

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA - DAMEC  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNA GABRIELLY GRANGEIRO DA SILVA**

**ANÁLISE DE DESGASTE EMPREGANDO UM TRIBÔMETRO RODA DE  
BORRACHA DESENVOLVIDO NA UTFPR-CP**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016**

**BRUNA GABRIELLY GRANGEIRO DA SILVA**

**ANÁLISE DE DESGASTE EMPREGANDO UM TRIBÔMETRO RODA DE  
BORRACHA DESENVOLVIDO NA UTFPR-CP**

Trabalho de conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos  
Elias da Silva Junior

**CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016**



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Câmpus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Mecânica**  
**Curso de Engenharia Mecânica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Bruna Gabrielly Grangeiro da Silva**

### **ANÁLISE DE DESGASTE EMPREGANDO UM TRIBÔMETRO RODA DE BORRACHA DESENVOLVIDO NA UTFPR-CP**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:30hs do dia 19/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Mecânica no curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Professor Dr. Carlos Elías da Silva Júnior - (Presidente)

---

Professora M. Sc. Émillyn Ferreira Trevisani Olivo - (Membro)

---

Professor M. Sc. Celso Alves Correa - (Membro)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e a minha família, por me proporcionarem a oportunidade de estar terminando mais essa etapa da minha vida. Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior, pela ajuda prestada durante todo o trabalho de conclusão de curso e por aceitar me orientar.

À Profa. M.Sc. Émillyn Ferreira Trevisani Olivo e à Profa. Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves que esclareceram minhas dúvidas durante o desenvolvimento do trabalho, ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) pela permissão do uso da oficina mecânica e ao funcionário Wanderlei Malaquias pela ajuda prestada. Aos responsáveis pelos laboratórios que me permitiram usar os equipamentos para que o presente trabalho pudesse ser concluído.

Ao aluno José Lucas de Andrade Gomes, que não se encontra mais na universidade, mas ainda assim gastou várias horas me ajudando no término do projeto do tribômetro pois o mesmo não se encontrava apto para uso.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

SILVA, Bruna Gabrielly Grangeiro. **Análise de Desgaste Empregando um Tribômetro Roda de Borracha Desenvolvido na UTFPR - CP.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

No presente trabalho foram realizados testes para análise de desgaste utilizando um Tribômetro Roda de Borracha. Os testes seguem os parâmetros propostos pela norma ASTM G-65. Para avaliar a repetibilidade do equipamento, corpos de prova foram confeccionados a partir dos aços AISI 1020 normalizado e AISI 1045 temperado e recozido. Os resultados mostraram uma boa repetibilidade da máquina bem como seu baixo coeficiente de variação de dados. Verificou-se que o dispositivo precisa de um melhor alinhamento de eixo e nova configuração de peso morto.

**Palavras-chave:** Tribologia. Desgaste. Tribômetro roda de borracha.

## **ABSTRACT**

SILVA, Bruna Gabrielly Grangeiro. **Wear Analysis Using a Rubber Wheel Tribometer Developed at UTFPR- CP.** 2016. Final project (Graduation) - Mechanical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

In the present work, tests were performed for wear analysis using a Rubber wheel tribometer. The tests follow the parameters proposed by ASTM G-65. To evaluate the repeatability of equipment, specimens were made from AISI 1020 quenched and AISI 1045 tempered and annealed. The results showed a good repeatability of the machine as well as a low coefficient of variation data. Was verified that the device needs a better axis alignment and new configuration of dead weight.

**Keywords:** Tribology. Wear. Rubber wheel tribometer.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: TRIBÔMETRO CONSTRUÍDO POR LEONARDO DA VINCI.....	13
FIGURA 2: EXEMPLO DE UM SISTEMA TRIBOLÓGICO.....	14
FIGURA 3: PRINCIPAIS TIPOS DE DESGASTE. ....	16
FIGURA 4: TRANSFERÊNCIA DE MATERIAL NO DESGASTE POR ADESÃO. ....	18
FIGURA 5: EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS EM DESGASTE POR ADESÃO. ....	18
FIGURA 6: INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA CRISTALINA SOBRE O COEFICIENTE DE ADESÃO E DUREZA.....	19
FIGURA 7: RELAÇÃO CORROSÃO COM O TEMPO PARA (A) SISTEMA EM QUE SE FORMA UM FILME PROTETOR E (B) SISTEMA EM QUE NÃO OCORRE A FORMAÇÃO DO FILME. ....	20
FIGURA 8: SISTEMAS QUE SOFREM DANOS POR FADIGA SUPERFICIAL.....	21
FIGURA 9: MECANISMOS DE DESGASTE ENVOLVIDOS EM DESGASTE ABRASIVO. ....	23
FIGURA 10: DIAGRAMA DO EFEITO DA RELAÇÃO DE DUREZA SOBRE A TAXA DE DESGASTE. ....	24
FIGURA 11: TIPOS DE ABRASÔMETROS MAIS COMUNS. ONDE: A) PINO SOBRE DISCO ABRASIVO; B) PINO.....	25
FIGURA 12: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EQUIPAMENTO RODA DE BORRACHA. ....	26
FIGURA 13: MARCAS DE DESGASTE DO CORPO DE PROVA (A) UNIFORME E ....	29
FIGURA 14: PERDA DE MASSA ESPERADA PARA O AÇO AISI 1045 RECOZIDO...30	
FIGURA 15: ASPECTO DOS CORDÕES DE SOLDA APÓS LIXAMENTO. ....	31
FIGURA 16: TRIBÔMETRO APÓS LIXAMENTO. ....	32
FIGURA 17: ESPECIFICAÇÃO DA RODA DE BORRACHA. ....	33
FIGURA 18: DIMENSÕES RECOMENDADAS DO BICO DOSADOR DO FLUXO DE AREIA.....	33
FIGURA 19: PROJETO DO TRIBÔMETRO DO TIPO RODA DE BORRACHA JUNTAMENTE COM SEU PROJETO. FONTE: ASTM G 65 (2010). ....	34

FIGURA 20: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE COMO A MASSA FOI INSERIDA NO .....	35
FIGURA 21: MEDIÇÃO DA VAZÃO DE ABRASIVO.....	36
FIGURA 22: CORPOS DE PROVA RETIFICADOS.....	38
FIGURA 23: (A) BALANÇA DE PRECISÃO E (B) RUGOSÍMETRO UTILIZADOS.....	39
FIGURA 24: FORNO MUFLA UTILIZADO.....	41
FIGURA 25: INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	44
FIGURA 26: CORPO DE PROVA SENDO.....	45
FIGURA 27: MORFOLOGIA DA AREIA NORMAL BRASILEIRA.....	46
FIGURA 28: DADOS DA FASE INICIAL DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO (SEM O ANEL ELÁSTICO).....	47
FIGURA 29: DADOS DA FASE INICIAL DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO (COM ANEL ELÁSTICO). .....	48
FIGURA 30: DADOS ENCONTRADOS NOS ENSAIOS DO AÇO AISI 1045 RECOZIDO.....	49
FIGURA 31: MARCAS DE DESGASTE APÓS ENSAIO DO AÇO AISI 1045 RECOZIDO.....	50



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO TIPO DE DESGASTE.....	16
TABELA 2: MATERIAIS E MÉTODOS PARA VALIDAÇÃO DO ABRASÔMETRO.....	27
TABELA 3: PARÂMETROS DO EQUIPAMENTO E DO ENSAIO.....	27
TABELA 4: COMPOSIÇÃO DE CADA AÇO (% EM MASSA).....	37
TABELA 5: VALORES DE MASSA INICIAL E FINAL DO AÇO AISI 1045 TEMPERADO. .....	39
TABELA 6: VALORES DE MASSA INICIAL E FINAL DO AÇO AISI 1020 NORMALIZADO. ....	40
TABELA 7: VALORES DE MASSA INICIAL E FINAL DO AÇO AISI 1045 RECOZIDO.	40
TABELA 8: VALORES DE DUREZA PARA O AÇO AISI 1045 TEMPERADO.....	42
TABELA 9: VALORES DE DUREZA PARA O AÇO 1045 TEMPERADO E RECOZIDO. .....	42
TABELA 10: RUGOSIDADE RA DO AÇO AISI 1020 NORMALIZADO.....	43
TABELA 11: RUGOSIDADE RA DO AÇO AISI 1045 RECOZIDO.....	43

## LISTA DE SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
kg	Quilograma
N	Newton
NBR	Normas brasileiras regulamentadoras
RPM	Rotações por minuto
SICITE	Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
2.1 SISTEMAS TRIBOLÓGICOS .....	14
2.2 TIPOS DE DESGASTE .....	15
2.2.1 DESGASTE POR ADESÃO .....	17
2.2.2 DESGASTE POR CORROSÃO .....	20
2.2.3 DESGASTE POR FADIGA SUPERFICIAL .....	20
2.2.4 DESGASTE POR ABRASÃO .....	22
2.2.5. TIPOS DE ENSAIOS PARA DESGASTE ABRASIVO .....	25
2.2.6 PARAMETROS DE ENSAIO PARA ANÁLISE DE DESGASTE .....	29
3.1 DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS .....	35
3.2 CALIBRAÇÃO DO TRIBÔMETRO .....	36
3.2.1 ANÁLISE DE DESGASTE .....	36
3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	37
3.4 ANÁLISE DE DESGASTE EMPREGANDO O TRIBÔMETRO RODA DE BORRACHA .....	44
3.5 MORFOLOGIA DO ABRASIVO .....	45
4.1 ENSAIOS PARA CALIBRAÇÃO DO TRIBÔMETRO .....	47
4.2 ANÁLISE DE DESGASTE .....	49
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	51
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

Uma vez que nas indústrias uma das maiores preocupações em questão de perdas financeiras e operacionais decorrem do desgaste dos materiais, sendo ele responsável por paradas de maquinário para manutenção e troca de peças danificadas além da quebra das mesmas, é de suma importância que engenheiros mecânicos saibam reconhecer e aplicar técnicas que as minimizem.

Há muitos tipos de desgaste e o principal responsável por parada de máquinas, quebra de peças e perda de material de partes dos equipamentos é o desgaste abrasivo, pois ele remove gradativamente material das partes móveis em contato com movimento relativo entre as superfícies de contato ou entre a superfície de contato em relação a alguma substância que esteja entre as partes, fazendo assim com que a parte em questão não desempenhe seu papel de maneira eficiente, podendo acarretar não só em prejuízos à produtividade, mas também em custos adicionais para empresa em manutenções que não seriam necessárias se tais problemas fossem evitados. Existem também outros tipos de desgaste como erosão, deslizamento e fadiga, os quais são comumente observados.

Segundo EYRE (1978), o desgaste pode ser definido como a degradação da superfície do componente ou do equipamento. Ele observou que o desgaste do tipo abrasivo é a mais frequente forma de ocorrência em inúmeros segmentos industriais, contribuindo com cerca de 50% dos problemas industriais envolvendo desgaste.

Para a análise e estudo de tal fenômeno é utilizada a Tribologia, e um dos equipamentos que permite mensurar o quanto um material pode ser desgastado ou o nível de desgaste que o mesmo pode suportar é o tribômetro (ou abrasômetro) do tipo roda de borracha, o referido equipamento mede a taxa de desgaste através de um mecanismo no qual uma roda de borracha girante é posta em contato direto com o perfil a ser desgastado enquanto o abrasivo é escoado entre os mesmos.

O objetivo desse trabalho é realizar a análise de desgaste utilizando o tribômetro roda de borracha desenvolvido na UTFPR-CP segundo a norma ASTM G-65 - *Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus* (Método

de teste padrão para medição de abrasão usando dispositivo areia seca/roda de borracha). Os parâmetros definidos pela norma foram utilizados para fazer o projeto do mesmo e a escolha dos materiais adequados para realização dos experimentos.

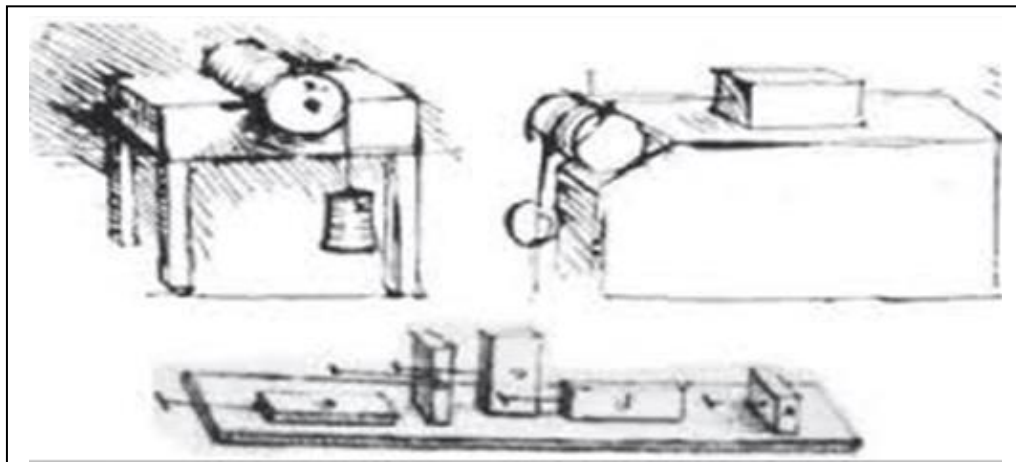
Após sua utilização, o tribômetro ficará disponível na UTFPR para uso em aulas práticas e/ou atividades de pesquisa, contribuindo assim para um melhor entendimento do fenômeno.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mais antiga evidência de Tribologia data do período paleolítico, com a descoberta do fogo pelo homem a partir do calor gerado pelo atrito entre pedaços de madeira ou a partir do choque entre pedras.

É conhecido o uso de brocas durante o período paleolítico, que eram apoiadas em mancais feitos de chifres ou ossos e serviam para fazer furos e produzir fogo. É possível supor que o desenvolvimento dos primeiros mancais progrediu a partir do momento em que o homem começou a empregar o movimento rotativo. (STOETERAU, 2004).

O uso de sistemas tribológicos na redução de atrito em movimentos lineares pode ser verificado no Egito antigo. Após a renascença, Leonardo da Vinci (1452 – 1519), o qual pode ser chamado de “pai da Tribologia moderna”, contribuiu para o entendimento dos fenômenos de atrito e desgaste. Através de seus estudos ele conseguiu medir forças de atrito em planos horizontais e inclinados, propôs uma distinção entre atrito de escorregamento e de rolamento e introduziu o coeficiente de atrito como sendo proporcional a força normal (ZUM GAHR, 1987). A Figura 1 mostra um dos tribômetros desenvolvidos por ele para o estudo da força de atrito.



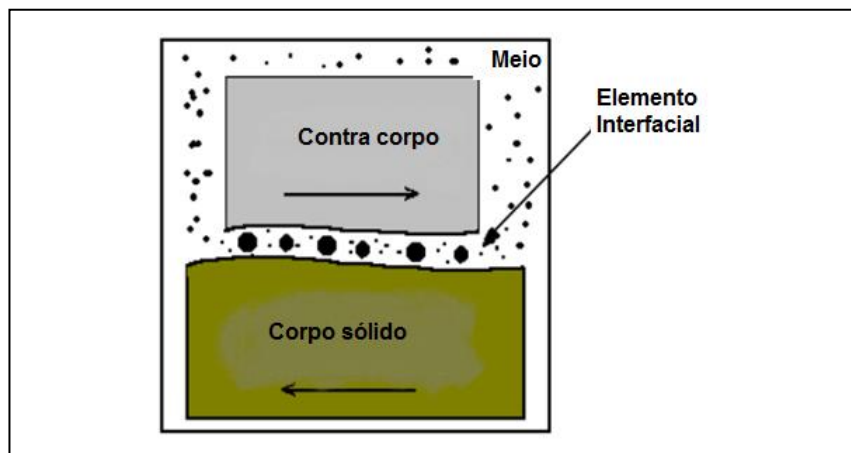
**Figura 1: Tribômetro construído por Leonardo da Vinci.  
Fonte: Stoeterau (2004).**

O atrito é definido como uma força natural que atua apenas quando um corpo desliza ou tenta deslizar sobre uma superfície. A força é sempre paralela à superfície e tem sentido oposto ao do deslizamento, se o corpo não se move com a aplicação da força tem-se o atrito estático, em contrapartida, se o movimento ocorre, tem-se o atrito cinético (HALLIDAY, RESNICK E WALKER, 2008).

## 2.1 SISTEMAS TRIBOLÓGICOS

Percebe-se a importância dos sistemas tribológicos quando se olha as propriedades dos corpos que irão interagir em um sistema, (suas superfícies de contato) bem como do lubrificante que será utilizado para minimizar os danos causados por essa interação. Um quarto elemento, o ambiente circundante à ligação, poderá de certa forma condicionar e caracterizar o conjunto. Este modelo designa-se por sistema tribológico ou tribosistema (SOBRAL, 2015).

O modo como um sistema tribológico é constituído é demonstrado na Figura 2 e o mesmo possui quatro elementos principais: corpo sólido, contra corpo, elemento interfacial e meio.



**Figura 2: Exemplo de um sistema tribológico.**  
Fonte: Canale (2012).

O contra corpo pode ser um sólido, líquido ou gás, ou então a mistura deles. A interação entre os elementos varia de acordo com a estrutura do tribosistema, podendo ocorrer interações físicas e químicas, resultando em destacamento de material de superfície do contra corpo e/ou da superfície do corpo sólido (CANALE, 2012).

Segundo SOBRAL (2015), para se caracterizar completamente a estrutura de um sistema tribológico deve-se indicar as propriedades dos elementos que o compõe, assim como suas inter-relações que são:

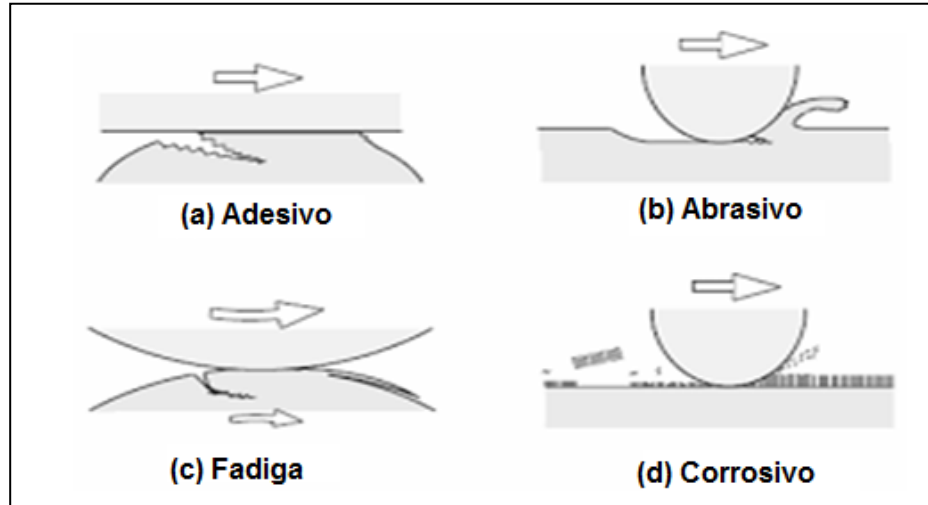
- A composição química, microestrutura metalúrgica e geometria dos corpos;
- As propriedades físico-químicas do lubrificante e seus aditivos;
- A temperatura e a agressividade química do ambiente;
- O tipo de contato e modo de lubrificação resultante;
- A reação química entre as superfícies de contato e certos aditivos;

## 2.2 TIPOS DE DESGASTE

Segundo a Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD – Organization for Economic Co-operation and Development) da ONU, desgaste pode ser definido como sendo um dano progressivo que envolve a perda de material, perda a qual ocorre na superfície de um componente como resultado de um movimento relativo a um componente adjacente (STOETERAU, 2004).

O desgaste é resultante de diferentes processos que podem ocorrer combinados ou de modo independente. Existem quatro formas principais de desgaste, as quais estão representadas na Figura 3.





**Figura 3: Principais tipos de desgaste.**  
**Fonte: Pereira (2012).**

Há ainda segundo ZUM GAHR (1987), algumas classificações quanto aos mecanismos de desgaste, as quais são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1: Classificação quanto ao tipo de desgaste.**

Fonte	Referência	Mecanismo de Desgaste
Burwell e Strang	(BURWELL; STRANG, 1952 <i>apud</i> ZUM GAHR, 1987)	Desgaste abrasivo, desgaste corrosivo, desgaste por fadiga, erosão, fricção e cavitação.
Jahanmir	(JAHANMIR, 1980 <i>apud</i> ZUM GAHR, 1987)	Adesão, delaminação, fricção, abrasão, erosão, desgaste por impacto, fadiga, desgaste por corrosão, desgaste difusivo e desgaste por contato elétrico.
Godfrey	(GODFREY, 1980 <i>apud</i> ZUM GAHR, 1987)	Desgaste adesivo baixo, desgaste adesivo severo, abrasão erosão, corrosão, delaminação, eletrocorrosão, fricção corrosiva, falha por cavitação, descarga elétrica e polimento.
Rice	(RICE, 1980 <i>apud</i> ZUM GAHR, 1987)	Adesão, abrasão, fadiga, corrosão ou oxidação.
Bhushan	(BHUSHAN; GUPTA, 1991)	Adesão, abrasão, fadiga, erosão, corrosão e desgaste por arco elétrico induzido.
DIN 50320	(DIN 50320, 1979)	Adesão, abrasão, fadiga e reação triboquímica.

**Fonte: Zum Gahr (1987).**

### 2.2.1 DESGASTE POR ADESÃO

Trata-se da forma de desgaste mais comumente encontrada. Segundo RABINOWICZ (1995), esse tipo de desgaste pode vir a ser um problema quando se tem dois materiais de mesma natureza de contato, ou quando ocorre uma lubrificação não eficiente e altas temperaturas, ou velocidades de escorregamento elevadas. Existe a perda progressiva de material de superfícies sólidas em movimento relativo, a junção entre as superfícies em contato, eventualmente, causa fratura de material de uma ou ambas as superfícies. Com o movimento relativo existe a possibilidade de o movimento não ocorrer na interface original, desta forma existe a ocorrência de solda fria em vários pontos da superfície em contato e a ruptura ou arrancamento desses pontos após o início do movimento entre as partes com a transferência de material de uma superfície para a outra (RIJEZA METALURGIA, 2011).

Segundo JUVINALL & MARSHEK (1991), quando a pressão de contato e o aquecimento proveniente do atrito ficam concentrados em locais com pequenas áreas de contato as temperaturas e pressões locais são extremamente elevadas e as condições ficam favoráveis para que haja uma união por soldagem nesses pontos. Caso ocorra fusão e soldagem das superfícies ásperas, ou a solda ou um dos metais perto da solda têm que falhar por cisalhamento para permitir que o movimento relativo entre as superfícies continue. Novas soldagens e correspondentes fraturas continuam ocorrendo, o que resulta no que é chamado de desgaste por adesão, o qual pode ser melhor entendido na Figura 4.

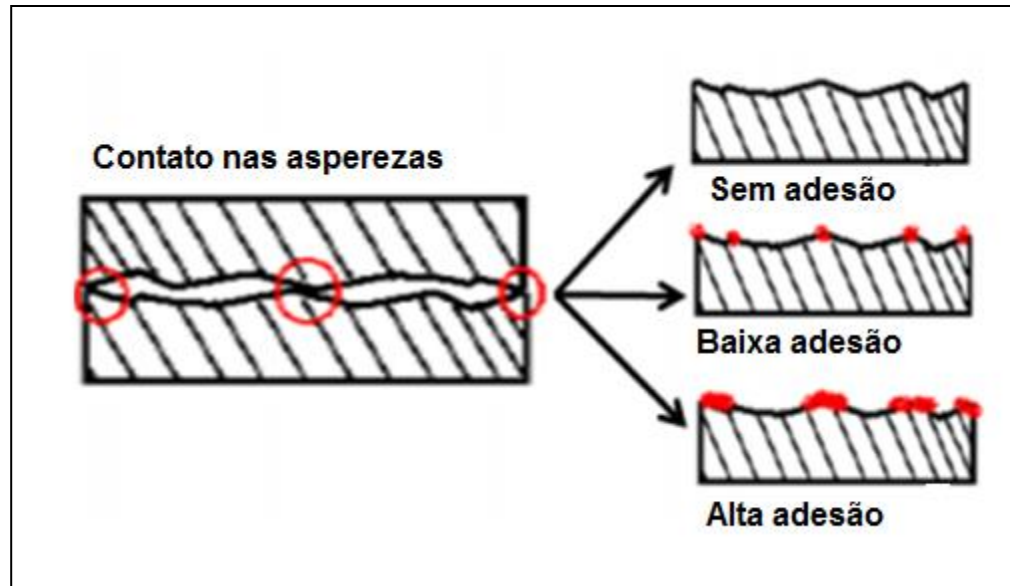


Figura 4: Transferência de material no desgaste por adesão.  
Fonte: Dallman (2012).

A Figura 5 mostra alguns equipamentos envolvidos em desgaste adesivo. São eles: cavidades de matrizes para extrusão, cames e seguidores, engrenagens, mancais, ferramentas de corte.

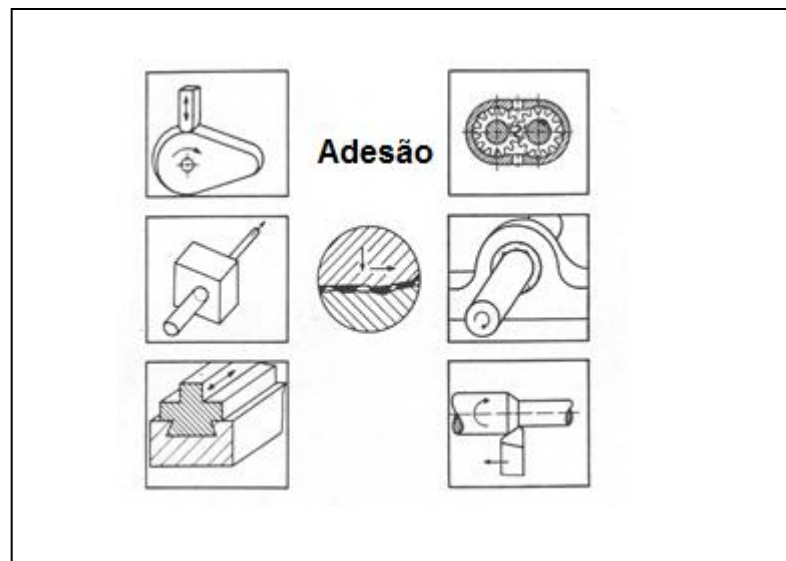


Figura 5: Equipamentos envolvidos em desgaste por adesão.  
Fonte: Zum Gahr (1987).

A adesão é influenciada pela resistência dos materiais, deformação plástica, estrutura do cristal e número de planos de escorregamento. Segundo ZUM GAHR (1987), a tendência a adesão aumenta da estrutura hexagonal compacta, para a estrutura cúbica de corpo centrado e para a estrutura cúbica de face centrada. A Figura 6 correlaciona a influência da estrutura cristalina sobre o coeficiente de adesão e dureza.

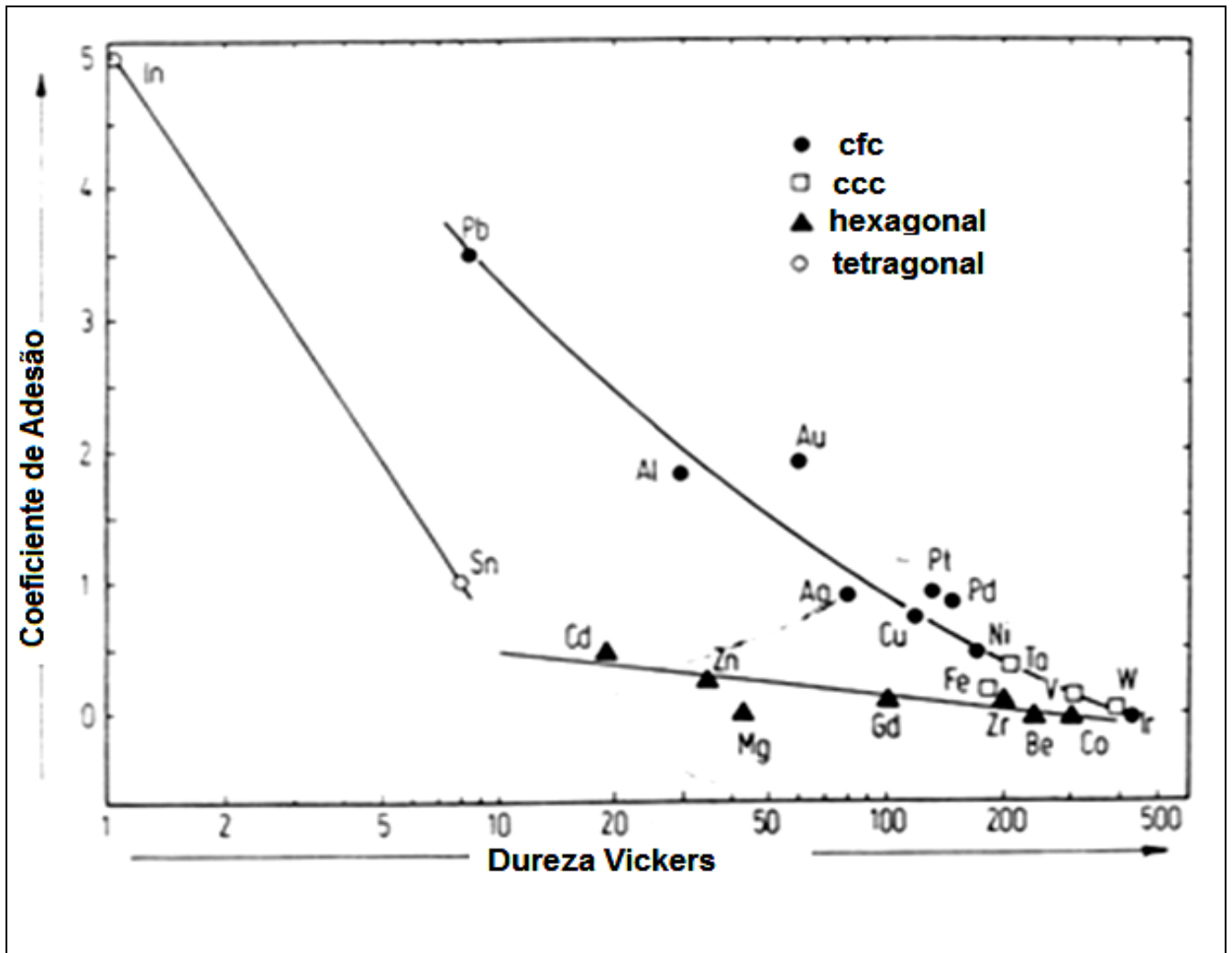


Figura 6: Influência da estrutura cristalina sobre o coeficiente de adesão e dureza.  
Fonte: Zum Gahr (1987).

### 2.2.2 DESGASTE POR CORROSÃO

O desgaste por corrosão ocorre através da transformação pela interação química ou eletroquímica de uma superfície em determinado ambiente. Tal transformação leva a degradação do material. Segundo STOETERAU (2004), o primeiro estágio do desgaste por corrosão é o ataque corrosivo da superfície. Quando uma superfície nua é exposta ao meio com o qual pode reagir, ocorre uma rápida reação inicial, a qual diminui com o decorrer do tempo, isto é mostrado na Figura 7. Após a diminuição dessa reação haverá a formação de um filme coeso na superfície que separa os dois elementos que estão reagindo. Em alguns casos, a reação química não irá parar pois não haverá a formação desse filme protetor.

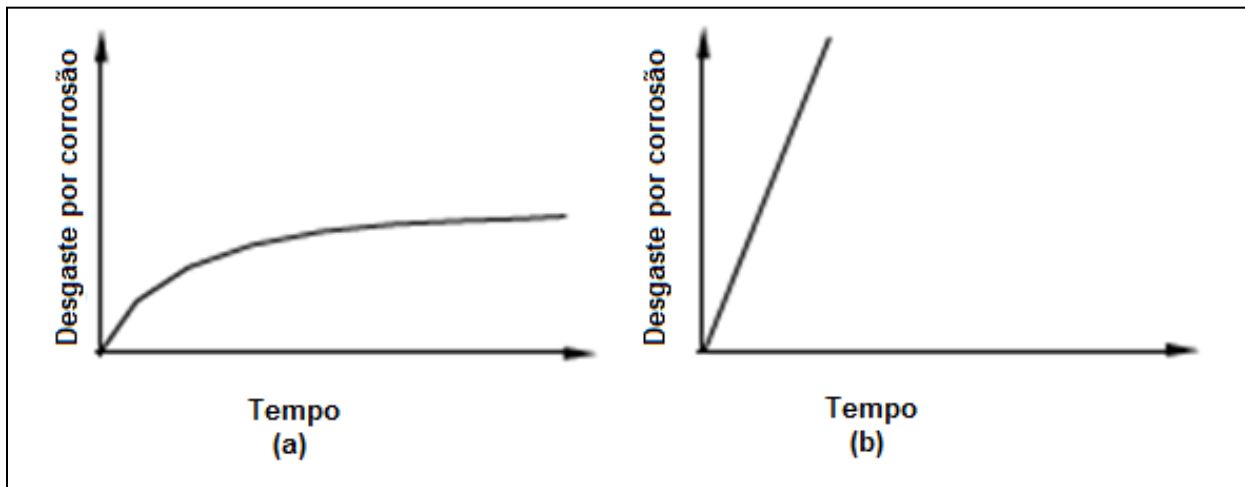


Figura 7: Relação corrosão com o tempo para (a) sistema em que se forma um filme protetor e (b) sistema em que não ocorre a formação do filme.

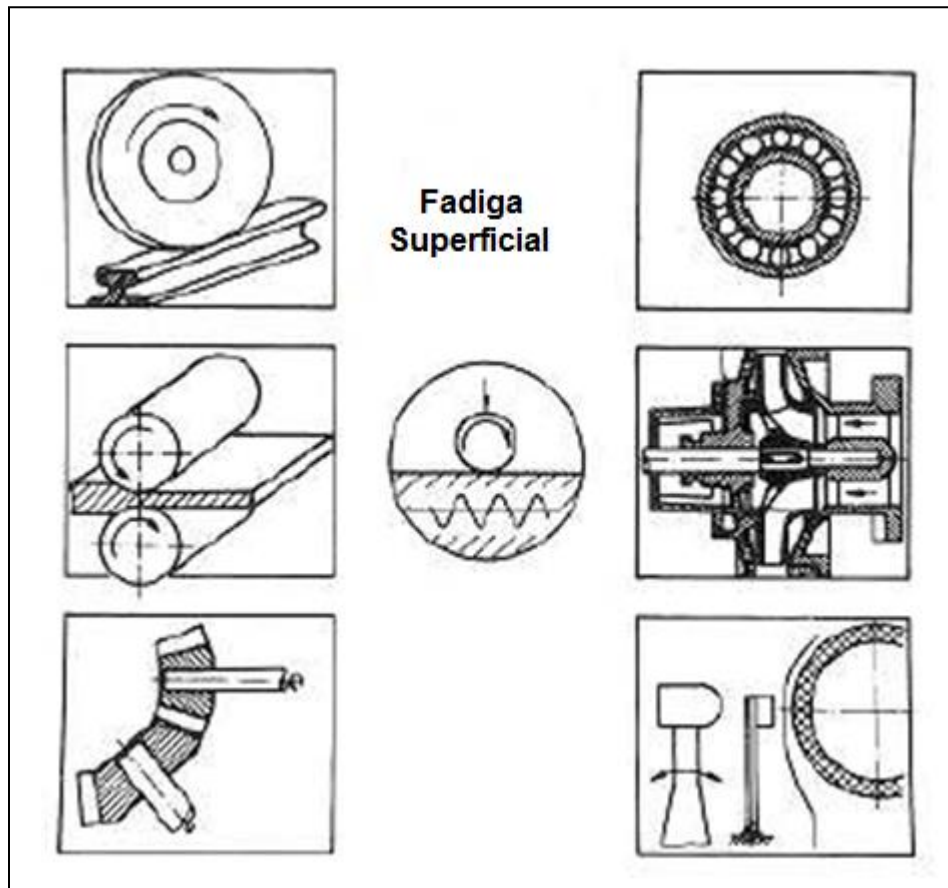
Fonte: Stoeterau (2004).

### 2.2.3 DESGASTE POR FADIGA SUPERFICIAL

A corrosão por fadiga é a ruptura com aplicação de tensão cíclica em presença de um meio corrosivo. Neste processo um material diminui a sua resistência à fadiga

em presença de um meio corrosivo. O desgaste por fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e por lascamento de material que é causado por carregamento alternado repetitivo de superfícies sólidas (ZUM GAHR, 1987).

De acordo com STOETERAU (2004), os crescimentos das trincas de fadiga superficial estão relacionados com a ação do óleo lubrificante que está entre as superfícies. Acredita-se que o óleo de baixa viscosidade que entra na trinca que apareceu na superfície fique preso pela superfície rolante, fechando a entrada da pista e ficando submetido a altas pressões enquanto o elemento rolante avança. Tal óleo sob alta pressão age como uma cunha que aumenta ainda mais a trinca. Alguns meios de formação de trincas superficiais podem ser observados na Figura 8.



**Figura 8: Sistemas que sofrem danos por fadiga superficial.**  
**Fonte: Zum Gahr (1987).**

## 2.2.4 DESGASTE POR ABRASÃO

Segundo STOETERAU (2004) o desgaste abrasivo é um dos mais frequentemente utilizados, e também um dos mais importantes por causar maiores danos à superfície e por ser o mecanismo que mais atua nos processos de conformação a frio.

O desgaste abrasivo acontece quando duas superfícies entram em contato com movimento relativo e uma certa carga provocam ranhuras entre elas. A superfície mais rugosa e dura tem a tendência de riscar a superfície mais mole. Pode ocorrer também quando um material duro e abrasivo é introduzido entre as superfícies deslizantes, provocando o desgaste (STOETERAU, 2004).

Tais formas de desgaste são conhecidas como processo de desgaste abrasivo de dois corpos e processo de desgaste abrasivo de três corpos, respectivamente.

Quando o desgaste envolve três corpos é cerca de duas a três vezes menor em comparação ao desgaste que envolve dois corpos. No desgaste a três corpos, devido a variação no ângulo de ataque, apenas uma pequena parte das partículas causam desgaste (ZUM GAHR, 1987).

Uma distinção geralmente é feita entre desgaste a dois e três corpos. Em sua maioria o desgaste abrasivo a dois corpos é denominado por deslizamento, quando a superfície dura e rugosa, ou macia contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície de dureza menor, produzindo ranhuras na mesma. O desgaste a três corpos pode ser denominado por rolamento, quando as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre as duas superfícies (HUTCHINGS, 1992).

Segundo ZUM GAHR (1999), a taxa de desgaste no caso de três corpos é menor, pois as partículas soltas ficam 90% do tempo rolando, e somente 10% do tempo em contato com a superfície.

Ainda segundo o autor, o desgaste abrasivo pode ser classificado de acordo com o micro mecanismo de abrasão, mostrado na Figura 9.

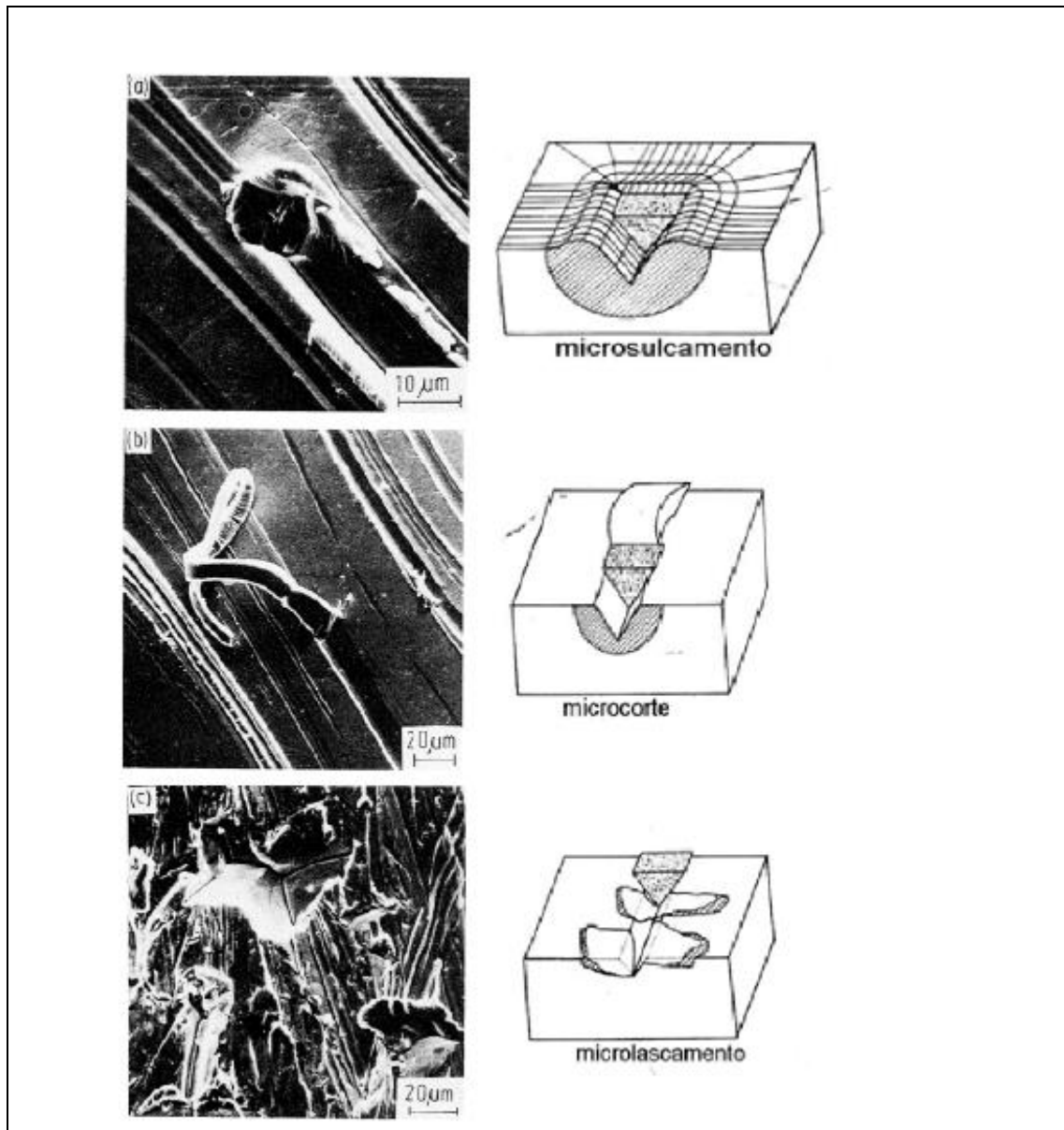


Figura 9: Mecanismos de desgaste envolvidos em desgaste abrasivo.  
 Fonte: Zum Gahr (1987).

Onde:

- **Micro-sulcamento:** deformações plásticas sem perda de material, gerando um sulco com conseqüente formação de acúmulos frontais e laterais do material movimentado. Em algumas situações, este micro mecanismo pode acarretar a perda de material, devido à ação simultânea ou sucessiva de muitas partículas abrasivas.



- **Micro-corte:** formação de micro-cavacos com pequena deformação plástica lateral.
- **Micro-lascamento:** formação de grandes partículas de abrasão devido à formação e interação de fissuras. Ocorre quando as tensões impostas superam as tensões críticas para a formação e propagação de trincas, sendo um mecanismo restrito a materiais frágeis.

A dureza relativa das partículas abrasivas é de vital importância na determinação da taxa de desgaste. Quando a razão dureza do material pela dureza do abrasivo, “r”, está abaixo de um valor crítico  $r_{c1}$ , tem-se o desgaste abrasivo como mecanismo predominante. A taxa de desgaste diminui na zona de transição, entre  $r_{c1}$  e  $r_{c2}$ , e quando atinge valores acima de  $r_{c2}$  o desgaste abrasivo cessa dando lugar a outros mecanismos de desgaste. Pode-se observar estes efeitos na Figura 10.

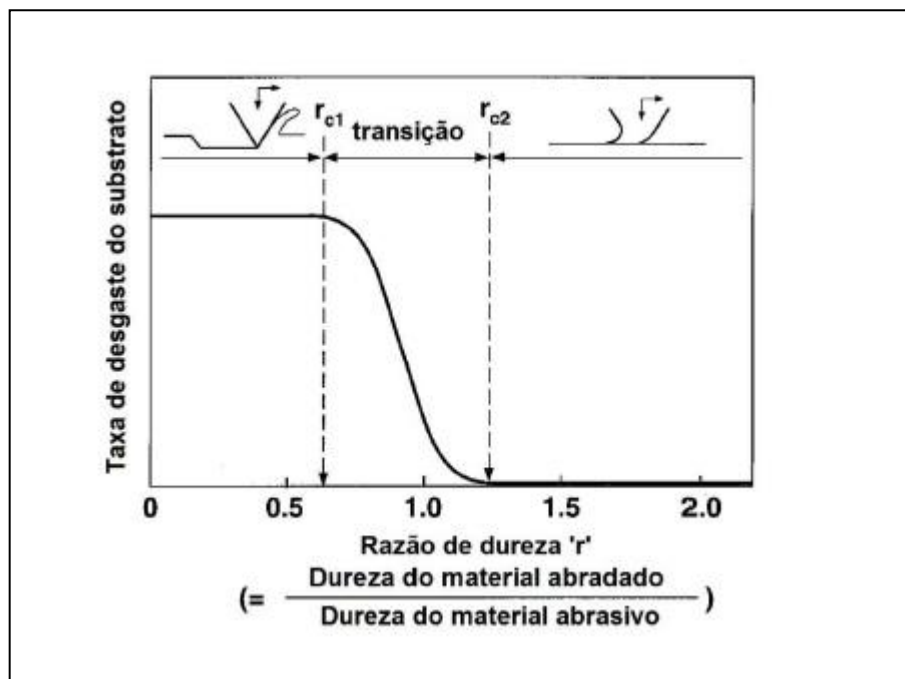


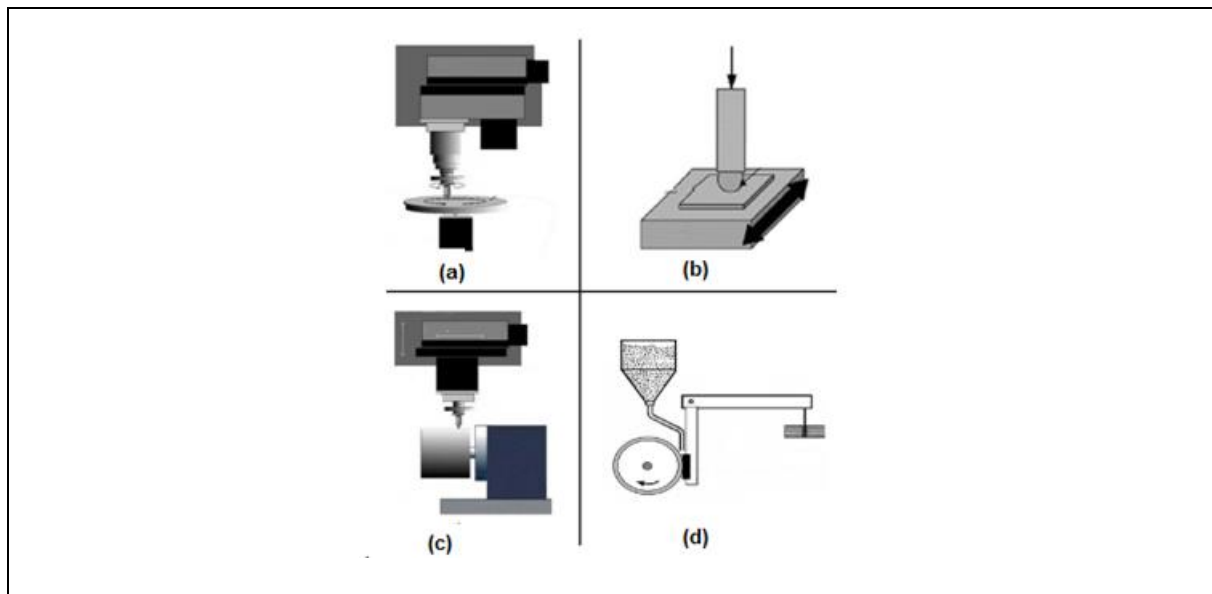
Figura 10: Diagrama do efeito da relação de dureza sobre a taxa de desgaste. Fonte: Bhushan (2001).

## 2.2.5. TIPOS DE ENSAIOS PARA DESGASTE ABRASIVO

Com a intenção de estudar a abrasão de metais, minerais e vidros, Mikhail Lomonosov, membro da Academia Científica de Moscou, realizou um dos primeiros ensaios de abrasão, entre 1745 e 1765. Seu equipamento era formado por um rebolo de diâmetro de 460 mm fixado em uma manivela e a aplicação da força normal sobre os corpos de prova era feita através de um peso morto. O ensaio sofreu algumas alterações em 1921, realizadas por Brinell. Ele substituiu o rebolo por um disco de aço de 100 mm de diâmetro e partículas de quartzo foram inseridas entre os corpos de prova e o disco (RUTHERFORD e HUTCHINGS, 1997).

Ainda segundo o autor em 1949 Haworth realizou o primeiro ensaio de abrasão utilizando uma roda de borracha. No mesmo ano Grodzinski realizou, pela primeira vez, um ensaio de micro-abrasão (por rolamento).

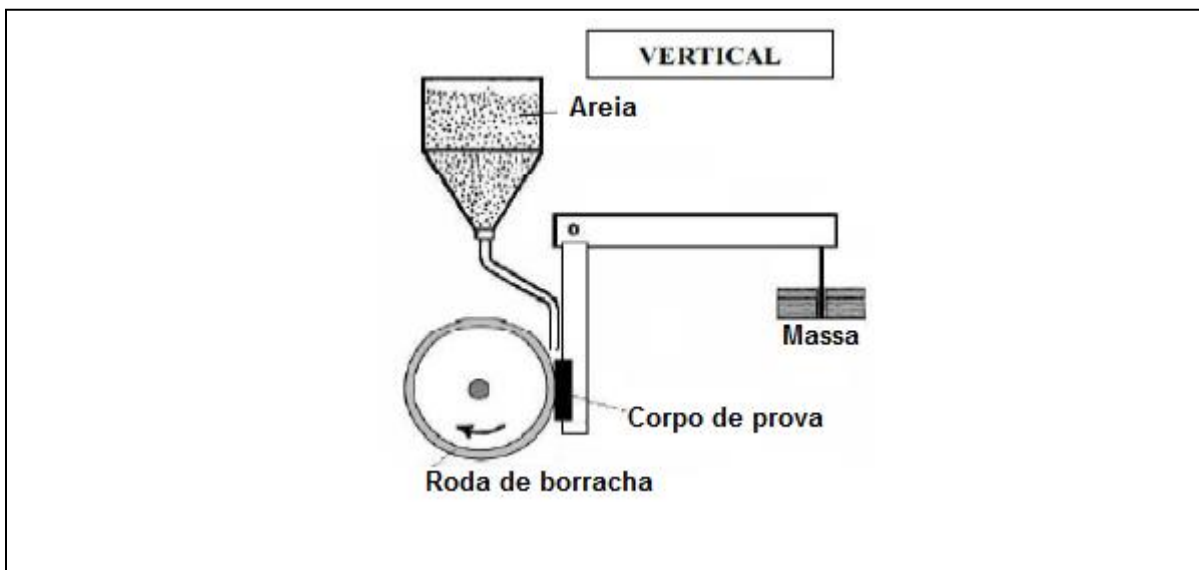
A Figura 11 mostra os meios de ensaio de desgaste mais comumente encontrados. Na figura são mostradas variações de um método no qual um pino desliza contra uma superfície, plana ou não, na qual os abrasivos estão fixos.



**Figura 11: Tipos de abrasômetros mais comuns. Onde: a) pino sobre disco abrasivo; b) pino sobre placa abrasiva; c) pino sobre tambor abrasivo e d) ensaio de abrasão roda de borracha. Fonte: Dallman (2012).**

Dentre os tipos mostrados na figura o mais utilizado é o que está mostrado na Figura 11 d), no qual o corpo de prova possui uma superfície plana e é pressionado com uma carga pré-determinada constante contra a superfície de uma roda de borracha. O material abrasivo é escoado entre a superfície do corpo de prova e da roda de borracha, provocando assim o desgaste da superfície da amostra. Este ensaio é normalizado pela *American Society for Testing Materials*, por meio da norma ASTM G-65 (2010).

Segundo a norma, o disco consiste em um aro de borracha moldado em cima de uma superfície curva de um disco de aço, de dureza definida. A largura e a espessura da borracha no disco devem ser de 12,7 mm e o diâmetro total de 228,6 mm. O disco deve girar a uma rotação constante de 200 RPM com variabilidade de +/- 10 RPM. O fluxo do abrasivo deve estar entre 300 e 400 g/min. A Figura 12 mostra o desenho do equipamento, construído de acordo com a norma ASTM G-65 (2010).



**Figura 12: Representação esquemática do equipamento roda de borracha.**  
Fonte: ASTM G-65 (2010).

Para a instrumentação do abrasômetro, materiais distintos podem ser utilizados com parâmetros definidos pela norma.

A norma recomenda que seja utilizado, preferencialmente, o aço AISI D2 para a

instrumentação de equipamentos. Na Tabela 2 é possível verificar quais os tipos de aços e também quais as rotações recomendadas para cada um deles.

**Tabela 2: Materiais e métodos para validação do abrasômetro**

Material recomendado	Força contra o corpo de prova, N (lb)*	Revoluções da roda	Dureza (HRC)	Volume perdido (mm <sup>3</sup> )
AISI D2 Temperado e Revenido	130 (30)	6000	58,5 a 60,5	35,6 +/- 5,2
AISI H13 Temperado	130 (30)	2000	47 a 48	55,6 +/- 4,2
AISI 4340	130 (30)	1000	31 a 33	49,2 +/- 2,9
	45 (10,1)	6000		91,1 +/- 5,4
Aços com alto teor de cromo	130 (30)	100	**	1,3 +/- 0,3 ***

**Fonte: ASTM G-65 (2010).**

\*Tolerância na variação da força aplicada: +/-3%

\*\*Valor não especificado

\*\*\*Valor não normalizado

Os parâmetros que devem ser seguidos para o ensaio do equipamento segundo a norma são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3: Parâmetros do equipamento e do ensaio**

Potência do motor	750 W
Rotação do disco de borracha (RPM)	200 +/- 10
Revolução 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)	76 x 25 x 12,7 (C x L x H)
Diâmetro externo do disco (mm)	228,6
Dureza da borracha (Shore A)	60 +/- 2

**Fonte: ASTM G-65 (2010).**

As amostras ensaiadas devem ser retangulares com dimensões de 25,0 x 76,0

mm e alturas entre 3,2 e 12,7 mm. A superfície de ensaio deve ser preparada de modo a obter uma rugosidade superficial (Ra) abaixo de 0,8  $\mu\text{m}$ .

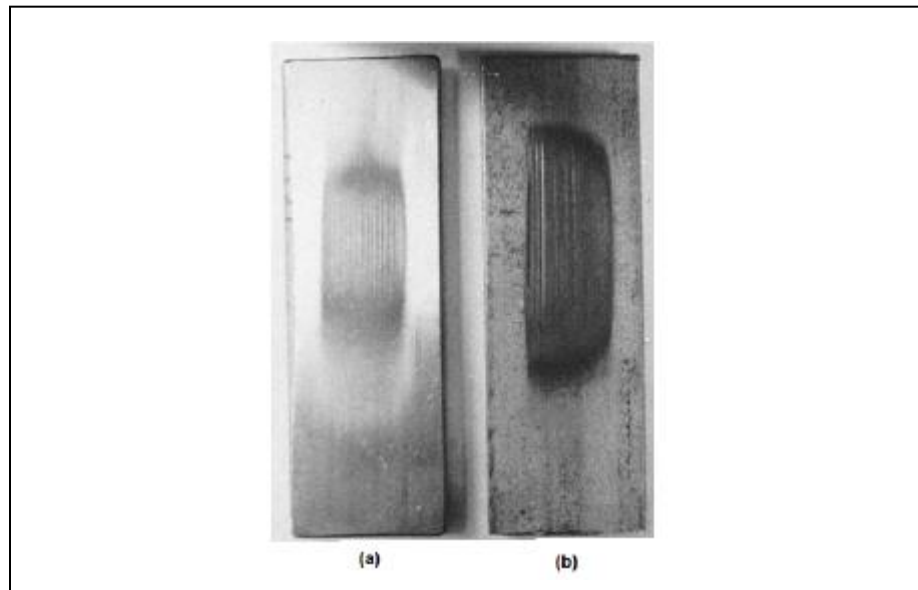
Antes de se iniciar cada ensaio os corpos de prova devem ser pesados utilizando-se uma balança de precisão de 0,001 gramas. Ao final do ensaio a superfície do corpo de prova deve ser limpa e o mesmo deve ser novamente pesado. O volume de material perdido é calculado através da diferença entre as massas inicial e final, como demonstrado na equação 1.

$$\text{Volume perdido (mm}^3\text{)} = \frac{\text{massa perdida (g)}}{\text{densidade (g / cm}^3\text{)}} * 1000 \quad (1)$$

O diâmetro externo da roda deve ser medido antes e depois de cada ensaio, para que o volume perdido calculado na equação 1 possa ser corrigido através da equação 2:

$$\text{Volume perdido (mm}^3\text{)} = \frac{228,6 \text{ (mm)}}{\text{diâmetro da roda após ensaio (mm)}} * \text{volume perdido (mm}^3\text{)}_{\text{calculado}} \quad (2)$$

Após o ensaio, uma inspeção visual deve ser realizada e deve ser observado uma marca de desgaste uniforme e centralizada, como mostrado na Figura 13. Caso não haja a verificação de um desgaste uniforme no corpo de prova, as condições de alinhamento entre a face da amostra e a face da roda de borracha devem ser reavaliadas.



**Figura 13: Marcas de desgaste do corpo de prova (a) uniforme e (b) não uniforme.**  
Fonte: ASTM G-65 (2010).

## 2.2.6 PARAMETROS DE ENSAIO PARA ANÁLISE DE DESGASTE

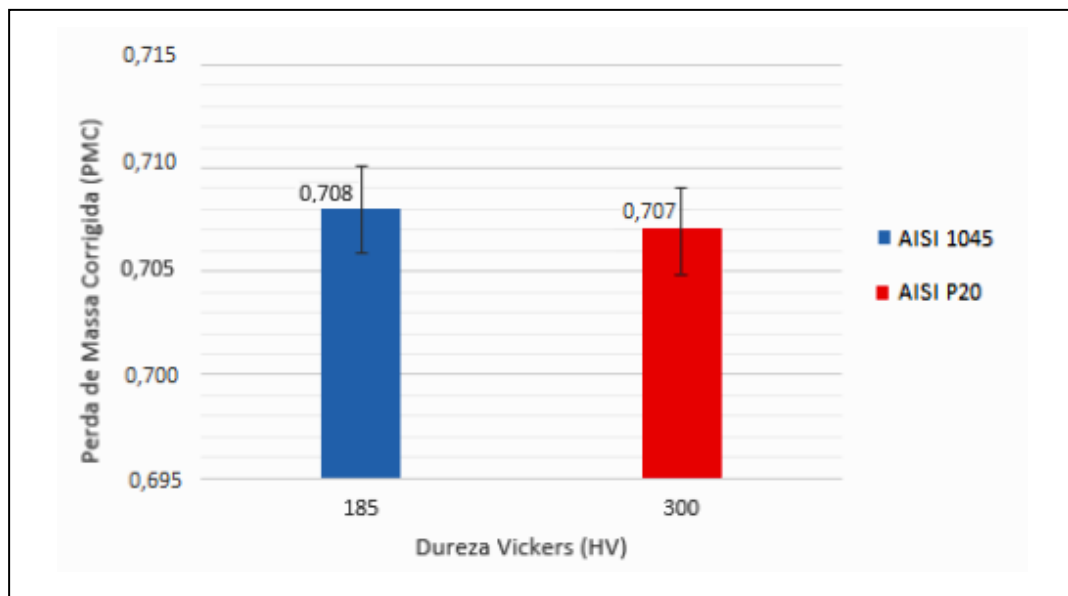
Os testes de para análise de desgaste foram realizados com base no trabalho de SANTANA; PINTAUDE (2014), no qual foi adotado o “procedimento E” da norma ASTM G-65 (2010). As especificações para este procedimento são as seguintes:

- aço AISI 1045 recozido com uma dureza de 185 Vickers;
- areia normal brasileira retida de 0,15 mm que é classificada como fina número (#100);
- corpos de prova com dimensões de: 12,7 mm de altura, 25,4 mm de largura e 76,2 mm de comprimento, todos retificados;
- aplicação de força normal de 130 N.

Cada ensaio tem a duração de 10 minutos, ao término de cada ensaio a roda deve ser lixada com uma lixa de granulometria 400 para que as condições da roda fiquem iguais para todos os corpos de prova, sem que haja areia na superfície da borracha.

No início e ao final de cada ensaio, o diâmetro externo da roda de borracha deve ser medido para se observar o desgaste da mesma. O diâmetro não pode ficar abaixo de 215,9 mm, esse é o limite para o qual uma nova roda deve ser utilizada.

A perda de massa encontrada no artigo para o aço AISI 1045 recozido foi de 0,708 gramas, a qual está representada na Figura 14.



**Figura 14: Perda de massa esperada para o aço AISI 1045 recozido.**  
Fonte: Pintaude; Santana (2014).

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O projeto do tribômetro do tipo roda de borracha foi desenvolvido por uma aluna da UTFPR – CP para posterior calibração e uso, porém o mesmo não se encontrava em condições de operação, sendo necessário terminar sua correta construção para o início dos testes.

O tribômetro foi desmontado para que fosse completamente lixado, pois se encontrava oxidado. Uma lixadeira foi passada nos cordões de solda, mostrados na Figura 15, para que houvesse a uniformização de sua superfície para aplicação de massa plástica a fim de vedar os espaçamentos que se encontravam entre suas placas.



**Figura 15: Aspecto dos cordões de solda após lixamento.**  
Fonte: Próprio autor.

A Figura 16 mostra o tribômetro completamente lixado em um momento anterior



à aplicação da massa plástica.



**Figura 16: Tribômetro após lixamento.**  
**Fonte: Próprio autor.**

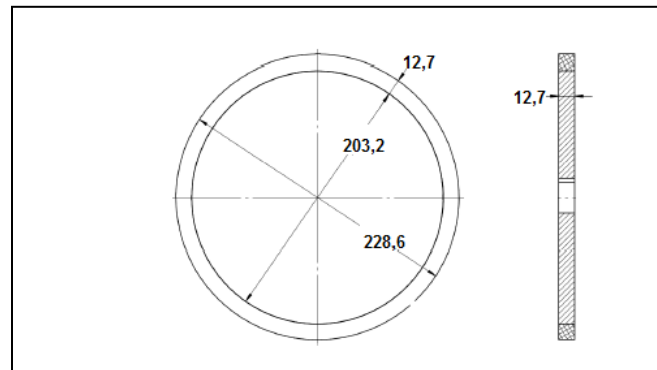
Após a aplicação e secagem da massa plástica na estrutura do tribômetro, deu-se início à pintura da mesma, para evitar novos problemas de oxidação.

O disjuntor teve de ser trocado pois o que se encontrava na máquina não estava funcionando. Foi necessária a usinagem de um novo eixo para o motor pois o que se encontrava na máquina não estava balanceado, causando uma intensa vibração do equipamento. Usinou-se um novo pino para fixação do braço onde são colocados o corpo de prova e os pesos para aplicação da força normal contra a roda de borracha.

Após a confecção e pintura do novo eixo e do pino, deu-se início ao processo de remontagem para que se pudesse dar prosseguimento nos trabalhos.

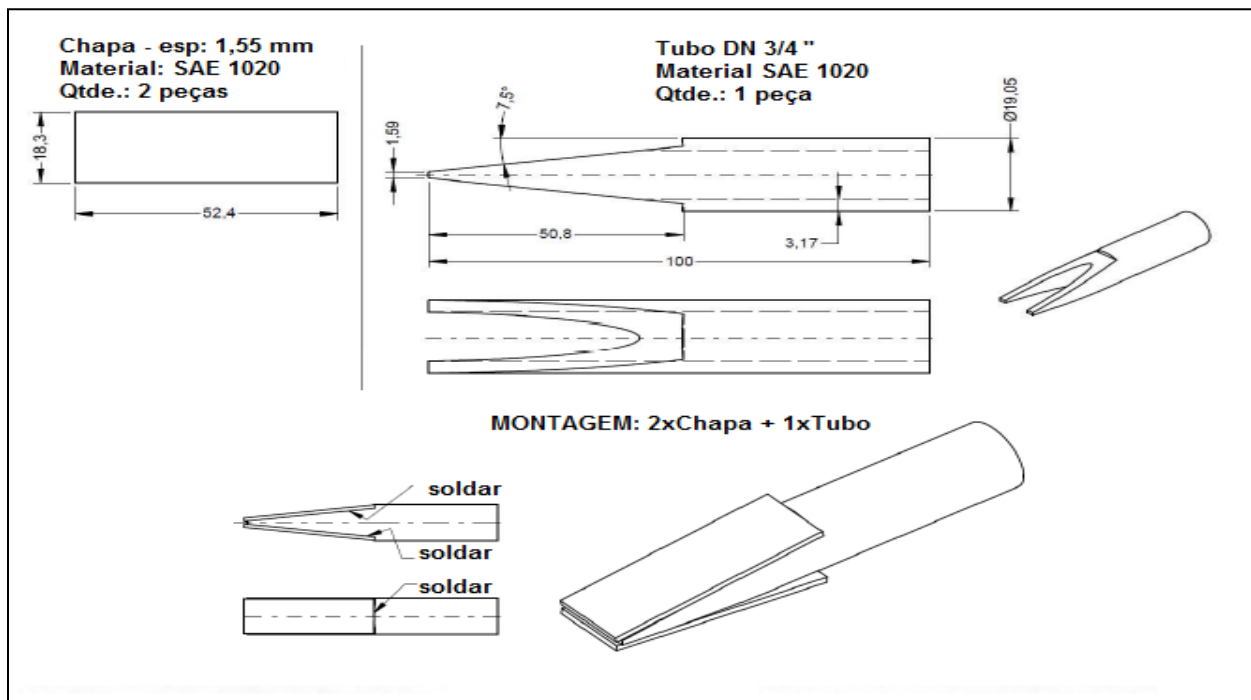
Para correta confecção das partes do tribômetro, foi tomada como parâmetro a

norma ASTM G-65 (2010), a Figura 17 mostra as dimensões especificadas por norma para a roda de borracha.



**Figura 17: Especificação da roda de borracha.**  
Fonte: ASTM G65 (2010).

A Figura 18 mostra as dimensões corretas para construção do bico dosador de areia abrasiva.



**Figura 18: Dimensões recomendadas do bico dosador do fluxo de areia.**  
Fonte: ASTM G65 (2010).

A Figura 19 mostra uma sugestão de projeto com as corretas dimensões para construção do tribômetro roda de borracha.

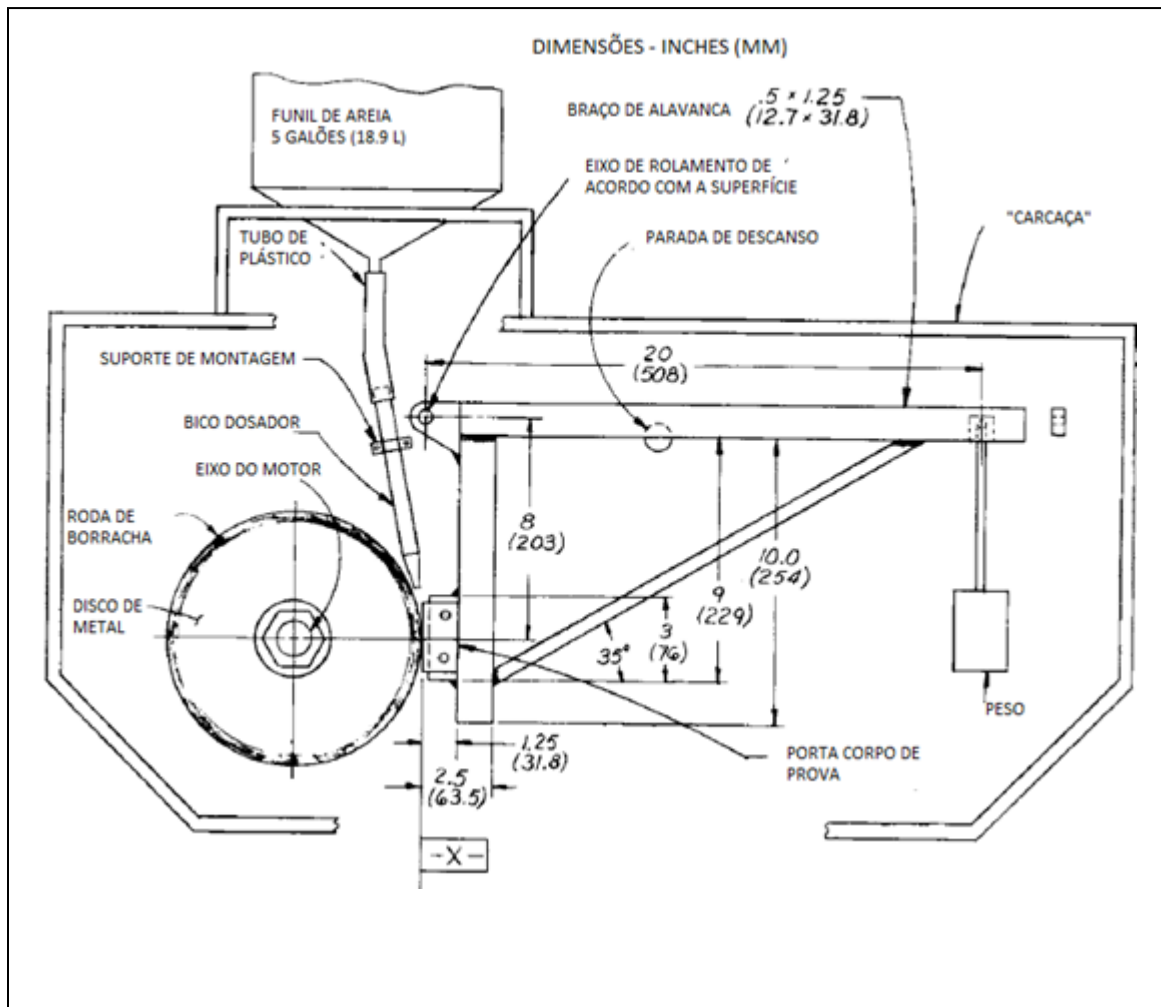
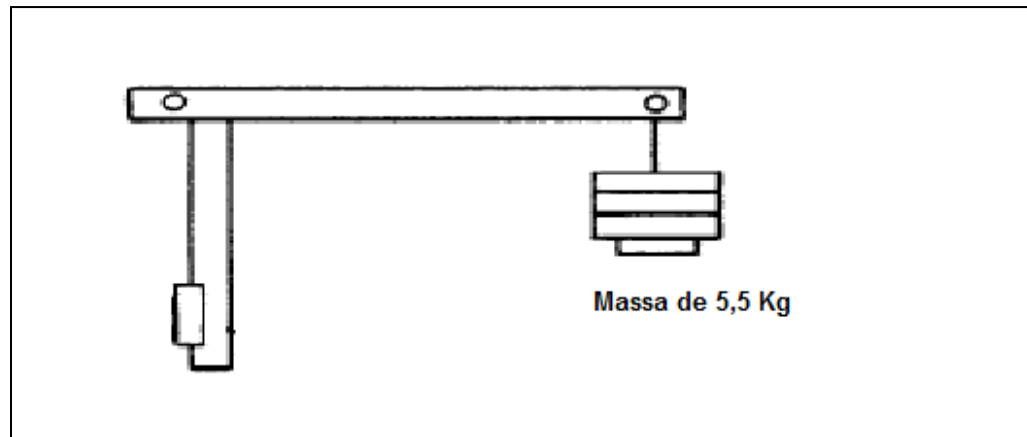


Figura 19: Projeto do tribômetro do tipo roda de borracha juntamente com seu projeto. Fonte: ASTM G 65 (2010).

### 3.1 DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS

Todo o trabalho experimental foi realizado nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Câmpus Cornélio Procópio.

Para determinação da massa necessária (contrapeso) para se atingir os 130 N de força normal contra o corpo de provas foi feito o cálculo geométrico (por meio do momento da força no braço da alavanca), e verificou-se o mesmo empregando-se uma mola, onde se calculou sua constante elástica e posteriormente mediu-se a variação de deformação, obtendo-se o valor da força requerida. Desta forma, obteve-se uma massa de 5,5 kg para o contrapeso. A massa foi inserida no equipamento como mostrado na Figura 20.



**Figura 20: Representação esquemática de como a massa foi inserida no equipamento.**

**Fonte: Próprio autor.**

A vazão do abrasivo foi determinada através de testes de pesagem onde se abria a válvula de regulagem e depois media-se a vazão de abrasivo durante um minuto. A Figura 21 ilustra o processo de aferição da vazão. Esse teste foi repetido até que se alcançasse a vazão definida pela norma ASTM G-65 (2010), a qual está entre

uma faixa de 300 - 400 gramas por minuto. A pesagem foi realizada por uma balança analógica com precisão de 0,01 gramas. O procedimento foi repetido por 3 vezes após se atingir um fluxo ideal para que se tivesse a certeza de que o mesmo estava correto.



**Figura 21: Medição da vazão de abrasivo.**  
Fonte: Próprio autor.

## 3.2 CALIBRAÇÃO DO TRIBÔMETRO

A calibração do equipamento foi feita através de testes com os aços AISI 1020 normalizado e AISI 1045 temperado, os quais foram fornecidos pelo Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Cornélio Procópio.

Foram realizados 8 testes com o aço AISI 1045 e 8 testes com o aço AISI 1020.

### 3.2.1 ANÁLISE DE DESGASTE

Os testes de para análise de desgaste foram feitos baseados no trabalho de

SANTANA; PINTAUDE (2014), no qual foi adotado o “procedimento E” da norma ASTM G-65. As especificações para este procedimento são as seguintes:

### 3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Amostras dos aços AISI 1020 e AISI 1045 foram caracterizadas como mostra a Tabela 4.

**Tabela 4: Composição de cada aço (% em massa)**

	%C	%Fe	%Mn	%P	%S
AISI 1020	0,17-0,23	99,08-99,53	0,30-0,60	≤ 0,040	≤ 0,050
AISI1045	0,42-0,50	98,51-98,98	0,60-0,90	≤ 0,040	≤ 0,050

**Fonte: MatWeb (2016).**

As amostras foram usinadas nas dimensões 75,0 x 25,0 x 12,5 mm (comprimento x largura x altura). Após a usinagem as mesmas foram retificadas como mostra a Figura 22 até atingir uma rugosidade menor que 0,8  $\mu\text{m}$  (parâmetro Ra), a qual é exigida por norma.



**Figura 22: Corpos de prova retificados.**  
**Fonte: Próprio autor.**

Após o processo de retífica foi realizado um teste de dureza nos corpos de prova para que se verificasse se a mesma encontrava-se na faixa requerida pela norma ASTM G65 (2010).

Amostras de aços AISI 1020 e AISI 1045 foram utilizadas para a fase de calibração e testes de desgaste.

Todas as amostras foram pesadas antes e depois de cada ensaio em uma balança digital de precisão (da marca OHAUS, modelo Adventurer) mostrada na Figura 23 (a), a qual possui resolução de 0,0001 g (quatro casas decimais), para determinação da massa perdida durante os ensaios. A figura 23 (b) apresenta o rugosímetro da marca Mitutoyo (modelo SJ 201) utilizado.



(a) (b)  
**Figura 23: (a) Balança de precisão e (b) rugosímetro utilizados.**  
**Fonte: Próprio autor.**

Os valores aferidos para perda de massa do aço AISI 1045 temperado estão presentes na Tabela 5.

**Tabela 5: Valores de massa inicial e final do aço AISI 1045 temperado.**

Pesagem inicial (g)	Pesagem final (g)	Massa perdida (g)
203,1804	203,1043	0,0761
177,2723	177,1204	0,1519
201,9398	201,8575	0,0823
182,1697	182,0668	0,1029
182,4685	182,3642	0,1043
158,4794	158,3692	0,1102

**Fonte: Próprio autor.**



Os valores de perda de massa para o aço AISI 1020 normalizado estão presentes na Tabela 6.

**Tabela 6: Valores de massa inicial e final do aço AISI 1020 normalizado.**

<b>Pesagem inicial</b>	<b>Pesagem final</b>	<b>Massa perdida (g)</b>
155,9572	155,6079	0,3493
157,9314	157,6212	0,3102
157,4106	157,0924	0,3182
157,1786	156,8575	0,3211
158,8418	158,5116	0,3302
158,309	157,9885	0,3205
157,1496	156,8269	0,3227
157,4817	157,1665	0,3152

**Fonte: Próprio autor.**

Os valores de perda de massa aferidos para o aço AISI 1045 recozido podem ser verificados na Tabela 7.

**Tabela 7: Valores de massa inicial e final do aço AISI 1045 recozido.**

<b>Pesagem inicial (g)</b>	<b>Pesagem final (g)</b>	<b>Massa perdida (g)</b>
194,0440	193,5832	0,4608
196,8932	196,4569	0,4363
163,4453	163,0072	0,4381
162,3769	161,9381	0,4388

**Fonte: Próprio autor.**

Os valores de massa encontrados foram a base para o cálculo do volume total de material perdido, calculado através das equações 1 e 2 (página 28) e para a elaboração dos gráficos com os resultados.

As amostras do aço AISI 1020 normalizado e AISI 1045 temperado foram usadas na fase de calibração e as amostras de AISI 1045 recozido foram utilizadas na etapa de análise de desgaste, sendo que para os dois primeiros tipos de amostra foram

realizados testes de 5 minutos (1000 revoluções) como especificado no “procedimento E” da norma ASTM G65, e para o último foram realizados testes de 10 minutos (2000 revoluções), como especificado em SANTANA; PINTAUDE (2014).

Amostras do aço AISI 1020 foram normalizadas utilizando o forno Mufla (da marca Novatécnica, modelo NT380) que se encontra na oficina mecânica da UTFPR - CP, onde as amostras permaneceram por 30 minutos em uma temperatura entre  $920^{\circ}\text{C}$  -  $950^{\circ}\text{C}$ , seguido de um resfriamento ao ar. No caso das amostras de aço AISI 1045 foram utilizadas 8 amostras temperadas para calibração e 4 amostras temperadas e recozidas para ensaios de análise de desgaste, num total de 12 amostras.

No processo de têmpera os corpos de prova foram deixados no forno Mufla por 30 minutos em uma temperatura de  $840^{\circ}\text{C}$  a  $860^{\circ}\text{C}$ , seguidos de resfriamento em óleo.

No processo de recozimento as amostras já temperadas foram colocadas no forno novamente por 20 minutos em uma temperatura entre  $800^{\circ}\text{C}$  -  $850^{\circ}\text{C}$ , seguidas de resfriamento lento dentro do próprio forno com a porta do mesmo aberta, como pode ser observado na Figura 24.



**Figura 24: Forno Mufla utilizado.**  
**Fonte: Próprio autor.**

Após o resfriamento dos corpos de prova, todos passaram por um jateamento de ar para a retirada da camada superficial, seguido por processo de retificação, testes de dureza e de rugosidade superficial e pesagem inicial.

O resultado dos ensaios de dureza para o aço AISI 1045 temperado podem ser verificados na Tabela 8.

**Tabela 8: Valores de dureza para o aço AISI 1045 temperado.**

Dureza (HRC)				
amostra	ensaio 1	ensaio 2	ensaio 3	média
1	29	27	28	28
2	49	51	49	50
3	44	45	47	45
4	49	49	47	48
5	39	43	43	42
6	58	57	58	58
7	46	45	47	46
8	42	43	43	43

Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos ensaios realizados para determinação da dureza do aço AISI 1045 temperado e recozido estão presentes na Tabela 9.

**Tabela 9: Valores de dureza para o aço 1045 temperado e recozido.**

Dureza (HRC)				
amostra	ensaio 1	ensaio 2	ensaio 3	média
17	6	5	11	7
18	5	5	5,5	5
19	5,5	7	6,5	6
20	7	9	8	8

Fonte: Próprio autor.

Não foram realizados testes de dureza no aço AISI 1020 pois o mesmo é um aço de baixo teor de carbono, não possuindo uma dureza relevante (para tais aços utiliza-se

o procedimento “E” da norma ASTM G-65). Para o uso deste aço como corpo de prova, o mesmo deveria ser apenas normalizado.

A Tabela 10 mostra os valores de rugosidade superficial aferidos no aço AISI 1020 normalizado após o processo de retificação.

**Tabela 10: Rugosidade Ra do aço AISI 1020 normalizado.**

<b>Amostras</b>	<b>Rugosidade Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>			<b>Média</b>
9	0,46	0,34	0,50	0,36
10	0,29	0,43	0,28	0,35
11	0,28	0,32	0,27	0,35
12	0,39	0,46	0,53	0,35
13	0,31	0,34	0,21	0,33
14	0,36	0,26	0,42	0,34
15	0,35	0,43	0,35	0,33
16	0,30	0,31	0,26	0,29

**Fonte: Próprio autor.**

A Tabela 11 mostra os valores de rugosidade superficial aferidos no aço AISI 1045 recozido após o processo de retificação.

**Tabela 11: Rugosidade Ra do aço AISI 1045 recozido.**

<b>Amostras</b>	<b>Rugosidade Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>			<b>Média</b>
17	0,58	0,40	0,53	0,53
18	0,43	0,50	0,41	0,54
19	0,53	0,65	0,46	0,58
20	0,69	0,51	0,64	0,61

**Fonte: Próprio autor.**

Não foram realizados testes de aferição de rugosidade para o aço AISI 1045 temperado, pois o mesmo seria utilizado apenas para uma pré-calibração do equipamento.

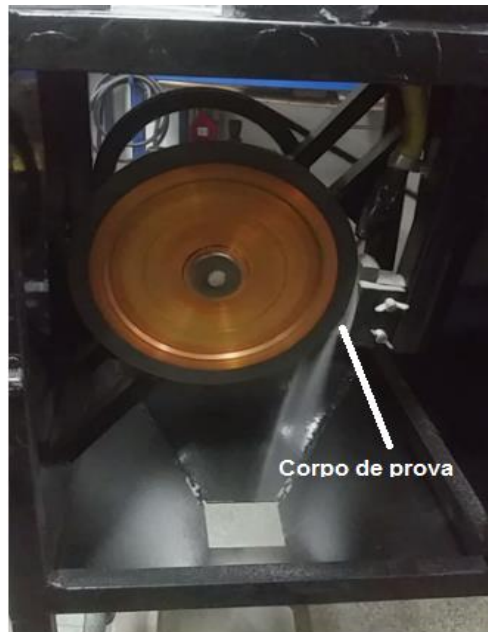
### 3.4 ANÁLISE DE DESGASTE EMPREGANDO O TRIBÔMETRO RODA DE BORRACHA

A análise do desgaste se deu através de ensaios feitos com o aço AISI 1045 recozido. A rotação fixada no inversor de frequência foi de 800 rotações por minuto (RPM), como mostrado na Figura 25, a qual foi reduzida ao chegar no motor para 200 RPM, valor especificado pela norma ASTM G-65.



**Figura 25: Inversor de frequência.**  
**Fonte: Próprio autor.**

Na Figura 26 vê-se o corpo de provas sendo ensaiado, onde se tem a roda de borracha girante com a areia escoando entre a mesma e o corpo de prova, o qual está fixado através de um porta corpos de prova.



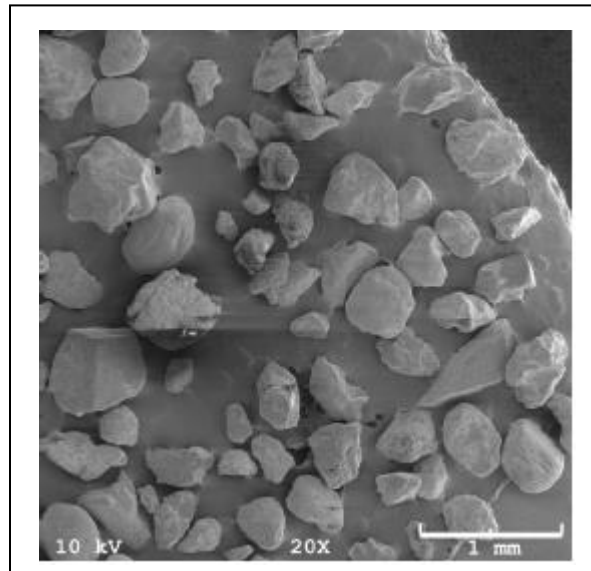
**Figura 26: Corpo de prova sendo ensaiado.**  
**Fonte: Próprio autor.**

Após três medições, a vazão média da areia obtida foi de 327 g/min, encontrando-se dentro da faixa estabelecida pela norma ASTM G-65 (2010), que é de 300 - 400 g/ min. Nos ensaios realizados constatou-se que houve a formação de um fluxo laminar de abrasivo, o qual é caracterizado por um fluxo concentrado de areia escoando entre a roda de borracha e o corpo de prova, sem grandes dispersões para os lados.

### 3.5 MORFOLOGIA DO ABRASIVO

O abrasivo utilizado para a calibração e para os ensaios de desgaste no tribômetro foi a areia normal brasileira com granulometria de 0,15 - 0,30 mm (100 Mesh), de densidade aproximada de 2,5 g/cm<sup>3</sup>.

A figura 27 mostra um exemplo da morfologia dessa areia obtida por meio de microscopia eletrônica de varredura (DALLMAN, 2012).



**Figura 27: Morfologia da areia normal brasileira.**  
**Fonte: Dallman (2012).**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de desgaste realizados serão apresentados nesta seção. Serão analisados e discutidos todos os resultados obtidos.

### 4.1 ENSAIOS PARA CALIBRAÇÃO DO TRIBÔMETRO

Para calibração do tribômetro foram feitos inicialmente 8 testes com o aço AISI 1045 temperado, tendo como resultado os dados presentes na Figura 28, na qual os valores individuais são os valores de perda de massa encontrados durante os ensaios, calculados através da equação 1 (página 28), e os valores médios é a média aritmética dos volumes perdidos para se ter uma base de variação dos mesmos.

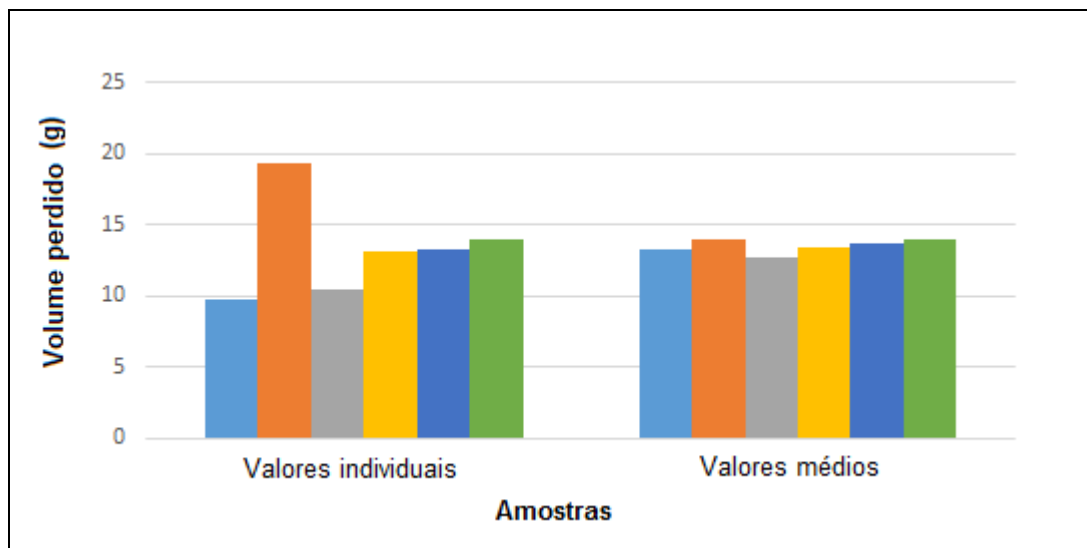


Figura 28: Dados da fase inicial de calibração do equipamento (sem o anel elástico).  
Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado na Figura 28, houve uma grande diferença entre os

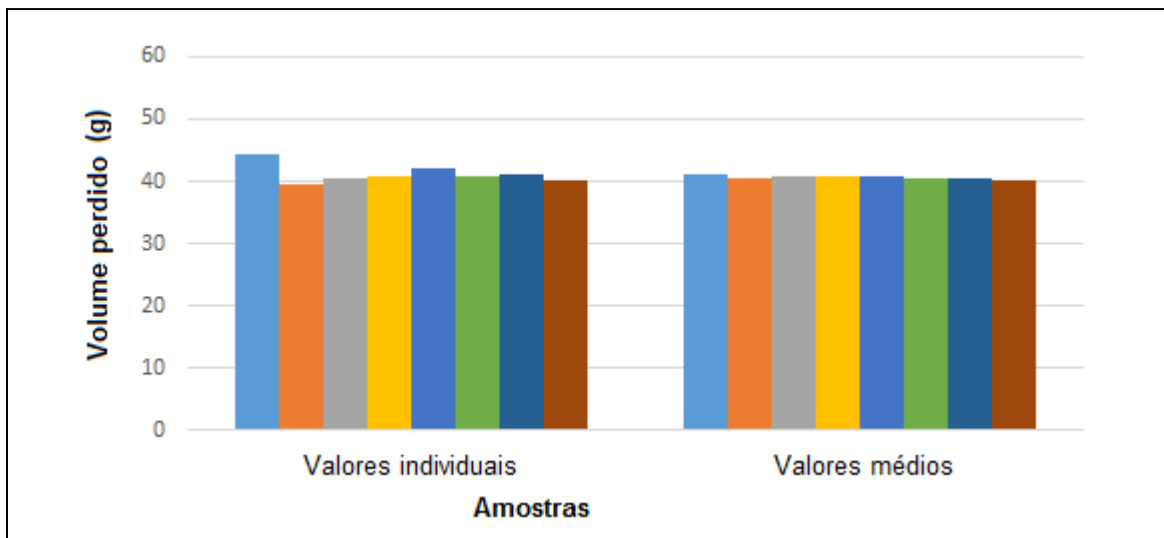


dados coletados. A perda média foi de  $13,33 \pm 6 \text{ mm}^3$ , com um coeficiente de variação de 25,58 %.

Esses valores são considerados insatisfatórios uma vez que contrariam a literatura. Foi realizado um reajuste no equipamento e novos testes foram realizados.

Um dos motivos para o ensaio obter um elevado coeficiente de variação foi o fato de o eixo que fazia a ligação entre a roda e o motor ter se deslocado durante os testes. Dois corpos de prova foram perdidos pelo fato de o eixo ter “jogado” a roda de borracha para frente durante os ensaios. A solução para este problema foi inserir um anel elástico no eixo, para que o mesmo ficasse fixo (ou seja, sem apresentar deslocamentos) antes da realização de novos testes com o aço AISI 1020.

Oito amostras do aço AISI 1020 normalizado foram ensaiadas após a colocação do anel elástico no eixo e os resultados podem ser verificados na Figura 29. Os valores de perda volumétrica das mesmas foram calculados através das equações 1 e 2 (página 28), considerando a densidade média do aço como sendo de  $7,87 \text{ g/cm}^3$ .



**Figura 29: Dados da fase inicial de calibração do equipamento (com anel elástico).**  
**Fonte: Próprio autor.**

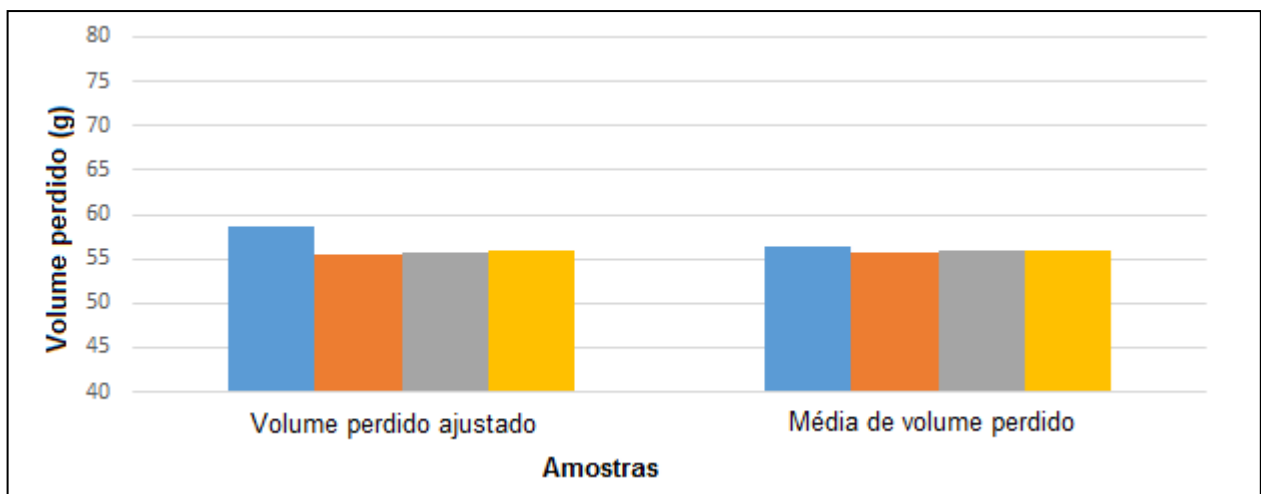
Após a colocação do anel elástico no eixo e estabilização da massa de 5,5 Kg houve uma considerável melhora nos resultados, como mostra a Figura 29. O volume médio perdido foi de  $40 \pm 2 \text{ mm}^3$ , com um coeficiente de variação de 4,26 %. Este

resultado pode ser considerado satisfatório, pois o tribômetro demonstrou uma repetibilidade de resultados de aproximadamente 95 %.

## 4.2 ANÁLISE DE DESGASTE

Os ensaios para análise de desgaste foram realizados segundo PINTAUDE; SANTANA (2014), fixou-se a rotação da máquina em 200 rotações por minuto e o escoamento do abrasivo em 327 g/min. Após cada ensaio lixou-se a roda de borracha com uma lixa de granulometria 400 para que as condições da roda em todos os testes fossem iguais.

Os resultados de desgaste obtidos nos ensaios utilizando o tribômetro do tipo roda de borracha podem ser verificados na Figura 30, onde a média de volume perdido são os valores calculados segundo a equação 1 e o volume perdido ajustado são estes mesmos valores corrigidos pela equação 2, presentes na página 28.



**Figura 30: Dados encontrados nos ensaios do aço AISI 1045 recozido.**  
**Fonte: Próprio autor.**

O volume médio perdido foi de  $56 \pm 2 \text{ mm}^3$ , com um coeficiente de variabilidade de 2,1 %. A perda de massa foi em média de 0,446 g por ensaio.

Realizando uma análise dos resultados encontrados nos ensaios de desgaste, encontrou-se uma divergência de valores, porém o equipamento se encontra calibrado, com uma confiabilidade de aproximadamente 94 % e coeficiente de variação abaixo de 5%, o qual é recomendado pela norma ASTM G-65 (2010).

A Figura 31 mostra as marcas de desgaste dos corpos de prova obtidas após a realização dos ensaios. Pode-se ver que as marcas deixadas pela roda de borracha juntamente com o abrasivo não são uniformes se comparadas com as marcas dos corpos de prova presentes na Figura 13 (página 29), que constam na norma ASTM G-65 (2010), o que indica um contato não uniforme da roda de borracha com a superfície dos corpos de prova. Isto pode ter sido causado pela ocorrência de vibrações durante a execução dos ensaios, condição que foi verificada em todos os ensaios realizados.



**Figura 31: Marcas de desgaste após ensaio do aço AISI 1045 recozido.**  
**Fonte: Próprio autor.**

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- Após a correção do posicionamento do eixo o equipamento apresentou uma boa repetibilidade nos ensaios do aço AISI 1020 normalizado, conseguindo uma confiabilidade de 94 % e uma variação abaixo de 5 %, valores que estão em concordância com o recomendado pela norma ASTM G-65.
- A repetibilidade dos ensaios e confiabilidade puderam ser comprovadas durante os ensaios do aço AISI 1045 temperado e recozido, apresentando mais uma vez uma variação inferior a 5 %.
- As marcas de desgaste deixadas nos corpos de prova não podem ser consideradas centralizadas e uniformes. Isto pode ter sido ocasionado pela ocorrência de vibrações, as quais foram observadas durante a realização dos ensaios.
- Nos ensaios realizados não foi possível obter valores de massa perdida equivalentes aos indicados na literatura, o que indica que a força normal aplicada na roda de borracha pode não estar dentro do esperado, que é 130 N.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, pode-se citar as seguintes sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Inserir uma célula de carga para que se possa saber o valor real da força normal aplicada ao corpo de prova.
- Fabricação e alinhamento de um novo eixo, para que o dispositivo deixe de vibrar e dessa forma as marcas deixadas pelo desgaste possam ficar uniformes como recomendadas por norma.
- Adoção de um sistema de aferição da temperatura dos corpos de prova e da roda de borracha em conjunto com um sistema de refrigeração, para que futuramente possa se utilizar o tribômetro para análise da influência da temperatura nos ensaios de desgaste.
- Inserir um sistema onde se possa programar a parada do tribômetro após o número de rotações ser alcançado.
- Fabricação de bicos dosadores diferentes do especificado pela norma, para que outros tipos de areia possam ser utilizadas sem que haja a necessidade de regulação da vazão a cada vez que se necessita utilizar o equipamento.

## REFERÊNCIAS

ASTM G65-04. **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus.** Annual Book of ASTM Standards, 2010.

BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook** – Volume 1 – Principles of Tribology. CRC Press, 2001.

CANALE, L. C. F. Tribologia. **Apresentação**, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

Disponível em:

[https://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/81181/mod\\_resource/content/12/Aula\\_1\\_tribologia.pdf](https://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/81181/mod_resource/content/12/Aula_1_tribologia.pdf) Acesso em: 18 de agosto. 2016.

DALMANN, J. **Projeto, construção e validação de um abrasômetro roda de borracha.** Dissertação 31 de agosto de 2012, Joinville – RS, Brasil. Disponível em: [http://www.tede.udesc.br/tde\\_arquivos/11/TDE-2013-04-17T121500Z-1240/Publico/Jeferson%20Dallmann.pdf](http://www.tede.udesc.br/tde_arquivos/11/TDE-2013-04-17T121500Z-1240/Publico/Jeferson%20Dallmann.pdf). Acesso em 18 de agosto de 2016.

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

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., **Fundamentos de física**, 8 edição, Vol.1, John Wiley & sons, 2008.

HUTCHINGS, I. M. Tribology: **Friction and Wear of Engineering Materials.** London, British Library, ISBN 0340 56184X, 1992.

JUVINALL, R. J., MARSHEK, K.M., **Fundamentals of Machine Component Design**, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1991.

MATWEB, **Material property data.** Disponível em:

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2740581369f3421dac0d8c91294b5935&ckck=1>. Acesso 10 de outubro de 2016.

PEREIRA, H., **Estudos de aplicação de revestimentos termodifundidos e de diamante amorfo em desfibradores na indústria sucroalcooleira**. Bahia, Ilhéus. Disponível em: <http://docplayer.com.br/15455177-Estudos-de-aplicacao-de-revestimentos-termodifundidos-e-de-diamante-amorfo-em-desfibradores-na-industria-sucroalcooleira-herick-santos-pereira.html>. Acesso em 18 de agosto de 2016.

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

RIJEZA, M. **Desgaste por adesão: o que é e como prevenir**. Rio Grande do Sul, São Leopoldo. Disponível em: <http://www.rijeza.com.br/novidades/desgaste-por-adesao-o-que-e-e-como-prevenir>. Acesso em 18 de agosto de 2016.

RUTHERFORD, K. L., HUTCHINGS, I. M. **A micro-abrasive wear test, with particular application to coater systems**. Surface and Coatings technology, 79, 231 – 239, 1996.

SANTANA, A. L. ; PINTAUDE, G. **Resistência ao desgaste abrasivo dos aços AISI 1045 e AISI P20 ensaiados em roda de borracha**. SICITE XVII 23 de fevereiro de 2014, Curitiba – PR, Brasil.

SOBRAL, J. Tribologia. **Seminário**, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa 25 de março de 2015.  
Disponível em:  
[http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier\\_artigo/20150325\\_jsobral\\_13003981245515542fcb3fc.pdf](http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/20150325_jsobral_13003981245515542fcb3fc.pdf). Acesso em: 18 de agosto. 2016.

STOETERAU, R. L. Tribologia. **Apostila**, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 179 f., 2004.  
Disponível em: <http://www.scribd.com/doc/19271358/StoeterauTribologia> Acesso em: 16 de agosto. 2016.

ZUM GAHR, K.H., **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

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