 12: Dimensões da roda de borracha
Fonte: ASTM G65, 2015

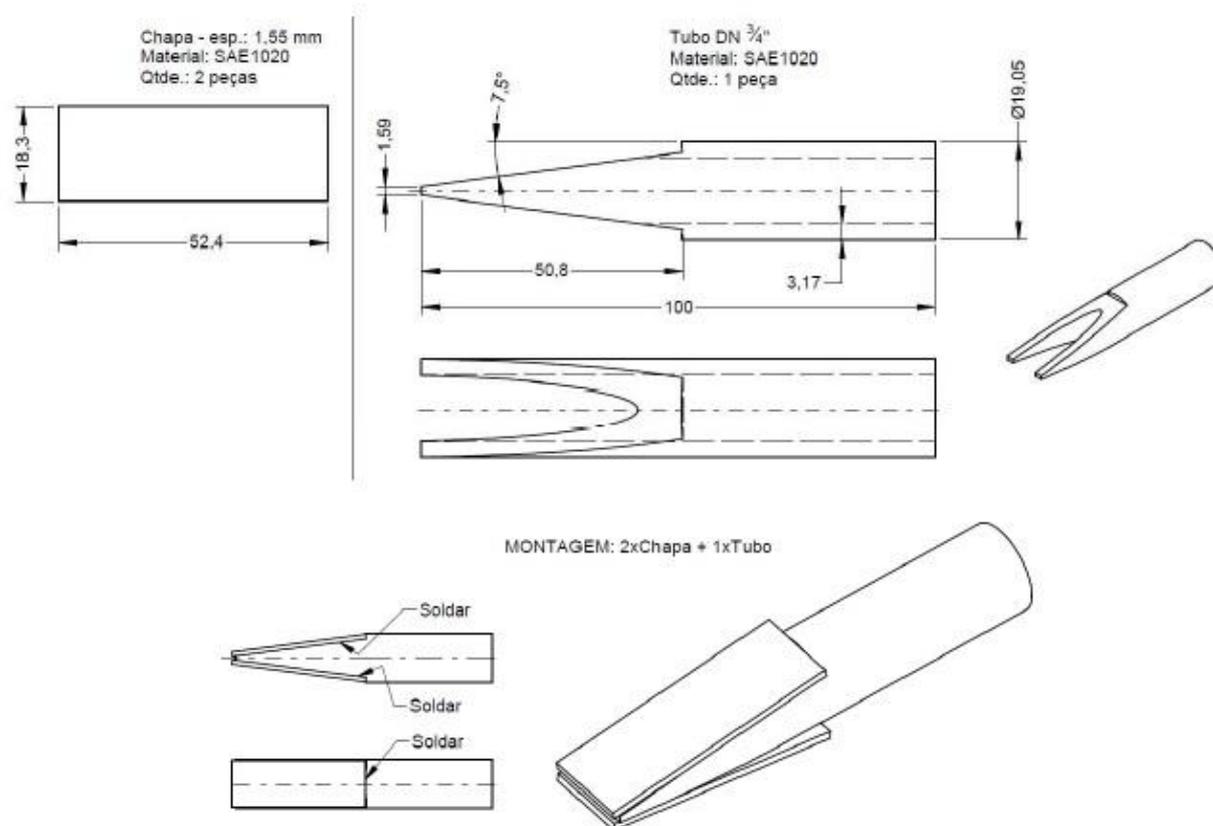


Figura 13: Dimensões do bico dosador
Fonte: ASTM G65 (2015)

Para confecção do bico dosador da figura 13 é recomendado utilizar aço inox, uma vez que o equipamento permite ensaio a úmido, o que pode com o tempo ocorrer oxidação caso não seja feito de aço inox.

O abrasivo recomendado pela norma ASTM G-65 é uma areia de sílica de classificação AFS 50/70. O abrasivo deve ser classificado através de peneiras, e a norma estabelece uma porcentagem máxima de 5% de retenção na peneira 50 e mínima de 95% para a peneira 70. As amostras ensaiadas devem ser retangulares de dimensões 25x76 mm e com espessuras entre 3,2 e 12,7 mm. A superfície de ensaio deve ser preparada de modo a obter uma rugosidade superficial abaixo de 0,8 μm (ASTM G65, 2015).

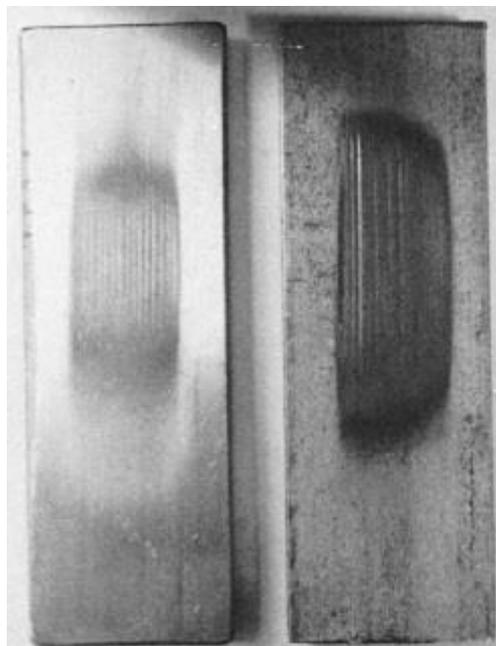
Antes de cada ensaio, as amostras devem ser pesadas, utilizando-se uma balança com precisão de 0,001 gramas. Ao final do ensaio sua superfície deve ser limpa e novamente pesada. A diferença entre as massas final e inicial serve para calcular o volume de material perdido pela amostra durante o ensaio, utilizando a equação 3 (ASTM G65, 2015).

$$\text{Volume perdido [mm}^3\text{]} = \frac{\text{massa perdida [g]}}{\text{densidade [\frac{g}{\text{cm}^3}]}} \times 1000 \quad (3)$$

Como ocorre naturalmente um desgaste da borracha que recobre o disco, o diâmetro externo da roda deve ser medido antes e depois de cada ensaio, para que o volume perdido calculado na Equação 3 possa ser corrigido. Para esta correção, utiliza-se a equação 4:

$$\text{Volume perdido ajustado [mm}^3\text{]} = \frac{228,6 \text{ [mm]}}{\text{diâmetro da roda após o ensaio [mm]}} \times \text{volume perdido calculado [mm}^3\text{]} \quad (4)$$

Uma inspeção visual na amostra após o ensaio deve observar uma marca de desgaste uniforme e centralizada. Na figura 14 (a) e figura 14 (b) estão mostradas amostra desgastadas de maneira uniforme e não uniforme, respectivamente. Numa situação de desgaste não uniforme da amostra, as condições de alinhamento entre a face da amostra e a face da roda de borracha devem ser revisadas.



(a)

(b)

Figura 14: Marcas de desgaste uniforme (a) e não uniforme (b), respectivamente.
Fonte: ASTM G65 (2015)

Rabinowicz (1961) considera o ensaio roda de borracha impróprio para simular desgaste abrasivo sob baixas tensões a três corpos, porque partículas abrasivas podem ficar

incrustadas na roda, reproduzindo localmente uma situação de desgaste abrasivo a dois corpos. Esta transição não ocorre caso o tribossistema possua uma das seguintes características:

1 - Se o afastamento das superfícies é maior do que o tamanho individual das partículas, formando várias camadas.

2 - Se a tensão (carga) for controlada para que não ocorra a fragmentação das partículas abrasivas, o que acarretaria em um ensaio sobre alta tensão.

3 - Se há uma alta rugosidade o que torna o contato restrito a pequenos sítios e o provável efeito de embeber as partículas para atuarem como cortantes.

4 - Não deixar que a borracha se aqueça muito pois uma alta temperatura deixa a borracha mais macia diminuindo a taxa de desgaste, logo se o sistema não dispõe de um sistema de refrigeração é necessário paradas programadas para que o aquecimento da borracha não aconteça.

2.4 Transportadores de correia

Um transportador de correia envolve uma série de elementos que devem ser bem analisados, pois todo elemento tem fundamental importância para o correto funcionamento do equipamento.

O manual da Fábrica de Aços Paulista – FAÇO (2011), empresa de aço paulista, é muito utilizado para dimensionamento de correias. Esse manual afirma que um transportador de correia envolve uma série de elementos de máquinas que, em conjunto, promovem o transporte de diversos produtos. Esses produtos podem ser dos mais variados, desde alimentos até produtos perigosos, e também podem apresentar diversas características, como ser poeirento, ter características fluidas, ser explosivo, contaminável, desagradável, corrosivo produzir gases nocivos, ser pegajoso ou pastoso, conter óleos, ser muito leve ou fofo e possuir temperaturas elevadas ou muito baixas.

Esses mecanismos e elementos devem ser bem analisados, pois todos têm fundamental importância e o correto funcionamento do equipamento somente ocorrerá se todos os elementos estiverem bem integrados e em bom estado de funcionamento.

Sacramento (2004) cita os principais componentes:

1 – Correia;

2 – Tambores;

- 3 – Componentes;
- 4 - Guias laterais;
- 5 – Roletes;
- 6 – Freios;
- 7 – Chute;
- 8 – Estrutura;
- 9 – Drive;

Drive é o conjunto de acionamento do sistema, composto por um motor elétrico e um sistema de transmissão redutor de velocidade, geralmente as correias tem baixa velocidade. E, em alguns casos, possui um inversor de frequência a fim de minimizar os solavancos na partida do motor.

Na figura 15 é possível observar os principais elementos constituintes de uma correia transportadora.

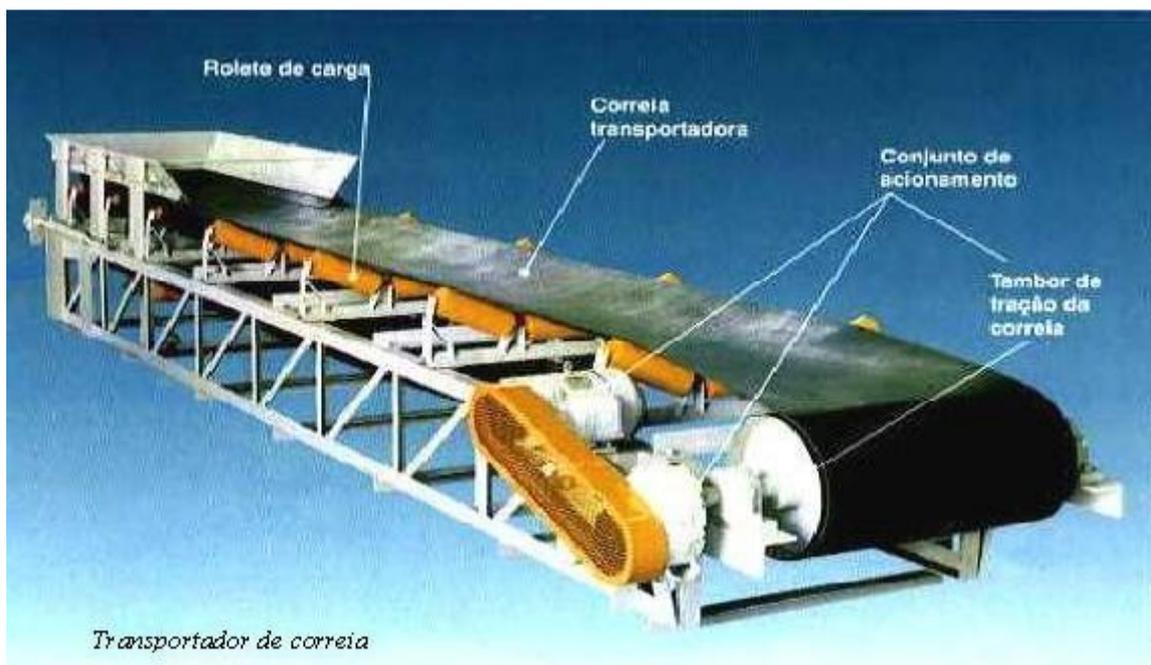


Figura 15: Ilustração dos elementos de um transportador de correias

Fonte: Transportadores Contínuos para Graneis Sólidos – SACRAMENTO, R. C. F (2004)

Sacramento (2004) caracteriza cada componente desse equipamento conforme a figura 15 ilustra e os principais são:

1- Estrutura.

É constituído pelos elementos de sustentação, são geralmente do mesmo aço utilizado para construção civil, é o esqueleto do transportador e os elementos são: Apoio, torre, coluna, treliças, suporte, torre de transferência, barras e vigas.

2- Correia

A alma do transportador, a correia é o elemento que está em contato direto com o material transportado e, segundo Sacramento (2004), é o elemento de maior valor, chegando a quarente por cento de todo o equipamento. A seleção da correia deve ser meticulosamente feita, pois uma seleção equivocada trará um maior desgaste dos componentes do transportador e diminuirá a vida útil deles. A seleção se baseia nos seguintes itens:

- a – Características do material transportado;
- b – Condições de serviço;
- c – Tipos de rolete;
- d – Largura;
- e – Tensão máxima;
- f – Temperatura do material;

A correia é constituída basicamente de dois elementos, a carcaça e a cobertura. A carcaça é o elemento responsável pela força da correia, pois depende dela a resistência para transportar o material, as tensões, flexões e toda severidade imposta que a correia é submetida, geralmente fabricada de fibras têxteis ou cabos de aço. A cobertura tem função protetora, protegendo a carcaça do ataque do material transportado.

Essas correias podem ser encontradas lisas (Figura 16), ou não lisas, e são escolhidas dependendo do grau necessário para o transporte e o tipo de material.



Figura 16: Correia Lisa
Fonte: ABECOM (2017)

3 – Tambores

Construídos normalmente em aço, têm como função principal tracionar a correia para o funcionamento do transportador, sendo neste caso, papel exercido pelo tambor motriz, onde está acoplada a motorização.

Com a movimentação da correia movem-se também os demais componentes e o tambor movido, que promove o seu apoio. Os tambores possuem também outras funções no transportador, tais como a de efetuar desvios e dobras na correia. Sendo assim, podemos ter a seguinte classificação para os tambores:

a - Acionamento – utilizado na transmissão de torque, pode estar localizado na cabeceira, no centro ou no retorno;

b - Retorno – efetua o retorno da correia a sua posição inicial e em alguns TC são responsáveis pelo tensionamento da correia, está localizado na extremidade oposta ao terminal de descarga;

c - Esticador – utilizado para manter a tensão ideal para o funcionamento do transportador;

d - Dobra – utilizado para desviar o curso da correia;

e - Aletado – este tipo de tambor tem uma configuração especial, de modo a não permitir que o material transportado ao cair no lado do retorno, seja pressionado contra a correia danificando-a. Pode ser aplicado como tambor de retorno ou de esticamento nos esticadores automáticos verticais;

f - Magnético – Este tambor é aplicado nos transportadores, comumente localizados no terminal de descarga e sua função é separar elementos magnéticos do material transportado;

g - Encosto – utilizado para aumentar o ângulo de contato com o tambor de acionamento.

A figura 17 Ilustra tambores de acionamento com revestimento.

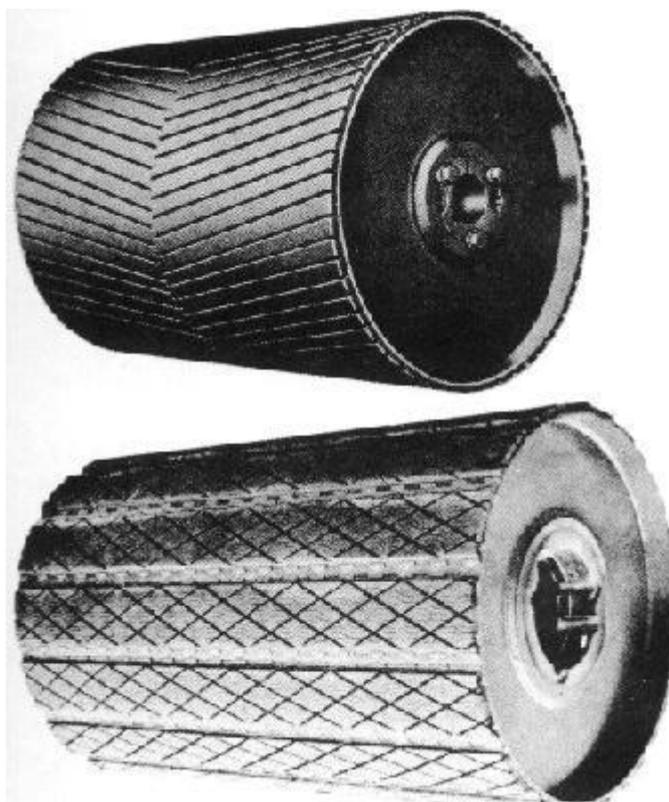


Figura 17: Tambores de acionamento revestido

Fonte: Transportadores Contínuos para Graneis Sólidos – SACRAMENTO, R. C. F (2004)

4 – Roletes

São conjuntos de rolos, geralmente cilíndricos, e seus respectivos suportes. Estes rolos podem efetuar livre rotação em torno de seus próprios eixos e são instalados com o objetivo de dar suporte à movimentação da correia e guiála na direção de trabalho. Podem ser

encontrados montados com um único rolo, com rolos múltiplos, e são encontrados nos seguintes tipos:

a - Roletes de impacto - roletes localizados no ponto de descarga do material sobre o transportador, destinando-se a suportar o impacto deste material sobre a correia. São constituídos de vários anéis de borracha montados sobre um tubo de aço e são montados com pequenos afastamentos entre os rolos. A figura 18 ilustra exemplo de roletes de impacto.

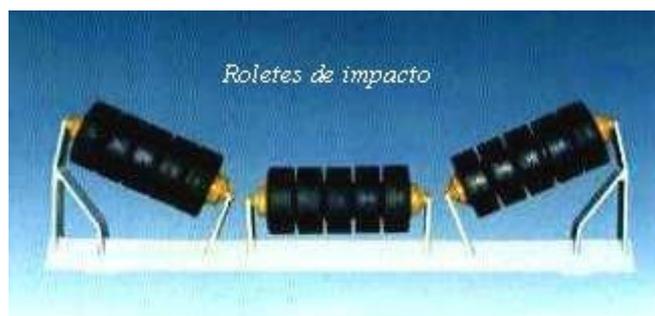


Figura 18: Roletes de impacto

Fonte: Transportadores Contínuos para Graneis Sólidos – SACRAMENTO, R. C. F (2004)

b - Roletes de carga - Estes roletes em geral são localizados no lado superior do transportador e sua função é suportar a correia transportadora, bem como a carga que está sendo movimentada por ela. Os roletes de carga podem ter as seguintes configurações: planos, duplos, triplos, em catenária com 3 ou 5 rolos ou espiralados. Os roletes duplos, triplos e em catenária têm maior capacidade de carga que o plano, devido ao acamamento que proporcionam à correia.

c - Roletes de retorno - roletes no qual se apoia o trecho de retorno da correia. Possui a montagem com maior espaçamento entre si. São constituídos de anéis de borracha separados por distanciadores e montados sobre um tubo de aço.

d - Roletes guias - Estes rolos dispostos verticalmente em relação às bordas da correia são fixos e sua função é guiar a correia, principalmente na entrada dos tambores, evitando que a mesma seja jogada contra a estrutura. Este tipo de rolo só deve ser usado em última instância, pois provoca uma autodestruição das bordas da correia e consequente cisalhamento das lonas da carcaça.

5 – Cavaletes

Os cavaletes são um conjunto de rolos e seus respectivos suportes e são fixados na estrutura em toda extensão em que a correia passa no transportador.

6 - Chutes

É um dispositivo afunilado destinado a receber o material transportado e dirigi-lo convenientemente à correia transportadora de modo a carregá-la equilibradamente e sem transbordamento da carga. São utilizados como elementos de ligação nos sistemas integrados de transportadores contínuos, como por exemplo, para ligar a saída de um bocal de um silo até a descarga sobre o transportador.

7 – Conjunto de acionamentos

É constituído de um motor elétrico, acoplamentos hidráulicos (para potências superiores a 75HP), tambores, dispositivos de segurança e uma transmissão (reductor) e são projetados de acordo com o tipo de transporte e a potência transmitida. Podem ser instalados em três posições: na cabeceira do transportador, no centro e no retorno. Para o seu dimensionamento deve ser analisado o perfil do transportador, o espaço disponível para sua instalação e operação, a potência transmitida, o sentido da correia e as tensões que nela atuam.

8 – Esticador de correia

Tem como principal função garantir a tensão conveniente para o acionamento da correia e, além disso, absorver as variações no comprimento da correia causadas pelas mudanças de temperatura, oscilações de carga, tempo de trabalho e etc.

9 – Raspadores

Atuam em contato com o lado sujo da correia, após o tambor de descarga do material e fazendo com que o material raspado caia na calha de descarga, para evitar danos aos tambores de desvio e aos roletes de retorno.

10 – Guias Laterais

Utilizadas nos casos onde há vibração e onde existe a tendência de o material derramar da correia. Sua aplicação também é indicada na zona de carregamento, como prolongamento da tremonha.

11 – Freios

São utilizados para evitar a continuidade de descarga do transportador após o seu desligamento, em situações de emergência ou em caso de controle de aceleração para a partida. A figura 19 mostra o sistema de freios utilizado em um transportador de correias.

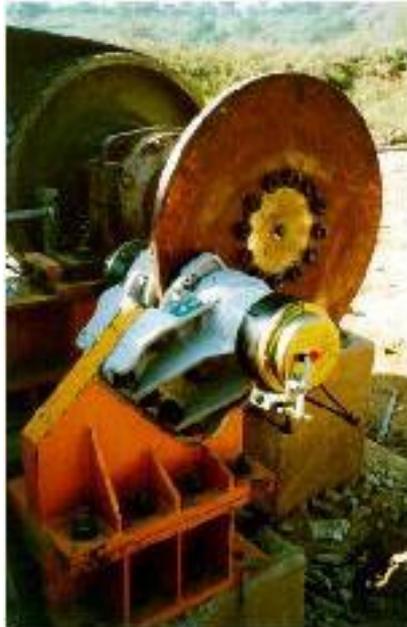


Figura 19: Sistema de freios de uma correia transportadora
Fonte: Transportadores Contínuos para Graneis Sólidos –
SACRAMENTO, R. C. F (2004)

Conforme mostra a figura 19 o freio é utilizado com a finalidade de controlar o tempo de parada do transportador. Geralmente utiliza-se freios eletromagnéticos acoplados junto ao motor que movimenta toda a correia transportadora.

Descrevendo os componentes básicos de um transportador de correia utilizado para materiais a granel, Swinderman et al (2009) explica a importância de ter um conhecimento profundo dos transportadores já que possuem uma enorme praticidade. Eles podem transportar materiais subindo grandes inclinações, contornando cantos sobre montanhas e vales, através de cursos d'água, sobre ou abaixo do chão.

2.5 Rolete de carga

Localizados no lado superior dos transportador, sua função é suportar a correia carregada nas áreas fora das zonas de descarga (chutes). São encontrados em variadas disposições, desde planos com um rolo até em disposição catenária que podem possuir vários rolos combinados. (SACRAMENTO 2004).

Segundo o catálogo da empresa fabricante de roletes de carga CRISGUI (2012), os roletes são projetados para operarem sob as mais diversas e severas situações de trabalho,

formando um conjunto robusto e extremamente eficaz. Os tubos são em aço carbono com costura com espessura mínima de 3,75mm, eixo em aço SAE 1020 trefilados e retificados no alojamento do anel interno do rolamento com tolerância h6. O alojamento do rolamento é composto de caixa estampada em aço SAE 1020 calibrado com tolerância M7 e abas posteriormente usinadas.

O conjunto de vedação é do tipo permanente composto de anel de encosto, rolamento rígido de esferas com folga C3, labirinto duplo radial, arruela lisa e anel elástico, anel defletor, retentor de borracha nitrílica e tampa de fechamento em chapa de aço estampada. Em todos os componentes é aplicado graxa especial a base de lítio, formando assim um conjunto de lubrificação permanente. A figura 20 ilustra como é a disposição dos roletes de carga na correia transportadora em uma empresa mineradora.

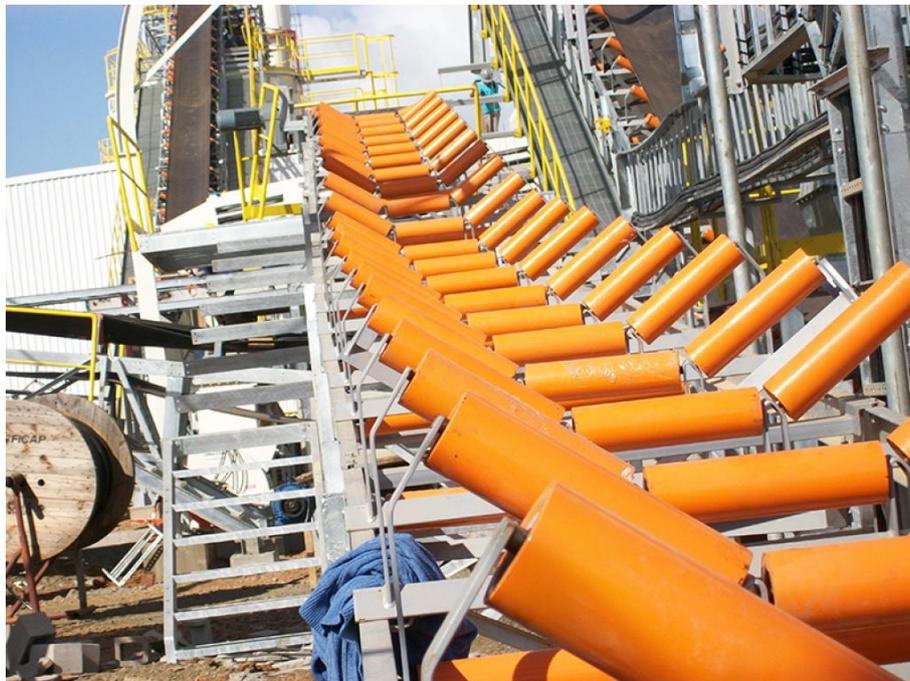


Figura 20: Roletes de carga em correia transportadora
Fonte: IMEPEL (2016)

Os roletes de carga mostrados na figura 20 podem ser encontrados em várias disposições, desde planos com um rolo até em disposição catenária que podem possuir vários rolos combinados

2.5.1 Ciclos de vida

A vida útil de um rolo é estabelecida segundo a norma ABNT - NBR 6678. Segundo Gavi (2009) vida de um rolo depende de muitos fatores tais como, material transportado,

espessura da parede do tubo, eficiência da vedação do rolamento, meio ambiente, etc. Porém, como todos estes fatores não são quantificáveis, a vida do rolamento é utilizada como indicativo da vida do rolo. Entende-se como vida do rolamento, o número de horas a uma determinada rotação que 90% dos rolamentos atinge antes que apareçam os primeiros sinais de fadiga (descascamento) em seus anéis ou corpos rolantes.

A vida real da carcaça do rolo pode ser, portanto, inferior à vida do rolamento. É recomendado normalmente uma vida de 30.000 horas a 500 rpm, sendo este o valor de referência. Para aplicações especiais, a vida do rolamento deve ser acordada entre usuário e fornecedor. Convém observar que diâmetros de rolos maiores são mais adequados a serviços mais pesados, estando os eixos maiores relacionados com os diâmetros maiores. Os diâmetros maiores apresentam menor resistência ao rolamento, menor penetração na correia, maior espessura do tubo (rolos de aço) etc., garantindo de um modo geral uma maior vida útil (GAVI, 2009).

No presente trabalho, a base teórica é de fundamental importância para que se possa solucionar o problema levantado no capítulo 1. As definições de desgaste bem como as condições de operações dos roletes de carga facilitam o entendimento do problema e fornece conceito teórico necessário para aplicar na prática e obter os resultados bem como possíveis alternativas para as soluções do problema.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo tem como intuito demonstrar as características da pesquisa sobre o desenvolvimento de um sistema para ensaio de desgaste abrasivo e testes de desgaste abrasivo em roletes de carga de transportadores de correias em condições da indústria minero metalúrgica. Para isso a figura 21 mostra todos os tópicos abordados no presente capítulo:



Figura 21: Tópicos abordados no capítulo 3
Fonte: Pesquisa direta (2017)

3.1 Tipos de pesquisa

De acordo com Gil (2008), a pesquisa pode ser descrita como um processo sistemático e formal de desenvolvimento do método científico; com objetivo fundamental de descobrir respostas para problemas, através do emprego de procedimentos científicos.

Demo (1995) insere a pesquisa como atividade cotidiana comparando-a a atitude, um questionamento sistemático crítico e criativo, mais a intervenção competente na realidade, ou o diálogo crítico permanente com a realidade no sentido teórico e prático.

Uma pesquisa pode ser classificada de duas formas:

Pesquisa qualitativa: aquilo onde se encontra afinidade ativa entre o mundo em que vivemos (real) e o sujeito, criando um vínculo entre ambas as partes, e que não pode ser mensurada ou transformada em números (SILVA E MENEZES, 2005).

Pesquisa Quantitativa: considera que tudo pode ser questionável, o que significa traduzir em números, opiniões, e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas (porcentagem, média, moda, mediana, etc.). Segundo Polit, Becker e Hungler (2004) a pesquisa quantitativa, que tem suas raízes no pensamento positivista lógico, tende a enfatizar o raciocínio dedutivo, as regras de lógica e os atributos mensuráveis da experiência humana.

Assim, o presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa e quantitativa, procurando analisar o desgaste abrasivo em roletes de carga nas condições de campo da indústria minero metalúrgica. São utilizados métodos estatísticos nesse presente trabalho, para análise de dados

Para (Gil, 2008), com base nos objetivos, é possível classificar a pesquisa em três grupos:

- Pesquisa exploratória;
- Pesquisa descritiva;
- Pesquisa explicativa.

O objetivo de uma pesquisa exploratória é proporcionar maior familiaridade com o problema, ainda pouco conhecido ou explorado, de tal maneira que o pesquisador possa gerar hipóteses ao final da pesquisa. Este tipo de pesquisa pode envolver levantamentos bibliográficos, entrevistas com pessoas experientes no problema pesquisado. Geralmente tem-se uma pesquisa bibliográfica e estudo de caso.

A pesquisa descritiva tem o objetivo de descrever as características de determinada população, fenômenos ou de experiências. Uma de suas peculiaridades está na utilização de técnicas padronizadas de coletas de dados, tais como questionários e observações sistemáticas. Exemplo: pesquisa referente à idade, sexo, procedência, eleição e etc.

A pesquisa Explicativa tem como objetivo identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Este tipo de pesquisa é a que mais aprofunda o conhecimento da realidade, tornando este tipo de pesquisa o mais complexo e delicado. É uma pesquisa sujeita a erros, pois depende da análise subjetiva do pesquisador.

Dessa forma em relação ao objetivo, se trata de uma pesquisa exploratória, pois é um estudo em que envolve hipóteses através de simulação de caso real e levantamentos bibliográficos para comparações. Ademais esta pesquisa tem objetivos descritivos e explicativos pois se trata de um caso particular de desgaste abrasivo bem como coleta de dados específicas através de observações de ensaio. Vários fatores são observados através de

configurações particulares de ensaio em relação ao ambiente real de trabalho do rolete de carga que é o objeto estudado.

Quanto aos procedimentos técnicos, é possível classificar o atual trabalho como pesquisa bibliográfica e experimental. Para Gil (2008), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros, artigos científicos, apostilas, catálogos e dissertações de mestrado. Já a pesquisa experimental é quando se determina um objeto de estudo, seleciona-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, define-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. No que se refere aos procedimentos experimentais todos os dados coletados são de observações do ensaio realizado no Abrasômetro do tipo roda de borracha em laboratório.

3.2 Materiais e métodos

Para o desenvolvimento do sistema de análise de desgaste abrasivo foram utilizados materiais diversos para confecção do Abrasômetro de modo que ele proporcione menor uso de espaço físico e menor custo de aquisição e manutenção. Os ensaios foram simulados no abrasômetro roda de borracha de acordo com a norma ASTM G65.

O Abrasômetro foi construído com estruturas em aço SAE 1020, roda com a borda de borracha vulcanizada de dureza Shore 60 A. O motor utilizado para o acionamento é da marca WEG de 1 CV. Também foram utilizados arrebites e solda para junção da estrutura metálica da máquina.

As amostras foram cortadas em 4, também do aço SAE 1020, pois este aço é utilizado para confecção da superfície do rolete de carga. Porém, duas amostras foram revestidas com a tinta Laranja Munsell 2,5YR6/14 mais conhecida como laranja segurança. Foram utilizados também máquina para leitura de medida de dureza vickers, medidor de temperatura infravermelho, sensor de rugosidade (rugosímetro) e balança de precisão 0,001g. O Material abrasivo utilizado foi areia de alto teor de sílica e com granulometria das peneiras 50/70 AFS.

A norma ASTM G-65 propõe um equipamento para ensaios de desgaste abrasivo, onde a amostra é disposta num plano vertical e forçada horizontalmente contra um disco de borracha que gira a uma rotação constante de 200 RPM \pm 10, ao mesmo tempo em que um abrasivo é direcionado para passar entre as superfícies da amostra e do disco de borracha, causando assim o desgaste do corpo de prova.

Os procedimentos metodológicos utilizados no ensaio estão representados na figura 22.

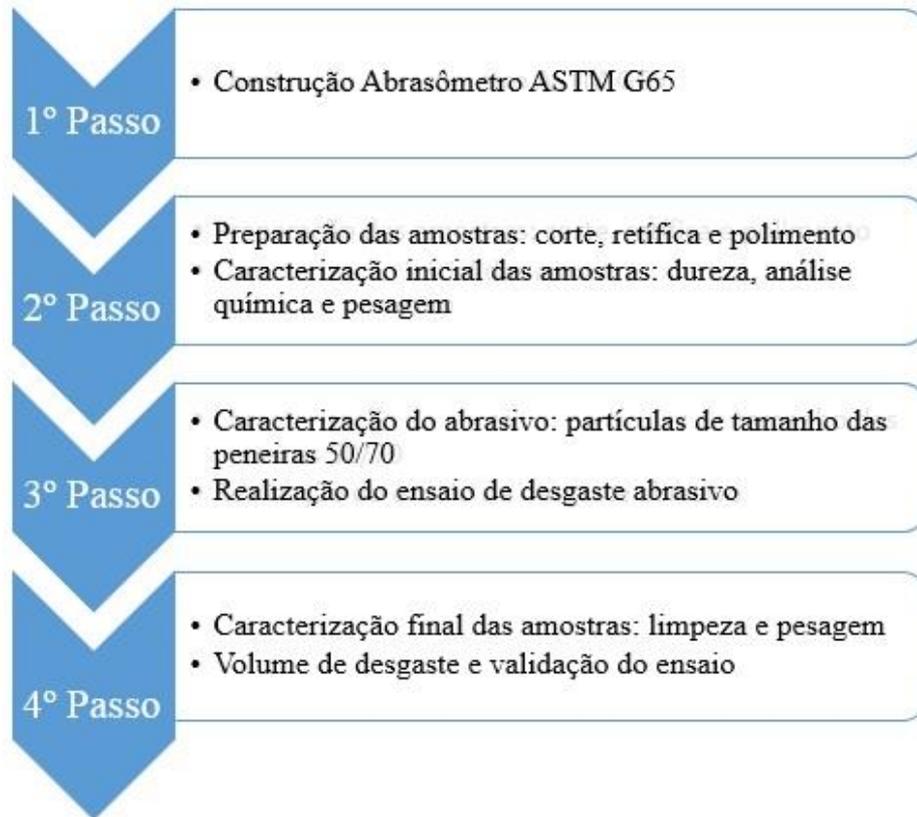


Figura 22: Fluxograma de métodos utilizados na pesquisa
Fonte: Pesquisa direta (2016)

A figura 22 apresenta as etapas seguidas para realização do ensaio. No primeiro passo a amostra é cortada nas dimensões 25 x 76 x 6,2 mm seguido de retífica e polimento para chegar na rugosidade desejada, que segundo a norma ASTM G65 deve ser abaixo de 8 μ m. Após o polimento foram feitas 3 medidas de leitura de dureza vickers HV0,5 para cada amostra do aço SAE 1020 sendo utilizado a média aritmética simples das 3 leituras de dureza realizadas seguido da pesagem em uma balança de precisão 0,001g.

No segundo passo é feito um peneiramento do abrasivo no qual foi utilizado areia com alto teor de sílica em torno de 90%. Após a caracterização do abrasivo as amostras são limpadas, todo vestígio de oxidação ou sujeira foram removidos antes do ensaio. Após o procedimento de limpeza as amostras submetidas ao ensaio, sendo pressionadas contra a roda de aço com bordas de borracha sobre uma força de 130N e uma vazão do abrasivo em torno de 360g/min.

No terceiro passo a amostra é retirada, limpa com álcool para retirar pequenas partículas de areia presas a superfície do aço e pesada. Após a obtenção do peso, pós ensaio, é feita uma subtração das massas inicial e final, e o valor obtido é usado nas equações 3 e 4 para cálculo do volume perdido. Após o cálculo do volume perdido, o valor é utilizado na equação 1 de Archard para obter o coeficiente de desgaste do aço. Analisando os resultados e comparando com os valores mencionados na norma ASTM G65, é possível validar o ensaio.

3.3 Variáveis e indicadores

A tabela 3 apresenta as variáveis pertinentes a essa pesquisa e quais são seus respectivos indicadores:

Tabela 3: Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Desgaste	Abrasivo por três corpos
Vazão do abrasivo	360 g/min
Rotação da roda de borracha	210 rpm
Revolução (ciclos)	6000 ciclos
Distancia de deslizamento	4309 m
Carga aplicada	130 N
Coeficiente de desgaste	Adimensional
Taxa de desgaste	mm ³ / unidade de deslizamento.
Dureza do corpo de prova aço SAE 1020	Dureza Vickers HV
Temperatura do corpo de prova	Graus Celsius °C
Rugosidade	µm

Fonte: Pesquisa direta (2016)

3.4 Instrumento de coleta de dados

Esta etapa consiste em determinar os instrumentos utilizados para a pesquisa. O instrumento de coleta de dados do presente trabalho consistiu em uma observação direta dos fenômenos de desgaste juntamente com informações de outros colaboradores. Alguns dados técnicos foram adquiridos através de leitura de livros, dissertações, artigos científicos, catálogos, entre outros.

O projeto base para confecção do Abrasômetro foi coletado na norma técnica ASTM G65.

3.5 Tabulação e análise de dados

Para tabulação dos dados foi utilizado o pacote office da Microsoft especificamente Excel.

Para análise de dados foi utilizado a equação (1) de Archard.

3.6 Considerações finais

Foi apresentado neste capítulo toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho. Demonstrou-se o tipo de metodologia utilizada e o tipo de pesquisa, as variáveis e indicadores utilizados no desenvolvimento da pesquisa, instrumentos de coleta de dados e análise e por final descreveu-se o tipo de coleta de dados e os softwares utilizados.

No capítulo seguinte, serão apresentados os resultados e a discussão acerca da contribuição do equipamento Abrasômetro ASTM G65 para simular o desgaste abrasivo na superfície dos roletes de carga dos transportadores de correia utilizados na indústria minero metalúrgica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho contemplou o objetivo geral de desenvolver abrasômetro ASTM G65 para simular o desgaste abrasivo na superfície dos roletes de carga de transportadores de correia utilizados na indústria minero metalúrgica. Como objetivos específicos realizar uma revisão bibliográfica sobre tribologia, bem como identificar e classificar o tipo de rolete utilizado nos transportadores de correia no que tange ao material de superfície, dureza e condições de campo para teste no equipamento Abrasômetro. Em seguida destacar as vantagens para simular o desgaste abrasivo a 3 corpos especificamente na superfície dos roletes de carga.

Para desenvolvimento do abrasômetro o projeto base foi de acordo com os parâmetros da norma técnica ASTM G65. Algumas implementações foram adicionadas de modo que não comprometam as funções básicas proposto pela norma. A figura 23 ilustra o projeto do abrasômetro proposto pela norma ASTM G65.

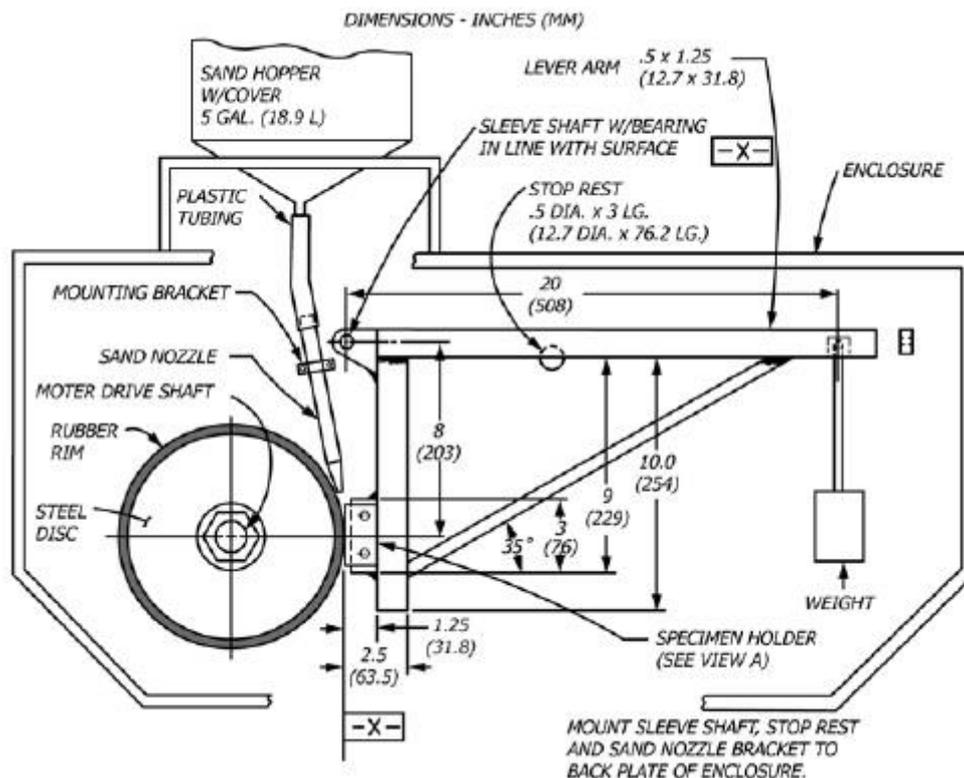


Figura 23: Projeto base proposto pela norma ASTM G65
Fonte: ASTM G65 (2015)

A figura 23 ilustra o projeto base proposto pela norma ASTM G65 com suas dimensões em polegadas. Algumas adaptações que não constam na norma ASTM G65 foram feitas para que pudesse adequar o equipamento com as paradas programadas durante o ensaio.

Foi adicionado uma válvula de abertura abaixo da mangueira do silo abrasivo para controlar a vazão do abrasivo e no eixo para fixação da roda revestida de borracha foi feito com sistema de fixação por chavetas. O porta amostras foi confeccionado com um furo “NPT” para que posteriormente seja elaborado um sistema de refrigeração e não seja mais necessário tempo de paradas durante o ensaio para resfriamento da borracha e o corpo de prova. Essas Alterações não mudam os padrões de ensaio previstos pela norma técnica ASTM G65.

A estrutura da máquina foi construída de aço SAE 1020, e as partes da máquina unidas mediante solda e arrebites. A figura 24 mostra a estrutura em aço para a confecção da máquina.



Figura 24: Estrutura em aço do Abrasômetro
Fonte: Pesquisa direta (2016)

É possível observar na figura 24 duas portas confeccionadas em chapa para proporcionar uma maior segurança na hora da realização dos ensaios e um pequeno orifício na porta esquerda para que mesmo com as portas fechadas, seja possível observar o ensaio sem precisar abri-las.

A transmissão constituiu-se de um motor de 1CV e um sistema flexível por correia-polia, para minimizar a vibração e obter a velocidade rotacional de 200 ± 10 rpm no disco recoberto com borracha vulcanizada. A figura 25 mostra o sistema de acionamento através de correia polia.



Figura 25: Sistema de acionamento motor polia
Fonte: Pesquisa direta (2016)

É possível ver na figura 25 um sistema de proteção de correias para dar mais segurança na operação e impedir que caia algum objeto sobre as correias evitando um travamento ou rompimento delas.

Foi colocado também um sistema de dupla correia para que na hora do ensaio o sistema tenha mais força e não ocorra um travamento do corpo de prova com a roda de borracha.

Seguindo os padrões de configuração básica da norma técnica ASTM G65 e alguns ajustes necessários conforme mencionado para confecção da máquina, é possível observar na figura 26 a máquina confeccionada e pronta para uso:



Figura 26: Máquina de desgaste abrasivo
Fonte: Pesquisa direta (2016)

A figura 26 mostra um funil confeccionado com chapas para ajudar na coleta do abrasivo utilizado junto com o auxílio de um balde.

A figura 27 ilustra a configuração dos roletes de carga dentro do sistema do transportador de correias em que os roletes de carga são submetidos.



Figura 27: Configuração dos roletes de carga dentro do sistema do transportador de correias
Fonte: Alvarenga (2014)

Conforme ilustra a figura 27, este desgaste é muito comum em casos onde há transbordo de material, contaminando e travando os roletes de carga. Os roletes de carga não devem, em hipótese alguma, trabalhar com seus rolamentos travados. Em caso de desgaste superficial ou contaminação do rolamento, o rolete de carga deve imediatamente ser substituído, caso contrário é grande o risco de danos na correia. A perda de material pode ser muito intensa, chegando ao eixo de rolamento dos roletes de carga.

Para identificação e classificação do rolete, a empresa Samarco fez uma doação de um rolete de carga utilizado nas correias transportadoras da empresa. A figura 28 mostra o rolete de carga doado pela empresa.



Figura 28: Rolete de carga doado pela empresa Samarco
Fonte: Pesquisa direta

O rolete de carga doado pela empresa (figura 28) é da marca Parcan Group.

Foi feito um contato com a empresa que fabrica os roletes para obter informação a respeito do material que é feito a superfície, ciclo de vida após entrar em operação e o tipo de revestimento superficial utilizado. O Aço utilizado na superfície do rolete é o SAE 1020 que é de fácil usinabilidade, alta tenacidade e baixa dureza. É aplicado na mecânica em geral como peça comum por ter baixo custo e um aço de baixo carbono, com conteúdo de carbono de 0,2%.

A superfície do rolete é levemente revestida por uma tinta chamada laranja Munsell 2,5YR6/14 mais conhecida como laranja segurança.

Após obter com precisão os dados pertinentes as características do rolete de carga, foram desenvolvidos corpos de prova utilizando o mesmo material da superfície dos roletes de carga, para estudar o desgaste que acomete a superfície do rolete de carga. A figura 29 mostra os corpos de prova.



Figura 29: Corpos de prova preparados para ensaio
Fonte: Pesquisa direta (2017)

Conforme mostra a figura 29 duas amostras estão sem revestimento, para verificar se a rugosidade superficial sem o revestimento interfere na taxa de desgaste.

Dos diversos tipos de desgaste que acometem a superfície dos roletes de carga, o principal é desgaste abrasivo severo por 3 corpos, devido a contaminação por minério. Com o movimento contínuo da correia, a superfície dos roletes de carga é desgastada uma vez que uma correia transportadora em atrito com o corpo abrasivo no meio interfacial provoca o desgaste acelerado da borracha da correia podendo causar incêndio. Esse atrito pode também consumir o corpo do rolete de carga, ocorrendo perda gradativa de material da superfície.

Analisando a configuração particular de desgaste abrasivo, o estudo se baseia em observações feitas por meio de ensaios em laboratório. Para realização do ensaio de desgaste abrasivo a 3 corpos foi realizada uma simulação bem próxima das condições de campo em que os roletes de cargas são submetidos.

Dentre vários procedimentos de ensaio tabelados na norma ASTM G65 foi escolhido o procedimento “A” que é um ensaio relativamente severo que lista materiais de baixa a extrema resistência abrasiva. O abrasivo foi criteriosamente selecionado pelas peneiras 50 AFS que tem a malha de 300 μm e a peneira de 70 AFS que tem a malha de abertura de 212 μm . Logo, o tamanho médio das partículas fica em torno de 125-150 μm . Para cálculo do tempo de ensaio de 6000 ciclos para uma roda que gira a 200 rpm equivale a 30 minutos.

Como a rotação da roda da máquina utilizada é de 210 rpm para 6000 ciclos o tempo é reduzido para 28,6 minutos.

Sendo assim foram analisadas duas amostras com o revestimento laranja Munsell e duas amostras sem o revestimento para observar se o comportamento desse aço perante ao desgaste seria alterado nas mesmas condições de ensaio

Mesmo as duas amostras com revestimento, elas foram preparadas com a mesma rugosidade das amostras sem revestimento. A rugosidade foi medida com a utilização de um rugosímetro digital. Na figura 30 é possível observar a leitura da rugosidade superficial da amostra.



Figura 30: Leitura da rugosidade superficial com rugosímetro
Fonte: Pesquisa direta (2017)

É possível ver na figura 30 a leitura da rugosidade abaixo de $0,8 \mu\text{m}$ como o recomendado pela norma ASTM G65. Foram feitas 3 leituras de rugosidade do corpo de prova e utilizado a média aritmética simples das leituras.

Porém ao fazer a leitura novamente nas amostras com revestimento foi notado que a rugosidade diminuiu drasticamente chegando a valores inferiores a $0,1 \mu\text{m}$.

Fazendo a leitura da pesagem foi observado que as amostras que tinham revestimento apresentaram massas um pouco superior as amostras que não tem revestimento.

A Figura 31 mostra a pesagem da amostra sem revestimento (esquerda) e a amostra com revestimento (direita).

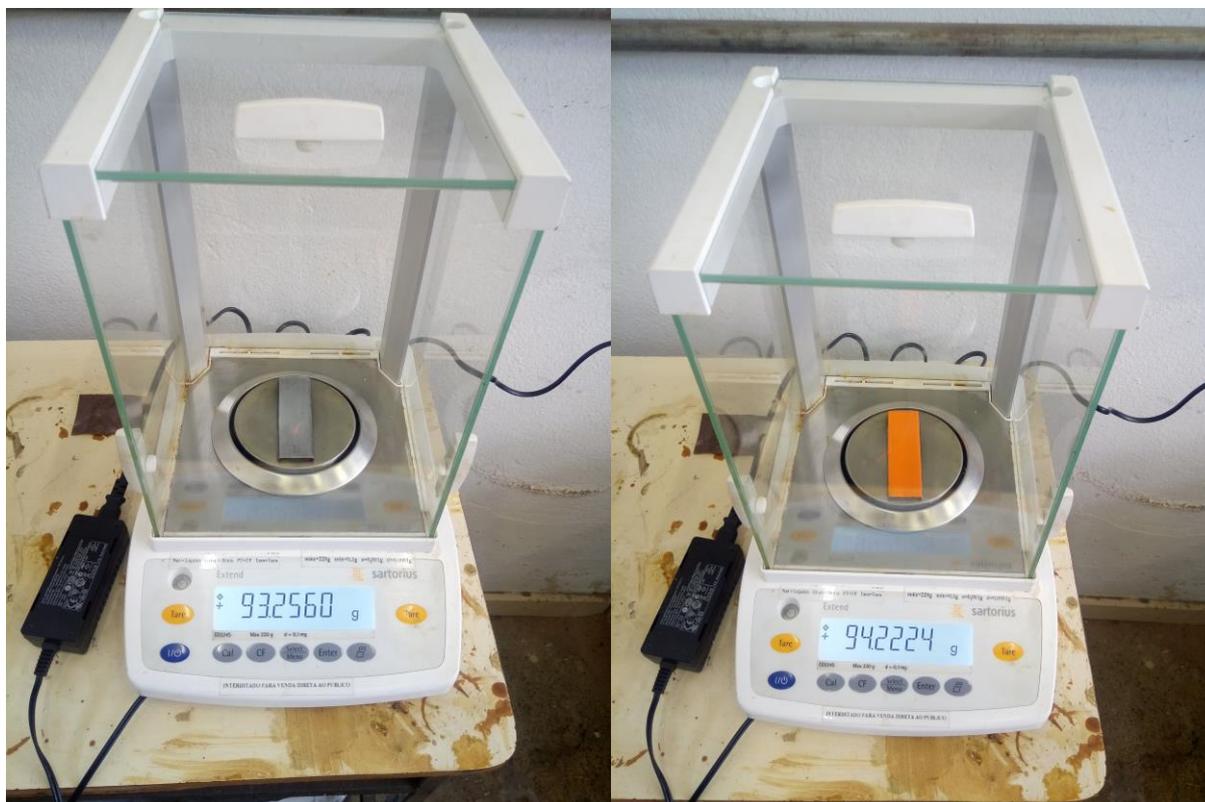


Figura 31: Amostra sem revestimento (esq) amostra com revestimento (dir)
Fonte: Pesquisa direta (2017)

A figura 31 mostra a pequena diferença de peso da amostra sem revestimento para a amostra com revestimento.

Após os procedimentos iniciais as 4 amostras foram submetidas ao ensaio. Durante o ensaio foi feito um intervalo de três em três minutos para que a borracha e o corpo de prova pudessem resfriar. A leitura da temperatura do corpo de prova durante o ensaio foi feita utilizando um termômetro infravermelho.

As tabelas 5 a 8 mostram os respectivos resultados para cada amostra. O resultado do coeficiente de desgaste foi utilizado para cálculo na equação de Archard (equação 1) já para o volume retirado em mm^3 (taxa de desgaste) foram utilizadas as equações 3 e a 4 para ajuste.

Tabela 4: Dados amostrais da amostra 1

Amostra 1 sem revestimento	
Massa Inicial	93,2560 g
Massa Final	91,9283 g
Diâmetro da roda após ensaio	228,3 mm
Dureza Vickers	147 HV0,5
Taxa de desgaste ajustada	169,14 mm ³
Coefficiente de desgaste K	0,044
Temperatura Máxima de ensaio	78° C
Rugosidade	0,645 µm

Fonte: Pesquisa direta (2017)

Tabela 5: Dados amostrais amostra 2

Amostra 2 sem revestimento	
Massa Inicial	93,3554 g
Massa Final	92,0543 g
Diâmetro da roda após ensaio	228,2 mm
Dureza Vickers	146 HV0,5
Taxa de desgaste ajustada	165,90 mm ³
Coefficiente de desgaste K	0,0432
Temperatura Máxima de ensaio	79,2° C
Rugosidade	0,625 µm

Fonte: Pesquisa direta (2017)

É possível observar nas tabelas 5 e 6 que perda média de material foi de $167,52 \pm 1,62$ mm³ para as amostras 1 e 2 com um coeficiente de variação de 0,96%. Resultado satisfatório e

dentro da faixa limite da norma ASTM G65. As tabelas 7 e 8 são dados amostrais referentes as amostras 3 e 4.

Tabela 6: Dados amostrais da amostra 3 com revestimento

Amostra 3 com revestimento	
Massa Inicial	94,2224 g
Massa Final	93,4203 g
Diâmetro da roda após ensaio	228,0 mm
Dureza Vickers	142 HV0,5
Taxa de desgaste ajustada	102,30 mm ³
Coefficiente de desgaste K	0,0257
Temperatura Máxima de ensaio	78,1° C
Rugosidade	0,114 µm

Fonte: Pesquisa direta (2017)

Tabela 7: Dados amostrais da amostra 4 com revestimento

Amostra 4 com revestimento	
Massa Inicial	94,0736 g
Massa Final	93,2600 g
Diâmetro da roda após ensaio	228,0 mm
Dureza Vickers	145 HV0,5
Taxa de desgaste ajustada	109,9 mm ³
Coefficiente de desgaste K	0,027
Temperatura Máxima de ensaio	77,2° C
Rugosidade	0,120 µm

Fonte: Pesquisa direta (2017)

É possível observar nas tabelas 7 e 8 que a perda média de material foi de $103,1 \pm 0,8$ mm³ para as amostras 3 e 4 com um coeficiente de variação de 0,77%. Resultado também satisfatório e dentro da faixa limite da norma ASTM G65.

Após os resultados obtidos a figura 32 mostra um comparativo entre as amostras sem revestimento e com revestimento em relação a taxa de desgaste:

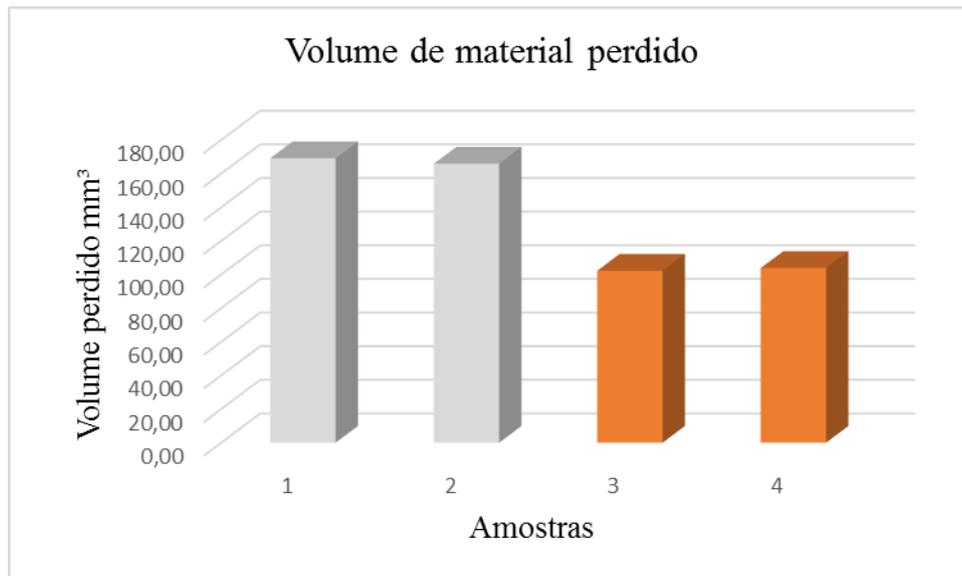


Figura 32: Indicador comparativo de volume perdido das amostras ensaiadas
Fonte: Pesquisa direta (2017)

Observa-se na figura 32 que as amostras 3 e 4, que possuem o revestimento, sofreram bem menos desgaste que as amostras 1 e 2. Nesse caso comprova-se que a rugosidade interfere sistematicamente na taxa de desgaste, ou seja, o aumento da rugosidade causa o aumento do desgaste pois quanto maior a rugosidade maior será o atrito e maior a perda de material quando existir movimento relativo entre 2 ou 3 corpos.

O coeficiente de desgaste também diminuiu quase pela metade das amostras 3 e 4 para as amostras 1 e 2, já que quanto maior for o “K” maior será a taxa de desgaste ou seja ele mede a severidade do desgaste provando mais uma vez que o revestimento ajuda a combater o desgaste abrasivo na superfície do rolete de carga.

O ensaio com o Abrasômetro do tipo roda de borracha pode ser considerado satisfatório, pois após os testes realizados nota-se que se obteve uma proximidade muito grande de valores da taxa de desgaste entre as amostras. Logo, o equipamento mostra boa confiabilidade para realização de ensaio de desgaste abrasivo a 3 corpos.

Os testes são possíveis porque o desgaste é um fenômeno que pode ser determinado por testes em tribossistemas, onde parâmetros como propriedades da superfície, composição química do material, distância de deslizamento, velocidade e carga aplicada, devem ser analisados para uma melhor compreensão dos mecanismos de desgaste.

O Abrasômetro mostrou após os ensaios que é possível reproduzir a configuração particular de ensaio em que os roletes são submetidos nas condições de campo. Pois a configuração do equipamento permitiu controlar as variáveis de entrada e obter as variáveis de saídas desejadas.

No geral o desgaste por 3 corpos se mostrou muito destrutivo. Apesar do revestimento nos roletes amenizar o desgaste pela diminuição da rugosidade, “fazendo com que as partículas abrasivas deslizem sobre as superfícies uma vez que se encontram soltas na prática pelo estudo não foi bem assim”. Isso se deve pelo fato de na prática o desgaste não envolver pontos localizados como a análise teórica define e sim toda extensão contaminada, o que leva em consideração toda a área atingida pelo desgaste.

Daí o motivo do desgaste abrasivo a 3 corpos se mostrar bastante destrutivo principalmente nos roletes de carga de correia transportadora gerando grandes falhas e até perda total do componente.

As empresas fabricantes de roletes de carga não levam em consideração a falha do componente pelo desgaste abrasivo e sim pela vida útil do rolamento. Mas muitas das vezes o desgaste é tão severo que a superfície se desgasta muito antes do rolete atingir as horas de trabalho da vida útil do rolamento. Por isso se faz necessário o estudo do desgaste para que possa elevar a vida útil deste componente e otimizar a troca deles e reduzir as paradas não programadas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

No presente capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho e as recomendações cabíveis, visto os resultados e discussões acerca do desgaste abrasivo apresentado no capítulo quatro.

O propósito deste trabalho foi desenvolver o equipamento Abrasômetro ASTM G65 e verificar as contribuições do equipamento para análise de desgaste abrasivo em superfície de roletes de carga em correias transportadoras. Em alguns casos os roletes de cargas sofrem severos desgaste abrasivo a 3 corpos a ponto de chegar a ocorrer perda de material muito intensa, chegando ao eixo de rolamento dos rolos e o componente ficar totalmente inutilizável.

Logo a questão problema apresentada por esse trabalho foi: qual a contribuição do equipamento abrasômetro do tipo roda de borracha ASTM G65 para simular o desgaste abrasivo na superfície dos roletes de carga de transportadores de correia utilizados nas operações da indústria minero metalúrgica?

Para responder à pergunta, primeiramente foi constatado que o desgaste predominante na superfície dos roletes de carga que é confeccionado de aço SAE 1020 é o desgaste abrasivo a três corpos devido ao fato da grande abrasividade que o minério de ferro possui.

O equipamento pode mostrar que o perfil de desgaste revelou que na maioria das amostras analisadas o mecanismo de desgaste é o micro corte (ranhuras). O revestimento utilizado nos roletes ajuda a diminuir a rugosidade superficial provando que quanto menor a rugosidade, menor o atrito e menor a taxa de desgaste como diz Hutchings.

O ensaio só poderá ser validado se respeitado as variáveis de entrada mostrada no tribossistema como a temperatura, rugosidade, tipo de abrasivo, dureza, distancia de deslizamento, velocidade e carga.

O controle da temperatura é extremamente importante pois uma vez que ela esteja bastante elevada, a borracha diminui a taxa de desgaste e facilita a incrustação de partículas abrasivas e conseqüentemente reproduzindo um ensaio a dois corpos além da energia que será bastante dissipada no processo.

Com esta configuração do equipamento não é possível medir a força de atrito durante o ensaio, o que dificulta também calcular a energia dissipada no processo.

Analisando as amostras ensaiadas, as taxas de desgaste ficaram bem próximas com um coeficiente de variação bem baixo. Logo, os resultados são satisfatórios e o equipamento apresentou uma confiabilidade de 95%.

Na prática, o desgaste não envolve pontos localizados como a análise teórica define e a configuração do equipamento propõe, mas sim toda extensão contaminada; o que leva em consideração toda a área atingida pelo desgaste. “Daí” o real motivo dos roletes de carga terem sofrido um desgaste a três corpos muito severo gerando grandes falhas e perda total do componente antes dele atingir a vida útil do rolamento como estipula os fabricantes.

Portanto, conclui-se que o presente trabalho alcançou todos os seus objetivos e respondeu satisfatoriamente à questão problema. A máquina construída para o ensaio contribui para entender o fenômeno de desgaste abrasivo a três corpos, que a partir da análise dos resultados obtidos é possível realizar novos estudos com intuito de minimizar o desgaste abrasivo para que a vida útil e disponibilidade física dos componentes mecânicos seja maior.

5.2 Recomendações

- Estudo sobre novos revestimentos e novas ligas metálicas para minimizar o desgaste abrasivo.
- “Foi feito um furo NPT” para que possibilite estudar e adotar um sistema de refrigeração seja líquido ou ar comprimido para que possa diminuir a temperatura de ensaio bem como as paradas para resfriamento da borracha.
- “Sugere” um sistema de carga pneumático bem como a automatização da máquina e implementação de sensores. Para que possa obter resultados mais precisos e diretos através de leituras por computadores, possibilitando calcular variáveis que na configuração mecânica atual é impossível como por exemplo a força de atrito.
- Fabricar bicos dosadores com dimensões diferentes das previstas pela norma, e assim possibilitar ensaios com outras taxas de vazão e outros tipos de abrasivo.
- Instalar um termopar para controle mais preciso da variação de temperatura das amostras durante o ensaio, já que a influência da temperatura é um fato comprovado nas literaturas, e ensaios comparativos com amostras refrigeradas e não refrigeradas poderá ser realizado.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABCOM 2017. Disponível em:

<http://www.abecom.com.br/produtos/correias-transportadoras/>

Acesso em Março 2017

ALVARENGA, L. C; **Desgaste abrasivo: o caso de desgaste de um transportador de correia de uma empresa mineradora.** UFOP Ouro Preto, 2014.

ASTM 2015. Disponível em:

https://www.astm.org/global/images/what_is_astm_portuguese.pdf

Acesso em outubro 2016

ASTM G65, 2015. **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus.** Annual Book of ASTM Standards Volume 03.02, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 247-259.

BORIK, F., **Using test to define the influence of metallurgical variables on abrasion,** *Metal Engineering Quarterly*, 1972, p. 33-39.

BUDINSKI. K. G. **surface Engineering for Wear Resistance.** Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.

CARPINETTI, Costa, P. H. – **Efeito do nióbio em ferros fundidos brancos ligados ao cromo e molibdênio.** USP. 1985. PAG. 109.SÃO PAULO.

CASTRO. C. A. F. **Resistência ao desgaste Abrasivo das Sapatas de Trator de Esteira após o Processo de Recuperação.** UTFPR, Curitiba, 2010.

CATERPILAR GLOBAL MINING. **Influenciar o Desempenho de Equipamentos Através de Métricas de Manutenção,**2008. Disponível em:

< https://mining.cat.com/cda/files/2785445/12/metrics_pt.pdf>. Acesso em: 11/11/2016.

CRISGUI 2012. **Catálogo de roletes.** Disponível em:

<<http://crisgui.com.br/produtos.php>> Acesso em 06/02/2017

CZICHOS, HORST. (1978). **Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear.** Elsevier Scientific Publishing Company.

DALLMANN.J. **Projeto, Construção e Validação De Um Abrasômetro Roda De Borracha.** UDESC, Joinville, SC, 2012.

DEMO, Pedro. **Metodologia científica em ciências sociais.** 3. ed. São Paulo: Atlas, 1995.

EYRE, T. S. **Friction and wear mechanisms of metals,** In: **II Seminário Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste, Uberlândia,** ABM 1991, Anais, p.263-292.

FANG, L. et. al., **Movement Patterns of abrasive Particles in Three-Body Abrasion,**

Wear, v.162-164, 1993, pp. 782-789.

FISHER J, Jin Z, Tipper J, Stone M, Ingham E. **Tribology of alternative bearings**. *Clin Orthop Rel Res* 2006; 453: 25-34.

FULLER, D. D.; **Theory and Practice of Lubrication for Engineers**. John Wiley & Sons, 1984

GAVI. J. de P. **Manual de Inspeção e Manutenção de Correias Transportadoras – GEOPS**. 4º edição, vitória 2009.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GILLET, H. W., **Considerations involved in the wear testing of metals**. ASTM.

Paper, from symposium of wear of metals, Phila, 1937.

GREGOLIN, J. A. R. – **Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr- (Nb) Resistentes ao Desgaste**. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas (1990).

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 1992. 280p.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Evolução da Produção Mineral Brasileira (PMB)**, 2015. Disponível em: < <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005414.pdf>> Acesso em : 22/11/2016.

IMEPEL 2016. Disponível em < <http://www.imepel.com.br/empresas>> Acesso em 07/02/2017.

JOST, H. P., 1990, “**Tribology-origin and future**”, *Wear*, v.136, pp.1-17.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, Petrobras, 2009.

KATO, K. Adachi, K., 2001, “**Wear Mechanisms**”, *MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK*, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22.

NORMANN, T. W., LOEB, C. M., **Wear tests on grinding balls**, *Transactions of the metallurgical society of AIME*, 1948, Vol. 176, PAG. 490-526.

PASCOALI. S. **Introdução ao Desgaste Abrasivo**. Florianópolis, SC, 2004.

PINHEIRO, João César de Freitas. **A importância econômica da mineração no Brasil**, 2011. Disponível em: < <http://investimentos.mdic.gov.br/public/arquivo/arq1314392332.pdf>>. Acesso em 21/11/2016.

POLIT, D.F.; BECK, C.T.; HUNGLER, B.P. **Fundamentos de Pesquisa em Enfermagem: métodos, avaliação e utilização**. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

RABINOWICZ, E. et al. **Friction and wear of materials**. 2a.Ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

- SACRAMENTO, R. C. F. **Transportadores Contínuos para Granéis Sólidos**. Capítulos 5 e 7. UFBA, 2004.
- SILVA, E. L. MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4ª ed. 2005 - Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
- SILVA, L.R. T; SEVERINO, M.R **Análise do papel estratégico da gestão da manutenção na indústria de mineração**. In: **XXXV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2015, Fortaleza, Universidade federal de Goiás p.10-11, 2015.
- STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W., **Engineering Tribology**, 3rd Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- STACHOWIAK, G. W. e Batchelor, A. W.; **Engineering Tribology**; Department of Mechanical and Materials Engineering; University of Western Australia; Australia 2007; 769 páginas.
- STOETERAU. R. L. **Tribologia** – EMC 5315 – Universidade Federal De Santa Catarina, 2004
- SUZUKI, R. S. **Projeto e construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre**. São Bernardo Do Campo, SP. 2013. Projeto de pesquisa. Centro universitário da FEI, 2013.
- SWINDERMAN, R. T; MARTI, A. D; GOLDBECK, L.J; MARSHAL, D; STREBEL, M.G. Foundation – **Guia Prático para Controle mais Limpo, Seguro e Produtivo de Pó e Material**. 4ª edição, Martin Engineering Company, Neponset Illinois, EUA, 2009.
- TOMANIK, E. **Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 2000.
- TCCHIPTSCHIN, A. P.; Sinátora, A. – **Comportamento em desgaste de ferros fundidos brancos de alto cromo revenidos contendo vanádio**. Anais do 45º congresso anual da ABM. 1990. Rio de Janeiro – RJ. PG. 19 – 31.
- TREZONA, R. I., ALLSOPP, D. N., HUTCHINGS, I. M., **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test**, *Wear* 225 – 229, 1999. 205–214
- VILLÁBON, L; SINATORA. A. **Construção e Instrumentação de Abrasômetro do Tipo Roda de Borracha Para o Estudo do Comportamento Tribológico de Aços**. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Lisboa, v. 13, p. 1-11, 2006
- YAMAGUCHI, Y. **Tribology of plastic materials**. *Tribology*, vol.16, 1990.

ZUM-GAHR, K-H., 1987, "**Microstructure and Wear of Materials**", Tribology Series, 10, Elsevier, pp. 1-6,

ZUM GAHR, K. H., **Wear by hard harticles**, Tribology International Vol. 31, No. 10, pp. 587–596, 1999