



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS-IEG
PROGRAMA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ERNÉLISON ANGLY DA SILVA SANTOS
JANICLEI TORRES ALENCAR

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESGASTE TRIBOLÓGICO DA LIGA AI7075 E
LIGAS FERROSAS DE BAIXO E MÉDIO CARBONO**

Santarém-Pará

2016

ERNÉLISON ANGLY DA SILVA SANTOS

JANICLEI TORRES ALENCAR

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESGASTE TRIBOLÓGICO DA LIGA AL7075 E
LIGAS FERROSAS DE BAIXO E MÉDIO CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso bacharelado interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Oeste do Pará como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Professor Eng. Dr. Kleber Agustin Sabat da Cruz

Santarém - Pará

2016

ERNÉLISON ANGLY DA SILVA SANTOS
JANICLEI TORRES ALENCAR

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESGASTE TRIBOLÓGICO DA LIGA AL7075 E
LIGAS FERROSAS DE BAIXO E MÉDIO CARBONO**

TERMO DE APROVAÇÃO

Este trabalho de conclusão de curso foi analisado pelos membros da banca examinadora, abaixo assinado:

Aprovado em 30 de maio de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Eng. Dr. Kleber Agustin Sabat da Cruz

Prof. Física Msc. Querem Hapuque Felix Rebelo

Prof. Eng. Msc. Lazaro João Santana da Silva

Aprovado com a nota: 8,9

DEDICATÓRIA

A Deus que sempre iluminou os meus caminhos, para que eu pudesse seguir com saúde e sabedoria.

Ao sorriso lindo do meu amado filho Brandon, que me alegra e me motiva a vencer os obstáculos todos os dias.

A minha amada mãe Maria Lucia, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado, mesmo a muitos quilômetros de distância.

Ao meu querido e amado pai José Felício, ainda que descrente de quanto longe eu chegaria, sempre me apoio em minhas decisões.

A meus irmãos Joan, Johnnys e Joab que levo no meu coração sempre.

(JANICLEI TORRES ALENCAR)

A Deus, que em sua infinita sabedoria guia meus caminhos me proporcionando saúde, serenidade e disposição para enfrentar todas as etapas desta árdua caminhada.

A meus pais Ernélio Joaquim e Maria Aucelir que com seu amor infinito e apoio incondicional é responsável por minha base pessoal e educacional.

Ao meu filho Pedro Henrique que mesmo sem saber direito tem me proporcionado motivação com seu simples gesto de sorriso e carinho ingênuo.

Ao meu irmão, namorada e amigos que no convívio tornaram suportáveis as horas mais difíceis e puderam compartilhar comigo as horas mais felizes também.

(ERNÉLISON ANGLY DA SILVA SANTOS)

AGRADECIMENTOS

Ao nosso orientador professor Kleber Sabat pela atenção, compreensão e sabedoria dispensadas a mim durante o período de elaboração deste trabalho.

Ao Professor Luiz Carlos Casteletti pelo empenho e dedicação quando eu precisei realizar experimentos em seu laboratório, aos colegas e amigos da USP –São Carlos Gustavo, Takeia, Galtierre Fábio, Crammer e todos que contribuíram direta e indiretamente para o sucesso desse trabalho.

Ao Amigo Paulo Wilmar por me acolher em sua casa e se esforçar ao máximo para que eu pudesse realizar todos os meus trabalhos durante a minha estadia em São Carlos.

A Professora Querem Hapuque por nos ajudar e se esforçar ao máximo para que pudéssemos realizar nosso TCC.

“Para cada homem que sai do seu portão, existem milhões de adversários”

Mestre Gichin Funakoshi.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	16
1. JUSTIFICATIVA.....	18
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. Objetivos Gerais.....	19
2.2. Objetivos Específicos.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 Tribologia ao longo da história.....	20
3.2. Conceitos.....	22
3.2.1 Fricção.....	22
3.2.2 Lubrificação.....	23
3.2.2.1 Lubrificação Hidrodinâmica.....	23
3.2.2.2 Lubrificação Elastohidrodinâmica (EHL).....	23
3.2.2.3 Lubrificação de contorno.....	24
3.2.3. Desgaste.....	25
3.2.3.1. Desgaste abrasivo.....	28
3.2.3.2 Desgaste adesivo.....	33
3.2.3.3 Fadiga.....	34
3.2.3.4 Corrosivo.....	34
3.2.4 Ligas Metálicas.....	36
3.2.4.1 Liga de alumínio 7075.....	36

3.2.4.2 Aço 1020 e 1045.....	37
4. MATERIAIS E METODOS.....	44
4.3 Conhecendo o equipamento.....	46
4.4 Experimentos.....	47
4.4.1 Alumínio 7075	48
4.4.2 Aço AISI 1020	51
5.2.3 Aço AISI 1045	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
5.1.1. Análise Metalográfica da liga Al 7075.....	54
5.2 Aço AISI 1020	56
5.2.1 Analise metalográfica da liga Aço AISI 1020.....	56
5.3 Aço AISI 1045	58
5.3.1 Analise Metalográfica da liga Aço AISI 1045	59
CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
APÊNDICES	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Desenho da época do antigo Egito que demonstra como eles já utilizavam as técnicas da tribologia para facilitar o transporte de alguns materiais. Fonte: RADI et al; 2007	20
Figura 02 – Representação esquemática de um sistema tribológico e dos elementos que o constituem. Fonte: CRUZ, 2008.....	25
Figura 03 – Classificação dos modos de desgaste. Fonte: CRUZ.....	26
Figura 04 – Representa esquemática dos mecanismos de desgaste. Fonte: CRUZ, 2008.....	27
Figura 05 – Representação do processo de desgaste abrasivo. Fonte: TYLCZAK e OREGON (1992)	28
Figura 06 – Esquema simplificado do desgaste abrasivo. Onde FT é a força tangencial, FN é a força normal ou carga aplicada e θ é o ângulo de inclinação das asperezas. Fonte: (BHUSHAN e GUPTA;1991).....	29
Figura 07 – (a) Desgaste abrasivo a dois corpos; (b) Desgaste abrasivo a três-corpos. Fonte: CRUZ, 2008	29
Figura 08 – Morfologia da superfície desgastada: (A) Desgaste abrasivo á dois corpos; (B) Desgaste abrasivo a três-corpos. Fonte: COLAÇO in CRUZ, 2008	30
Figura 09 – Representação Esquemática dos parâmetros da calota esférica. Fonte: COLAÇO in CRUZ, 2008	31
Figura 10 – Sistemas tribológicos envolvidos em desgaste adesivo. Fonte: (GAHR, 1987, p.86).....	33
Figura 11 – <u>S</u> istemas tribológicos que envolvem desgaste por fadiga de superfície. Fonte: (GAHR,1987, p.100)	34

Figura 12 – Fundamentos de corrosão Fonte: Pannoni in OLIVEIRA, 2012	35
Figura 13 – Gráfico de diagrama de fase do Ferro- Carbono. Fonte: GROOVER, 2014	38
Figura 14 – Gráfico de limite de resistência à tração x dureza. Fonte: GROOVER, 2014	39
Figura 15 – Tribômetro abrasivo/USP-São Carlos. Fonte: Santos, 2015	47
Figura 16 – Aferição da massa de prova em balança analítica. Fonte: SANTOS, 2015	48
Figura 17 – Amostras de Al 7075 preparadas. Fonte: SANTOS, 2015	49
Figura 18 – Detalhe do teste. Fonte: SANTOS, 2015	49
Figura 19 – Massa de prova. Fonte: SANTOS, 2015	49
Figura 20 – Amostra de Al 7075 desgastada. Fonte: SANTOS, 2015	50
Figura 21 – Microscópio óptico ZEISS AXIO com câmera embutida AXIO CAM ERC55 Fonte: SANTOS, 2015	51
Figura 22 – Microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS. Fonte: DQ-UFAM	51
Figura 23 – Aço 1020 parcialmente tratado. Fonte: SANTOS, 2015	52
Figura 24 – Aço 1045 parcialmente tratado. Fonte: SANTOS, 2015	53
Figura 25 – Figura 25 – Metalografia do alumínio: Borda da calota aumentada 500 vezes. Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS - DQ-UFAM	55
Figura 26 – Metalografia do alumínio: chapa aumentada 500 vezes Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM	55
Figura 27 – Borda da calota de aço 1020 aumentada 500 vezes Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM	57
Figura 28 – Borda da calota 2 (10 min)- aço 1020 - parcialmente oxidada aumentada 500 vezes Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM	57
Figura 29 – Calota no aço 1045 com o tempo de 5 minutos. Fonte: microscópio óptico ZEISS AXIO	58

Figura 30 – Borda da calota (aço 1045) aumentada 500 vezes. Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM..... 60

Figura 31- Borda da calota 2 (10 min)-aço1045- parcialmente oxidada aumentada 500 vezes. Fonte: Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM..... 60

LISTA DE FIGURAS

Gráfico 01 - Desgaste da liga de alumínio. Fonte: autoria própria	54
Gráfico 02 - Desgaste do aço 1020. Fonte: autoria própria	56
Gráfico 03 - Desgaste do aço 1045. Fonte: autoria própria	59
Gráfico 04 - Gráfico Semilog em y relacionando Distância de deslizamento com o volume de Calota impressa nas amostras. Fonte: autoria própria	61

LISTAS DE SIGLAS

Al – Alumínio;

AlSn – Alumínio e Estanho;

AISI – Instituto Americanos de Ferro e Aço;

AlSi – Alumínio e Silício;

AlZn – Alumínio e Zinco;

CV – Cavalo a vapor (unidade de potência);

DEA-EESC/USP – Departamento de Engenharia Aeronáutica – EESC/USP;

DEM – Departamento de Engenharia dos Materiais – EESC/USP;

DQ/UFAM – Departamento de Química /UFAM;

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos – USP;

EHL – Elastohidrodinâmica;

Fe – Ferro;

Fe₃C – Cementita

LAM – Laboratório de Análise de Materiais;

LTS-EESC/USP – Laboratório de Tratamento de Superfícies – EESC/USP;

NBR – Normatização Brasileira;

OECD – Grupo de pesquisa de desgaste;

PIB – Produto Interno Bruto;

SAE – Sociedade de Engenheiros Americanos;

UFAM – Universidade Federal do Amazonas;

USP – Universidade de São Paulo.

LEEM – Laboratório de Eletroquímica e Ensaio de Matérias.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Classificação dos mecanismos de desgaste para diferentes autores da literatura. Fonte: CRUZ, 2008	26
Tabela 02 – Composição do alumínio 7075. Fonte: COPPERMETAL AÇOS E METAIS	36
Tabela 03 – Comparação das propriedades físicas. Fonte: COPPERMETAL AÇO E METAL	37
Tabela 04 – Parâmetros usados nos ensaios de desgastes no LTS-USP/São Carlos. Fonte: autoria própria.....	48

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa sobre o comportamento tribológico das ligas Al 7075, Aço AISI 1020 e Aço AISI 1045, quando submetidos a ensaio de desgaste de microabrasão (ball cratering) sem o uso de lubrificante. Foram realizados testes para cada liga estudada, utilizando uma carga de 1,4 N, nos tempos de 5, 10, 15 e 20 min e rotação de 230 rpm. Para análise da superfície desgastada foram utilizadas caracterizações das amostras em microscopia ótica e de varredura. A resistência ao desgaste foi mensurada através do parâmetro “V”, o qual indica o volume da calota impressa pela esfera do ensaio com base no diâmetro da mesma (Colaço, 2001). De acordo com os resultados obtidos, a liga Al7075 apresentou uma inferioridade significativa concernente à resistência ao desgaste, enquanto que os aços 1045 e 1020 apresentaram resistências quase que equivalentes com uma leve vantagem para o aço 1045. Esse comportamento deve-se a presença de uma concentração maior de carbono aumentando a dureza. Mas no teste realizado para o último tempo (20 min) houve uma queda na resistência do aço 1045, indicando que o aço AISI 1045 pode apresentar uma redução na resistência ao desgaste para elevadas distâncias de deslizamento.

Palavras-Chave: tribologia; desgaste abrasivo de ligas metálicas; estudo comparativo do desgaste de ligas metálicas.

ABSTRACT

The main objective of this study is to analyze a comparative research about the tribological behavior of Al7075, AISI 1020 and AISI 1045 steels during the ball crater abrasion wear test without the presence of lubricants (abrasive slurry). The tests were performed for each alloy with a load equal to 1.4N, during 5, 10, 15 and 20 minutes and the rotation used was equal to 230 rpm. Scanning electron microscopy and optical microscopy were used to characterize the worn samples. The wear resistance was measured by calculating the worn volume (V), with the basis on the diameter of the crater produced by the rotating sphere. (Colaço, 2001). According to the results, the alloy Al7075 presented the lower wear resistance and the AISI 1020 and AISI 1045 steels obtained a similar wear behavior, probably due to the presence of carbon, which makes the hardness increase. However, when the sliding distance is about 276 m, the wear resistance of AISI 1045 steel falls indicating that AISI 1045 may present lower wear resistance for longer sliding distances

Key-words: tribology; abrasive wear of metal alloys; Comparative study of wear alloys.

INTRODUÇÃO

A palavra tribologia tem origem grega e deriva da palavra tribos, a qual significa atrito, juntamente com a palavra logos, que significa estudos, portanto podemos definir Tribología como a ciência que estudo o atrito e o desgaste (RADI; SANTOS; BONETTI; AIORID, 2007). O objeto de estudo da tribologia são as interações entre as superfícies de dois corpos em movimento relativo, esse movimento pode ser translacional ou rotacional (RODRIGUEZ, 2007). Fatores como custo, rendimento, confiabilidade e resistência são extremamente avaliados nos estudos da tribologia. Na indústria de modo geral o desgaste de peças em equipamentos e economia de energia têm sido alguns dos fatores de extrema preocupação por parte de técnicos e engenheiros devido à redução da vida útil de máquinas e componentes.

Diferente do que se imagina a tribologia não é algo novo, registros históricos mostram que mesmo antes da humanidade, no período conhecido como paleolítico ou idade da pedra lascada, os seres humanos primitivos já usavam conceitos de tribologia para realizar suas tarefas cotidianas. Ferramentas feitas com ossos ou pedras é um bom exemplo da aplicação do atrito e desgaste para afia-las. Outro feito interessante dos homens pré-históricos foi à invenção da roda que propiciou maior facilidade para o deslocamento de determinados objetos.

No período do renascimento ideias acerca do formalismo do estudo do atrito começam a surgir, mesmo já identificado há bastante tempo muito poucos documentos mostravam teorias ou até mesmo reconhecia a existência do atrito. O pioneiro a escrever leis foi o artista, matemático, filósofo e engenheiro Leonardo da Vinci, talvez o homem mais influente de sua época, e por muitos apontado como o homem mais inteligente que a humanidade já conheceu. Ele estudou e descreveu as leis que governam o movimento entre um bloco e uma superfície plana em movimento relativo, além de introduzir o conceito de coeficiente de atrito (RODRIGUEZ, 2007).

Bom, mas para que serve o estudo do atrito e desgaste atualmente?, bem, como sabemos, nós estamos cercados de maquinas por todos os lados, isso nos faz questionar sobre o material utilizado nos componentes de maquinas, e é exatamente para aprimorar esses materiais que se estuda tribologia. Com o avanço da engenharia dos materiais, várias ligas foram criadas para satisfazer o desejo da indústria, embora muitas dessas ligas tenham propriedades interessantes nem sempre determinada liga é a escolha considerada ótima para determinada aplicação.

A tribologia está inserida num campo específico da engenharia, chamado seleção de materiais, por exemplo, se determinado engenheiro cria uma maquina para fazer fraldas descartáveis, ele com certeza estará interessado em uma liga que suporte a carga de trabalho sem criar fadiga na estrutura, ao mesmo tempo em que tem que ter baixo custo de construção, resistente a ação do tempo e que economize o máximo de energia possível.

Para esse engenheiro atender os requisitos ele terá que recorrer aos estudos de tribologia, e encontrar um material leve como as ligas de alumínio ou magnésio, resistente a ação do tempo (resistente a corrosão) e que não frature durante a carga de trabalho. Para fazer o teste de fadiga, o engenheiro deve recorrer a dois testes, ensaio de abrasivo a 2-corpos com esfera fixa ou ensaio abrasivo a 2-corpos com esfera rotativa. Feito isso o engenheiro terá informações suficientes para tomar uma decisão coerente sobre a escolha do material para construção da maquina de confeccionar fraldas.

1. JUSTIFICATIVA

Na indústria de modo geral o desgaste de peças em equipamentos tem sido um fator de extrema preocupação por parte de técnicos e engenheiros devido à redução da vida útil de máquinas e componentes. Estudos anteriores efetuados em países industrializados da Europa, constataram que perdas econômicas devido aos problemas relacionados ao desgaste e atrito chegaram à 2,5 % do produto interno bruto (PIB).

Atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas do material, mas são funções do sistema tribológico que se forma quando duas superfícies estão em movimento relativo. O atrito e o desgaste podem ser, respectivamente, causas da dissipação de energia e da dissipação de material. Para o grupo parisiense de pesquisa em desgaste de materiais de engenharia OECD [OECD- grupo de pesquisa em desgaste, 1969], o desgaste é definido como a “perda progressiva de substância de uma superfície de um corpo como resultado da ação de um movimento relativo sobre esta superfície”. Na norma DIN 50320, desgaste é definido como “perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, ou seja, o contato e o movimento relativo contra um outro corpo, o qual pode estar no estado líquido, gasoso ou sólido”.

O desgaste está relacionado à perda de material podendo causar alterações dimensionais em peças ou danos superficiais que resultam em problemas secundários como vibração e desalinhamento de componentes mecânicos, além de poder gerar trincas próximo ou na superfície solicitada, resultando na fratura em casos extremos. De maneira geral, a tribologia abrange o estudo de três grandes tópicos, quais sejam: atrito, desgaste e lubrificação. Portanto, o estudo do comportamento tribológico de materiais aplicados em engenharia se torna de extrema necessidade, para que se tenha um conhecimento mais detalhado de como os materiais se comportarão em operação.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

- Analisar o ensaio de desgaste micro-abrasivo (ball cratering wear test) por esfera rotativa fixa, usados para a caracterização tribológica de ligas metálicas: ferroso (Aço 1020 e 1045) e um não-ferroso (Liga de Al) submetidos a tratamento superficial.

2.2. Objetivos Específicos

- Estudar os parâmetros (carga do ensaio, tempo de ensaio, presença ou não de lubrificante, material da esfera usada, rotação) do ensaio para verificação da resistência ao desgaste de materiais metálicos ferrosos e não-ferrosos tratados superficialmente e estudados neste trabalho;
- Comparar os parâmetros dos ensaios para a avaliação da resistência ao desgaste de materiais ferrosos e não-ferrosos estudados neste trabalho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Tribologia ao longo da história

Diferente do que se imagina a tribologia não é algo novo, registros históricos mostram que mesmo antes da humanidade, no período conhecido como paleolítico ou idade da pedra lascada, os seres humanos primitivos já usavam conceitos de tribologia para realizar suas tarefas cotidianas. Ferramentas feitas com ossos ou pedras é um bom exemplo da aplicação do atrito e desgaste para afia-las. Outro feito interessante dos homens pré-históricos foi a invenção da roda que propiciou maior facilidade para o deslocamento de determinados objetos.

No antigo Egito a aplicação de princípios tribológicos na redução do atrito em movimentos lineares pode ser constatada. Na Figura 01 podemos ver o uso de rolos e pranchas para transportar a enorme estátua, como 172 escravos com o utilitário de puxar a grande estatueta pesando cerca de 6×10^5 N (60 ton.). No desenho podemos ver que há um homem sobre a rampa que coloca um líquido na sua frente, que provavelmente seja água. Este lubrificante irá reduzir o atrito, facilitando o transporte, conforme ilustrado.

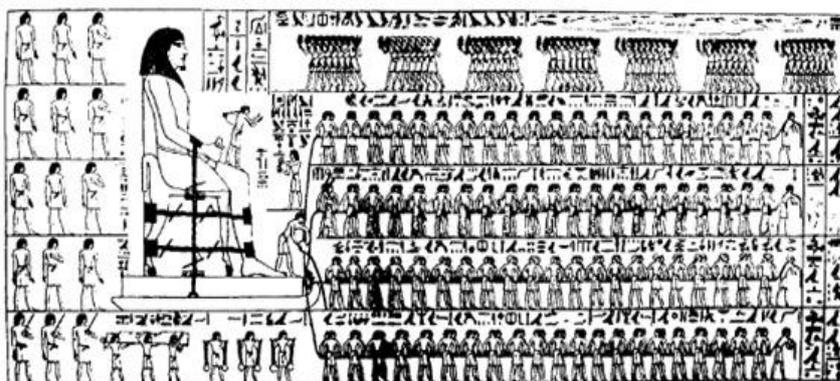


Figura 01 – Desenho da época do antigo Egito que demonstra como eles já utilizavam as técnicas da tribologia para facilitar o transporte de alguns materiais. Fonte: RADI et al; 2007

No período do renascimento ideias acerca do formalismo do estudo do atrito começam a surgir, mesmo já identificado há bastante tempo muito poucos documentos mostravam teorias ou até mesmo reconhecia a existência do atrito. O pioneiro a escrever leis foi o artista, matemático, filósofo e engenheiro Leonardo da Vinci, talvez o homem mais influente de sua época, e por muitos apontado como o homem mais inteligente que a humanidade já conheceu. Ele estudou e descreveu as leis que governam o movimento entre um bloco e uma superfície plana em movimento relativo, além de introduzir o conceito de coeficiente de atrito (RODRIGUEZ, 2007). Outras contribuições deste cientista foram: estabelecer a importância dos lubrificantes para diminuir a força de atrito; observar o efeito da rugosidade no deslizamento e demonstrar o que a interposição de esferas entre corpos diminui a resistência ao movimento. Infelizmente as leis de Leonardo nunca foram publicadas.

Em 1699 o físico Francês Guillaume Amontons descobriu as leis do atrito ao estudar o movimento relativo entre duas placas planas. Amonton, independentemente de Leonardo da Vinci, realizou investigações experimentais e postulou suas leis. No século XVIII houve desenvolvimentos tribológicos devido ao crescimento no desenvolvimento de novas máquinas. Em aproximadamente 1780, Coulomb confirmou as leis de atrito de Amonton, e assim estabeleceu a terceira lei, que descrevia que a força de atrito é independente da velocidade. Estas três leis ainda são usadas até hoje, e podem ser encontradas facilmente em livros de física e engenharias sobre atrito.

No mesmo período Stoke e Petroff contribuíram para o desenvolvimento de mancais hidrodinâmicos. Com a crescente demanda por mancais adequados foi necessário o desenvolvimento rápido da teoria e prática da lubrificação hidrodinâmica, para ser aplicada nas novas máquinas.

No início do século XX os conhecimentos na área da tribologia tiveram um grande crescimento, impulsionados pela demanda industrial. Os mancais que eram baseados em esferas que eram utilizadas nas indústrias por volta de 1700, obtiveram uma eficiência incomum, trazendo assim uma solução muito econômica e flexível para muitos problemas de projetos tribológicos.

Os lubrificantes são elementos essenciais para a solução de alguns problemas tribológicos, e as suas características e qualidade vem mudando rapidamente, tentando acompanhar a necessidade industrial do mesmo.

Outros pioneiros da tribologia foram John Theophilus Desaguliers (1683-1744), Leonard Euler (1707-1783), Charles Augustin Coulomb (1736-1806) e Charles Hatcheff (1760-1820), Osborne Reynolds (1842-1919), Heirich Rudolph Hertz (1869-1851), George Vogelpohl (1900-1975), Frank Philip Boluden (1903-1968). Estes e outros cientistas foram de grande importância no desenvolvimento da tribologia. Em 1976 foi publicado o livro “History of tribology” escrito por Dowson, no mesmo ele mostra as contribuições mais importantes de cada um deles (RADI; BONETTI; SANTOS; AIROLDI; 2007)

3.2. Conceitos

A tribologia é a ciência que investiga todos os tipos de atrito, desgaste e de lubrificação assim como as técnicas de aplicação. Na indústria ela tem como objetivo valorizar o tempo de vida das máquinas ou componente de produção, com a finalidade de evitar falhas mecânicas geradas pelo atrito e desgaste, prevenindo possíveis quedas na produção ou até mesmo acidentes que podem colocar a vida dos trabalhadores em risco.

3.2.1. Fricção

Quando colocamos duas superfícies uma sobre a outra sendo elas planas e paralelas, a área que estará em contato é conhecida como asperezas. Este contato irá promover a formação de junções de asperezas, que determinam a intensidade da força de fricção produzida. A definição desta força é calculada através da resistência encontrada no movimento de um corpo em relação ao outro. Segundo a primeira lei da fricção, o seu coeficiente é medido através da fórmula:

$$\mu = F/W \quad \text{eq.01}$$

Sendo que (μ) é o coeficiente de fricção, (F) a força de fricção e o (W) um determinado carregamento. A força de fricção depende principalmente da resistência ao cisalhamento das junções de asperezas formadas.

3.2.2. Lubrificação

O objetivo da lubrificação é produzir uma camada de baixa resistência ao cisalhamento, que irá diminuir a resistência desta junção, assim reduzindo a fricção. O lubrificante em alguns casos não irá prevenir as asperezas entre contato, mas irá reduzi-la de uma forma brusca. Em outros casos o lubrificante pode vir a separar completamente as superfícies, fazendo assim como que não se forme as junções de asperezas. Com isto podemos ver que o uso de lubrificantes sempre reduzirá a taxa de desgaste, sendo que esta será uma função direta do tipo de lubrificante presente no processo.

3.2.2.1. Lubrificação Hidrodinâmica

Quando se utiliza lubrificação hidrodinâmica, forma-se uma camada relativamente espessa de lubrificante fluido que irá relativamente separar as superfícies em movimento, esta camada é produzida hidrodinamicamente. Para se empregar este tipo de lubrificação as superfícies opostas devem ser geometricamente semelhantes, de forma que serão separadas por um pequeno espaço que será preenchido pelo lubrificante.

3.2.2.2. Lubrificação Elastohidrodinâmica (EHL)

Em alguns casos, as superfícies que estão em contato têm a forma geométrica diferente fazendo com que a zona de contato seja pequena. Normalmente elas são uma linha ou um ponto de contato, nesse caso a tensão nesta área será muito maior do que aquela encontrada para as ocasiões nas quais é utilizada a lubrificação hidrodinâmica. O contato entre dentes de engrenagens de uma máquina é um bom exemplo, pois esse contato ocorre em pequenas áreas. Neste caso a lubrificação adequada é conhecida com “elastohidrodinâmica”, frequentemente abreviada como EHL (QUEIROGA, 2010).

Na EHL ocorre uma deformação elástica das superfícies, sendo que estas superfícies são consideradas rígidas. Além disso, com o aumento da tensão de contato, aumenta a viscosidade do filme. Em condições de EHL pode vir a ocorrer formação de um filme fluido pleno de lubrificante que evita efetivamente o contato entre as asperezas das superfícies opostas.

A rugosidade da superfície e a espessura mínima da camada de lubrificante (h_{\min}) é o que irá determinar se terá um filme pleno de lubrificante que separe as duas superfícies em contato ou não. Logo, é importante termos o resultado da seguinte razão:

$$\lambda = h_{\min}/\sigma^* \quad \text{eq.02}$$

onde σ é definida por:

$$\sigma^* = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2} \quad \text{eq.03}$$

R_{q1}^2 e R_{q2}^2 são os valores de rugosidade quadrática média de cada superfícies.

O valor de λ fornece uma média da severidade das interações entre as asperezas das superfícies opostas com uma determinada lubrificação. Para $\lambda > 3$, um filme fluido pleno de lubrificante separa as duas superfícies, o contato entre as asperezas é desprezível e em ambos a fricção e o desgaste devem ser baixos. Porém a maioria dos contatos de superfícies com formatos geométricos diferentes opera com $\lambda < 3$. O regime $1 < \lambda < 3$ é conhecido como EHL parcial e misto, nestes casos pode haver algum contato entre as asperezas, e o desgaste vai ser maior do que na presença de um filme fluido pleno de lubrificante. Para valores de λ menores do que 1, somente a presença de um lubrificante de contorno pode prevenir que a taxa de desgaste alcance valores encontrados em um sistema não lubrificado (QUEIROGA, 2010).

3.2.2.3. Lubrificação de contorno

Quando se tem uma baixa velocidade ou uma grande tensão de contato, as forças hidrodinâmicas serão insuficientes para manter um filme fino EHL entre as superfícies em contato, desta forma ocorrerá o contato direto entre as asperezas. Nestes casos devem ser utilizados lubrificantes de contorno, caso contrário, terá uma alta fricção e alta taxa de desgaste. Os lubrificantes de contorno formam filmes de moléculas adsorvidas nas

superfícies. Estes filmes terão forças repulsivas, fazendo com que suportem boa parte do carregamento, o contato direto entre as asperezas desprotegidas é prevenido ou limitado a este contato (QUEIROGA, 2010).

3.2.3. Desgaste

Um sistema mecânico é constituído por vários subsistemas que trabalham harmonicamente para ter uma boa eficiência. Estes subsistemas podem estar sujeitos a desgaste tribológico, levando a problemas no funcionamento geral do equipamento. Um subsistema pode ser denominado como sistema tribológico, o qual pode ser descrito de forma estrutural ou funcional. A análise funcional está direcionada para avaliar a relação que o sistema tem com os elementos que o cercam, já a descrição estrutural de um sistema tribológico está relacionada aos elementos que o constituem, a sua natureza, propriedades e interação, bem como o ambiente onde está inserido.

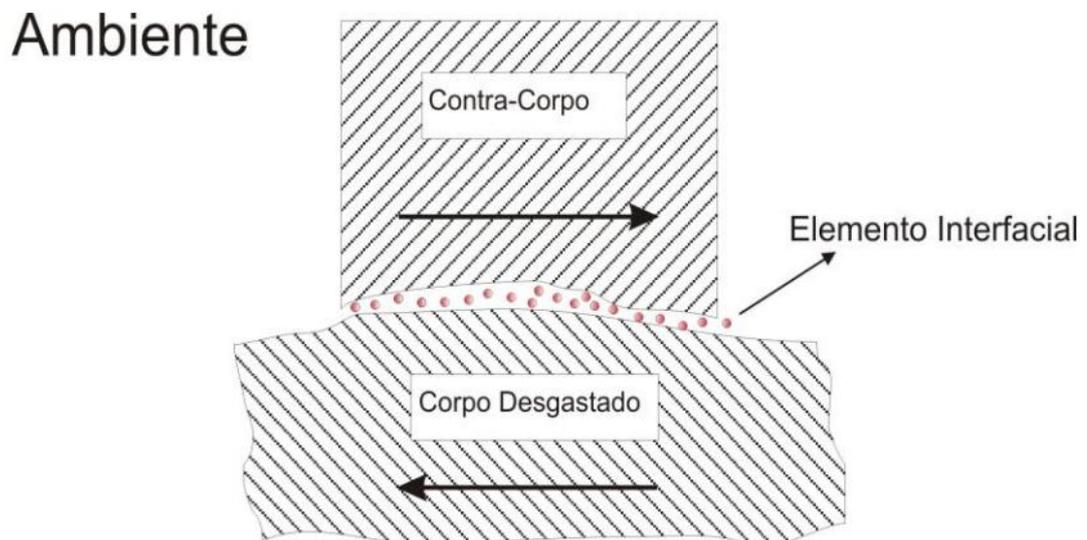


Figura 02 – Representação esquemática de um sistema tribológico e dos elementos que o constituem.

Fonte: CRUZ, 2008

Na figura 02, podemos ver a representação de um sistema tribológico que é basicamente formado por quatro elementos: corpo desgastado (que sofre o desgaste), o contra-

corpo, elemento interfacial e o ambiente. O contra-corpo pode estar no estado sólido, líquido ou gasoso, assim o elemento interfacial pode ser um lubrificante líquido, uma solução abrasiva, uma camada depositada ou até uma partícula estranha inserida na região de contato. Em alguns casos o elemento interfacial pode estar ausente.

Na figura 03 podemos observar a representação esquemática das diferentes ações do contra-corpos sobre o corpo sólido. Podem ser por deslizamento, rolagem, oscilação, impacto ou erosão, estas ações baseiam-se na cinética do sistema tribológico. Outros tipos de classificações podem levar em consideração o estado físico do contra-corpo ou o ângulo de ação do mesmo. Com relação ao elemento interfacial, pode-se ter um processo de desgaste a seco ou lubrificado.



Figura 03 – Classificação dos modos de desgaste. Fonte: CRUZ, 2008

Na literatura podemos observar a variedade de classificações dos mecanismos de desgaste. Que modifica conforme os seus respectivos autores, como podemos notar na tabela 01.

Burwell & Strang [Burwell&Strang, 1952]	Jahanmir [Jahanmir, 1980]	Godfrey [Godfrey, 1980]	Rice [Rice]	DIN 50320 [Norma DIN 50320, 1979]
<ol style="list-style-type: none"> 1. Abrasivo 2. Adesivo 3. Corrosivo 4. Fadiga Superficial 5. Fretting 6. Erosão 7. Cavitação. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adesão 2. Delaminação 3. Fretting 4. Abrasão 5. Erosão 6. Impacto 7. Fadiga Superficial 8. Corrosivo 9. Difusivo 10. Contato elétrico 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adesivo Suave 2. Adesivo Severo 3. Abrasão 4. Erosão 5. Fadiga 6. Delaminação 7. Corrosivo 8. Eletrocorrosivo 9. Corrosivo por Fretting 10. Cavitação 11. Descarga elétrica 12. Polimento 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adesão 2. Abrasão 3. Fadiga 4. Corrosão ou Oxidação 5. Elétrica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adesão 2. Abrasão 3. Fadiga Superficial 4. Reação Triboquímica

Tabela 01 – Classificação dos mecanismos de desgaste para diferentes autores da literatura. Fonte : CRUZ, 2008

Na tabela acima podemos notar que segundo Zun-Gahr [Zum-Gahr, 1987], algumas classificações parecem redundantes, como, por exemplo, na classificação de Godfrey, que classifica desgaste adesivo suave e desgaste adesivo severo, essa diferenciação está relacionada à severidade do desgaste e não ao mecanismo. De acordo com a classificação de Jahanmir, os primeiros sete tipos estão relacionados com a interação mecânica e os três últimos são influenciados por ambientes ou condições especiais. Já na classificação de Burwell e Strang, tem-se como um dos mecanismos o “Fretting”, o qual pode ser visto como um tipo especial de desgaste triboquímico (corrosivo). O desgaste é causado quando duas superfícies sofrem um pequeno movimento relativo tangencial oscilatório de baixa amplitude [Hurricks,1974; Waterhouse, 1975,1979; Sproles,1978]. Retirando a redundância das classificações temos quatro principais mecanismos de desgaste, que são:

- Desgaste Abrasivo
- Desgaste Adesivo
- Fadiga superficial
- Desgaste corrosivo (reação triboquímica)

A norma da DIN 50320 adota esta classificação, os mecanismos estão esquematicamente representados na Figura 04.

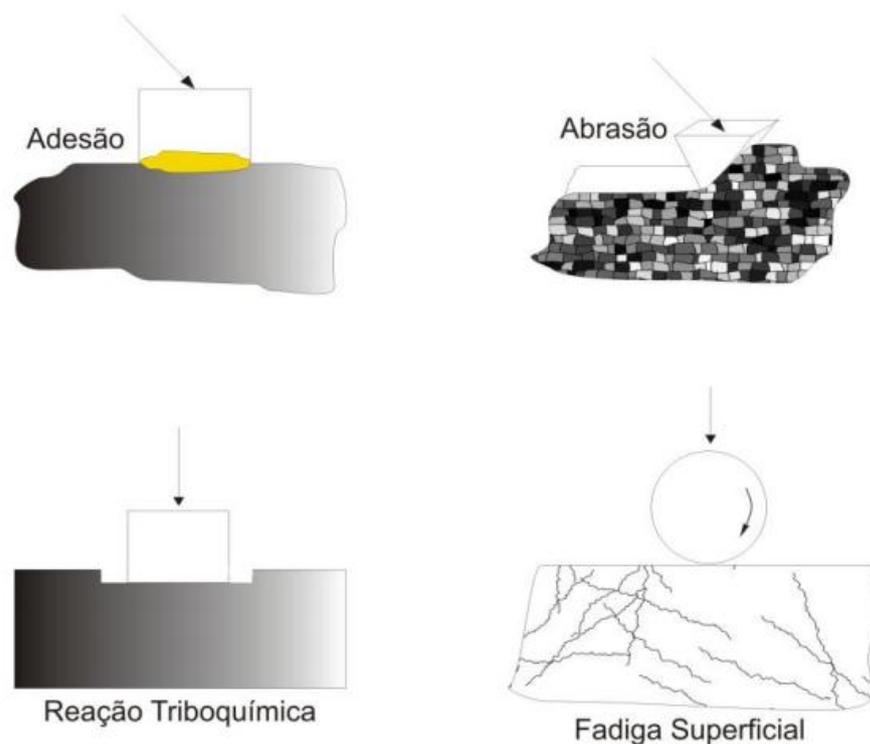


Figura 04 – Representa esquemática dos mecanismos de desgaste. Fonte : CRUZ, 2008

3.2.3.1. Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo pode ser descrito como um estrago a uma superfície causada por um material duro. Este dano pode ocorrer em duas situações gerais. Na primeira situação, a superfície é friccionada por duas superfícies (abrasão por dois corpos). Na segunda, a superfície abrasiva é um terceiro corpo, geralmente uma partícula pequena e suficientemente dura capturada de um dos corpos envolvidos, que está entre as duas superfícies (BHUSHAN; GUPTA, 1991).

A Figura 05 mostra um processo de desgaste abrasivo, no qual o material mais duro (B) desgasta um material mais mole (A).

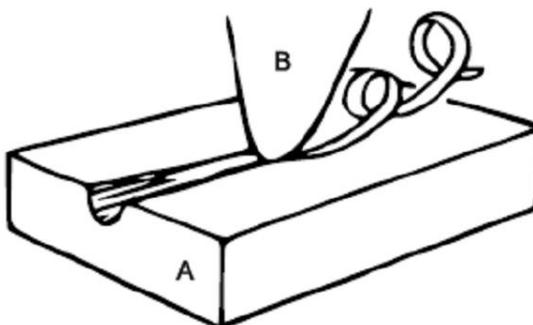


Figura 05 – Representação do processo de desgaste abrasivo. Fonte: TYLCZAK e OREGON (1992)

Ao longo do desgaste frequentemente os fragmentos que são produzidos se desprendem enquanto ocorre o deslizamento das superfícies que estão em contato. Logo as asperezas do material duro penetram no material mais mole causando assim deformações na superfície deste material. (TYLCZAK; OREGON, 1992).

Os efeitos do desgaste abrasivo dependem muito das características do material e do processo. Entre elas estão: Dureza, estrutura cristalina, velocidade de contato e carga aplicada.

Uma expressão numérica para o desgaste abrasivo pode ser dada por: (BHUSHAN; GUPTA, 1991):

$$D = \frac{V}{x} = \frac{kF_n}{\pi H} * \tan\theta \quad \text{eq.04}$$

Onde D é a taxa de desgaste, k é o coeficiente de desgaste, V é o volume desgastado, x é a distância de deslizamento, F_N é a força normal, H é a dureza do material desgastado e $\tan \theta$ é a influencia média dos valores da $\tan \theta$ de todas as asperezas individuais. A Figura 06 mostra um esquema simplificado do desgaste abrasivo e da componente $\tan \theta$.

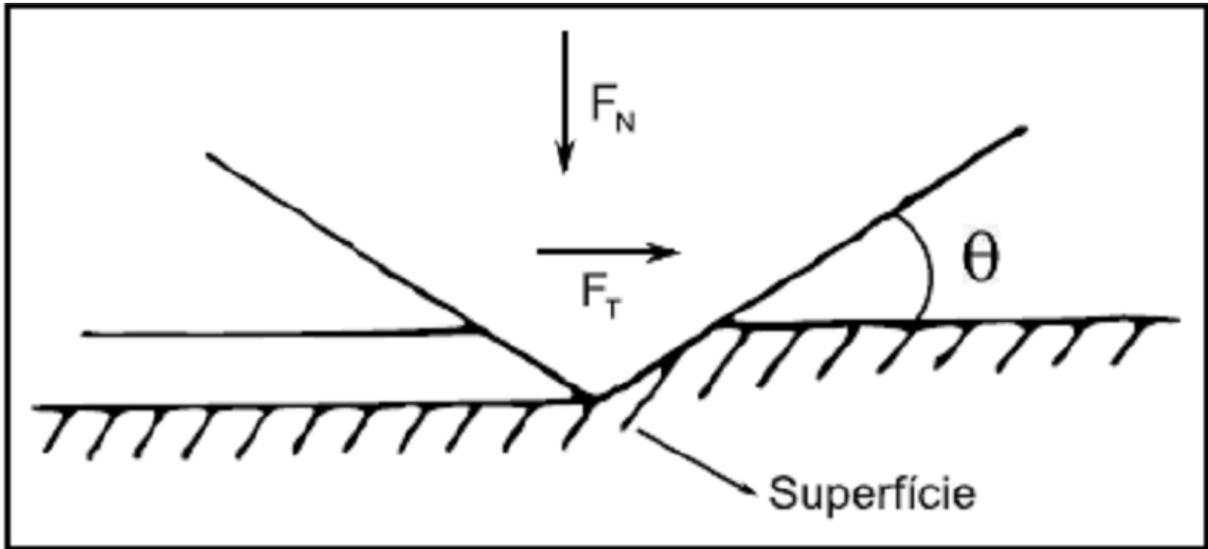


Figura 06 – Esquema simplificado do desgaste abrasivo. Onde F_T é a força tangencial, F_N é a força normal ou carga aplicada e θ é o ângulo de inclinação das asperezas. Fonte: (BHUSHAN e GUPTA;1991).

O desgaste abrasivo pode ser classificado como: desgaste abrasivo a três-corpos ou desgaste por rolamento e desgaste abrasivo a dois-corpos ou por riscamento. Considerando duas superfícies em movimento relativo, no desgaste abrasivo por riscamento as partículas abrasivas estão incrustadas em uma das superfícies (Figura 07-a). Como isto elas só podem deslizar sobre o corpo sólido. No desgaste abrasivo por rolamento (Figura 07-b), as partículas estão livres entre as duas superfícies, podendo rolar entre as mesmas [HUTCHINGS *in* CRUZ, 2008].

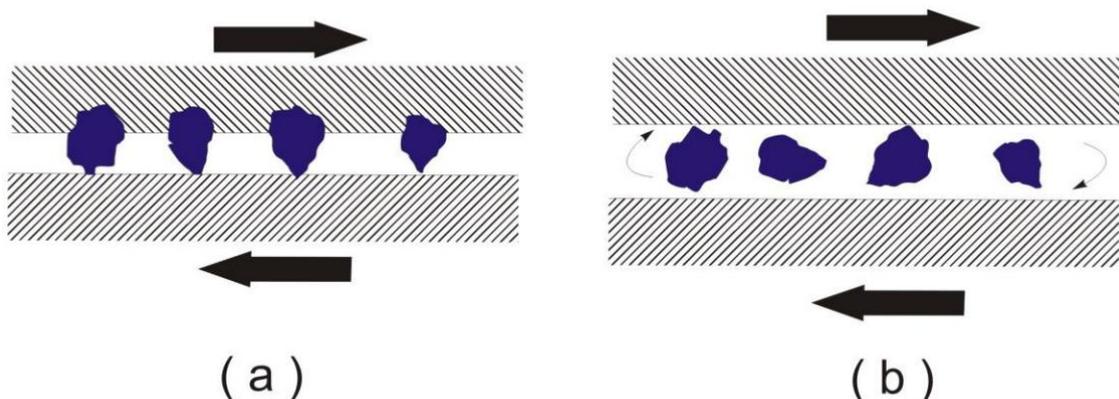


Figura 07 – (a) Desgaste abrasivo a dois corpos; (b) Desgaste abrasivo a três-corpos. Fonte: CRUZ, 2008

A superfície que é submetida a um desgaste abrasivo a três corpos contém riscos demonstrando uma orientação aleatória (Figura 08-b), denotando a presença de partículas livres agindo na região de contato entre a superfície dos elementos do sistema tribológico. Já em superfícies submetidas a um desgaste a dois corpos, a superfície desgastada apresenta riscos paralelos (Figura 08-a), indicando que as partículas duras estavam alojadas em uma das superfícies do sistema tribológico.

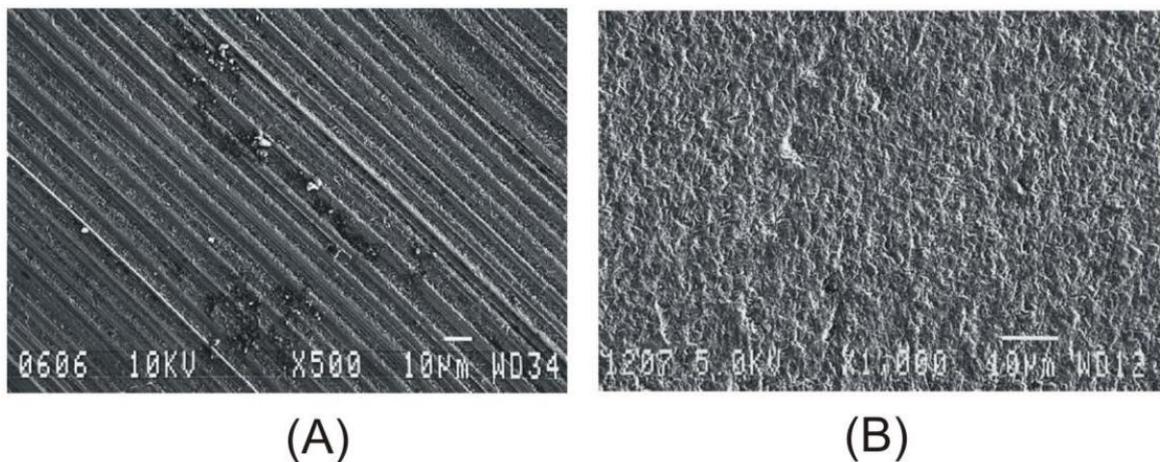


Figura 08 – Morfologia da superfície desgastada: (A) Desgaste abrasivo a dois corpos; (B) Desgaste abrasivo a três-corpos. Fonte: COLAÇO in CRUZ, 2008

Segundo Zum-Gahr [Zum-Gahr, 1987], a partícula abrasiva pode interagir de quatro maneiras: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincamento. No caso ideal, o microsulcamento ocorre apenas um deslocamento de material, na frente e nas laterais da partícula abrasiva, gerando um acúmulo de matéria nas adjacências do sulco formado. A perda da massa pode ocorrer devido à ação simultânea e sucessiva de várias partículas abrasivas, gerando um deslocamento repetitivo de material levando à fratura deste material deslocado através de um baixo ciclo de fadiga, ou seja, microfadiga.

O microcorte gera perda de material em igual volume ao do sulco produzido, já o microtrincamento ocorre quando as partículas abrasivas impõem uma elevada concentração de tensão, principalmente na superfície de materiais frágeis. Neste caso, formam-se cavacos de tamanhos consideráveis devido à nucleação e propagação de trincas. O microsulcamento e o microcorte são interações dominantes em materiais dúcteis e as ocorrências destas interações estão relacionadas ao ângulo de incidência das partículas abrasivas sobre a superfície.

A análise matemática da ação da esfera sobre a amostra no [teste de desgaste abrasivo em escala micro, ou teste de micro-abrasão ou teste esfera-sobre-placa (ball-cratering abrasive wear test)], é apresentada na Figura 09.

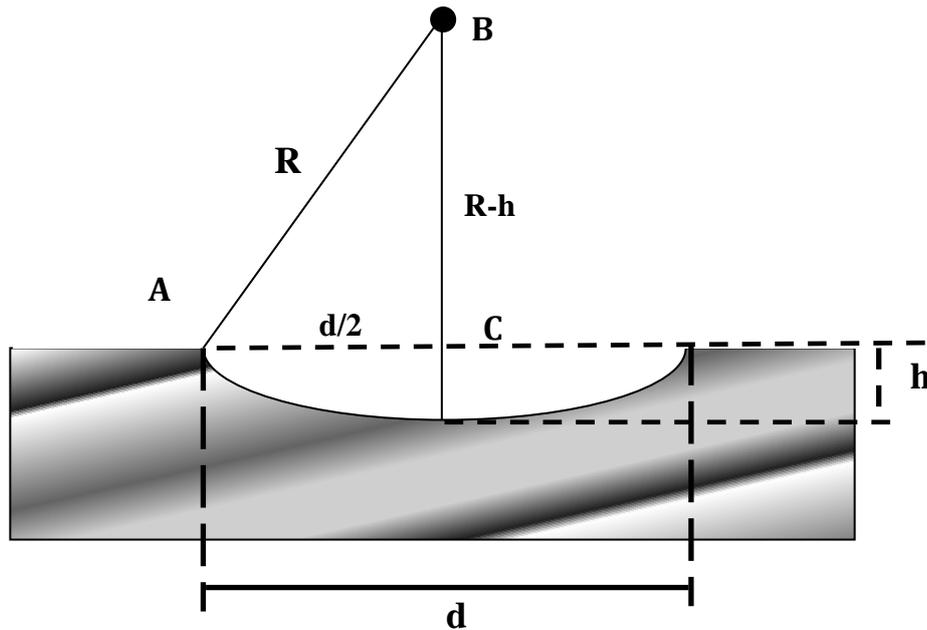


Figura 09 – Representação Esquemática dos parâmetros da calota esférica. Fonte: COLAÇO in CRUZ, 2008

Na Figura 09, tem-se a representação esquemática da calota impressa pelo contra-corpo esférico do ensaio. Partindo do volume da calota, temos:

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot h^2 \cdot (3R - h) \quad \text{eq. 05}$$

onde V - Volume da calota, h – profundidade ou altura da calota, R – raio da esfera ou contra-corpo.

Na Figura 09, considerando o triângulo ABC, usa-se Pitágoras:

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (R - h)^2 = R^2 \quad \text{eq. 06}$$

onde d – Diâmetro da calota esférica impressa na amostra. Desenvolvendo a equação 7.2, tem-se

$$\frac{d^2}{4R} - 2h + \frac{h^2}{R} = 0 \quad \text{eq. 07}$$

se $R \gg h$, então tem-se,

$$h \approx \frac{d^2}{8R} \quad \text{eq. 08}$$

Substituindo na equação 5, vem,

$$V = \frac{\pi}{3} \frac{d^4}{64R^2} (3R - h) \quad \text{eq. 09}$$

mas, $R \gg h$, então chega-se a,

$$V = \frac{\pi d^4}{64R} \quad \text{eq. 10}$$

A partir da equação 10, pode-se estabelecer os parâmetros quantificadores da resistência ao desgaste:

1. Taxa de Desgaste (Q) dada por: $Q = \frac{V}{L}$, sendo “ L ” a distância percorrida pela esfera de raio R :

$$Q = \frac{\pi d^4}{64RL} \quad \text{eq. 11}$$

2. Coeficiente ou Fator de Desgaste (K) dado por: $K = \frac{Q}{F_N}$, sendo F_N a força normal aplicada à superfície da amostra.

$$K = \frac{\pi d^4}{64RF_N L} \quad \text{eq. 12}$$

Este ensaio permite testar amostras pequenas, planas ou curvas, além de permitir a avaliação do comportamento tribológico de revestimentos finos, independente da sua espessura e da sua resistência adesiva (RUTHERFORD *et al*, 1996; 1997). Colaço (2001) avaliou a sensibilidade dos resultados de desgaste desta técnica com relação aos parâmetros

do ensaio: distância do ensaio, velocidade de rotação da esfera, carga aplicada e tipo de abrasivo. A conclusão foi de que o ensaio é reprodutível.

3.2.3.2. Desgaste adesivo

A Figura 10 mostra alguns componentes de equipamentos envolvidos em desgaste adesivo. São eles: cavidades para extrusão, cames e seguidores, engrenagens, mancais, ferramentas de corte.

O desgaste adesivo pode ocorrer quando as superfícies deslizam uma contra a outra. A alta pressão local entre as asperezas em contato resulta em deformação plástica, adesão e conseqüentemente a formação de junções localizadas. O deslizamento relativo entre as superfícies em contato causa ruptura destas junções e frequentemente transfere material de uma superfície para outra. Isto pode aumentar o risco de sobrecarga devido à tensão, velocidade ou temperatura. Sendo relacionado a um grande aumento do coeficiente de fricção e desgaste. Em casos extremos é impossível haver novo movimento relativo. A formação de junção no local do contato entre as duas superfícies pode ser formada por adesão ou coesão. Coesão une as superfícies através de uma solda e do desaparecimento da interface entre as duas superfícies. Adesão preserva a interface na junção

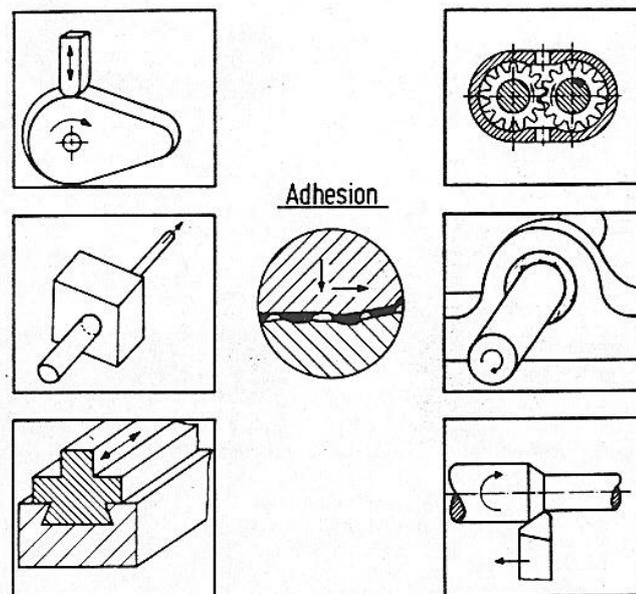


Figura 10 – Sistemas tribológicos envolvidos em desgaste adesivo. Fonte: (GAHR, 1987, p.86)

3.2.3.3. Fadiga

Desgaste devido à fadiga de superfície pode ser caracterizado pela formação de trincas e descamação do material causado por ciclos de carga na superfície do material. Os contatos dos corpos sólidos por rolagem, escorregamento e impacto de sólidos ou líquidos podem resultar em ciclos alternados de tensão na superfície. A fadiga localizada pode ocorrer em escala microscópica devido a contatos entre as asperezas dos sólidos em movimento relativo. A figura 11 mostra sistemas que podem sofrer desgaste devido à fadiga de superfície.

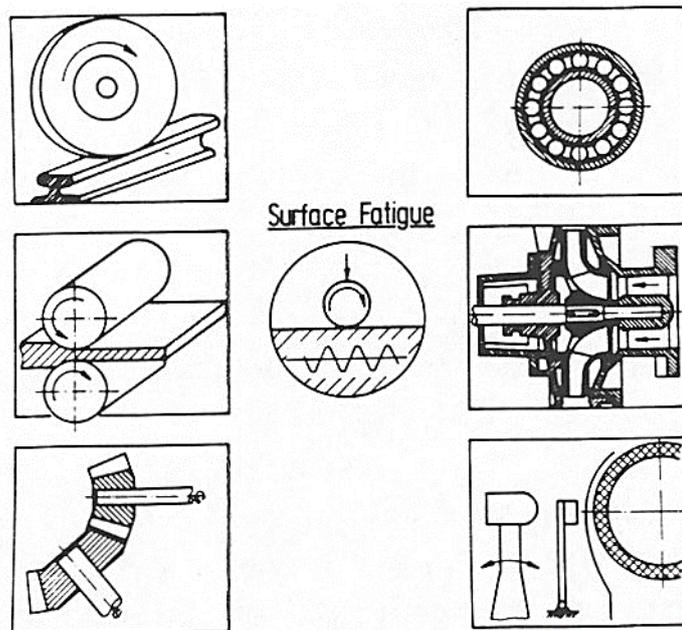


Figura 11 – Sistemas tribológicos que envolvem desgaste por fadiga de superfície. Fonte: (GAHR,1987, p.100)

3.2.3.4. Corrosivo

Corrosão é o resultado do processo de reação de oxidação de um metal na presença de alguma substância ou elemento que sofre redução (OLIVEIRA, 2012). Esse processo eletroquímico degrada o material metálico alterando suas propriedades químicas, físico-químicas e mecânicas. A Figura 12 ilustra o processo de corrosão.

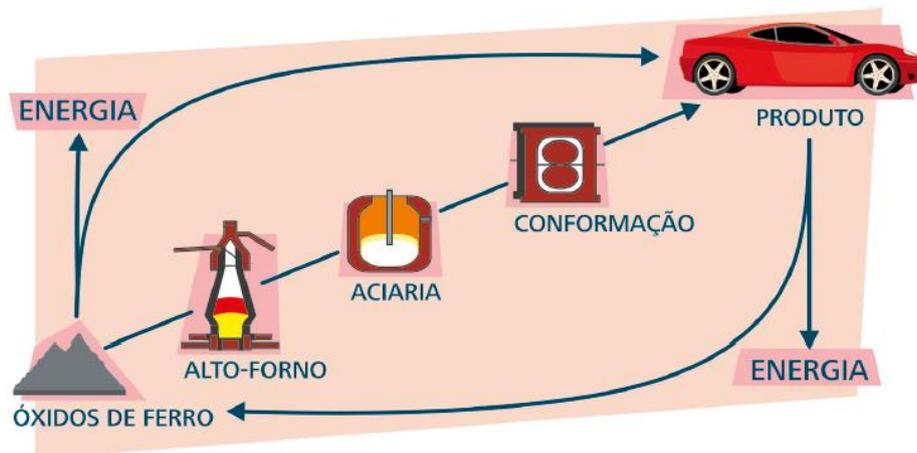


Figura 12: Fundamentos de corrosão Fonte: Pannoni in OLIVEIRA, 2012

Podemos definir o processo de corrosão de forma simplificada da seguinte maneira: *corrosão é o processo de perda de energia do material para ambiente, o que faz o mesmo voltar para seu estado natural.*

O desgaste corrosivo ou reação triboquímica ocorrem quando as superfícies do sistema tribológico reagem com o ambiente que o cerca. O processo ocorre através da remoção contínua de materiais que estão localizados sobre uma ou ambas as superfícies do par tribológico gerando uma camada, que é resultado da ação corrosiva do meio sobre as superfícies em contato.

A remoção de material metálico é resultado do que é retirado da rugosidade superficial do elemento de menor dureza do par, sendo os microfragmentos de desgaste formado pela quebra da camada formada pela reação do ambiente sobre as superfícies em contato.

A formação das partículas não-metálica está relacionada a formação das camadas superficiais que são resultantes da ação corrosiva do ambiente, além das propriedades mecânicas da camada, bem como da aderência que a mesma tem com o substrato, a reatividade química dependerá da influencia na espessura da camada superficial formada, que tem grande interferência na quantidade de partículas não-metálicas que irá atuar na zona de contato das superfícies do sistema. Com isto quanto maior a reatividade química, maior será a

tendência de ter-se um mecanismo de desgaste que vai do adesivo, passado pelo triboquímico e atingindo o abrasivo.

3.2.4. Ligas Metálicas

Uma liga metálica é um sistema físico-químico que contém mais de um elemento, sendo o principal um metal, e pode ser dividido em dois grupos: ferrosos (Aços e ferros fundidos) e não-ferrosos, diferenciados por suas propriedades.

As propriedades da liga metálica dependem de fatores inerentes ao uso desejado. Propriedades físicas como condutividade elétrica e térmica dependem mais da composição do que da microestrutura. Propriedades mecânicas dependem da composição e microestrutura da liga, nesse caso o emprego de tratamentos térmicos e mecânicos podem mudar radicalmente suas propriedades. A soldabilidade envolve não só a composição e a microestrutura como também a relação sólido-líquido (BALDAM; 2014).

3.2.4.1. Liga de alumínio 7075

As características do alumínio permitem que ele tenha diversas aplicações. Isso faz com que cresça o interesse por esse metal tornando ele um dos mais utilizados em todo o mundo. O fato de ser leve, durável, maleável e bonito, proporciona as ligas de alumínio um excelente desempenho e propriedades superiores na maioria das aplicações, as ligas mais encontradas no mercado são: AlSi, AlSn e AlZn.

A Liga Al-7075 (Tabela 02) é uma das diversas ligas comerciais desse elemento, sua composição principal é o alumínio e o zinco (AlZn), devido a suas características de resistência, leveza e beleza, as aplicações mais comuns são na indústria automobilística, aeronáutica, militar, nas linhas de produção de fábricas e na arquitetura. Associado as propriedades mecânicas essa liga possui grande facilidade de polimento garantindo um ótimo acabamento estético numa construção (COPPERMETAL; 2009).

	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	Zr+Ti	Outros	Al
--	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-------	--------	----

Min.	0,18	1,2	-	2,1	-	-	-	-	5,1	-	-	Restante
Max.	0,28	2,0	0,5	2,9	0,30	0,05	0,4	0,2	6,1	0,25	0,05	Restante

Tabela 02 – Composição do alumínio 7075. Fonte: COPPERMETAL AÇOS E METAIS.

Na Tabela 03, podemos observar as propriedades físicas da liga Al-7075 quando comparado com o alumínio puro. Nota-se que a liga de AlZn tem maior peso específico, maior módulo de elasticidade e maior coeficiente de expansão linear, em contra partida possui menor temperatura de fusão e menor condutibilidade térmica e elétrica.

Material	Peso específico (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (Mpa)	Temperatura de fusão (°C)	Calor Específico (0-100°C)(cal/g°C)	Coefficiente de expansão linear (L/°C)	Condutibilidade térmica (25°C)(Cal/cm°C)	Condutibilidade elétrica (IACS) %
Al-7075	2,8	73000	475-630	0,23	24x10 ⁻⁶	0,29	30
Al	2,71	69000	655	0,22	23x10 ⁻⁶	0,56	62

Tabela 03 – Comparação das propriedades físicas. Fonte: COPPERMETAL AÇO E METAL.

3.2.4.2. Aço 1020 e 1045

O aço e o ferro fundido são as duas categorias das ligas ferrosas, nas quais o **ferro** (Fe) é o constituinte principal. Juntas, elas representam aproximadamente 85% da massa de metais utilizada nos Estados Unidos. O diagrama de fases mostrado abaixo (Figura 13), mostra o comportamento do ferro-carbono em diferentes temperaturas. O ferro puro funde a 1539°C (2802°F). Durante a elevação da temperatura a partir da ambiente, o ferro puro sofre diversas transformações de fase no estado sólido. Na temperatura ambiente, a fase presente é o ferro alfa(α), também chamada *ferrita*. A 912°C (1674°F), a ferrita se transforma em ferro gama (γ), denominado *austenita*. Após essa fase o ferro se transforma em ferro delta (δ) a 1394°C (2541°F), que se mantém até ocorrer à fusão. (GROOVER, 2014)

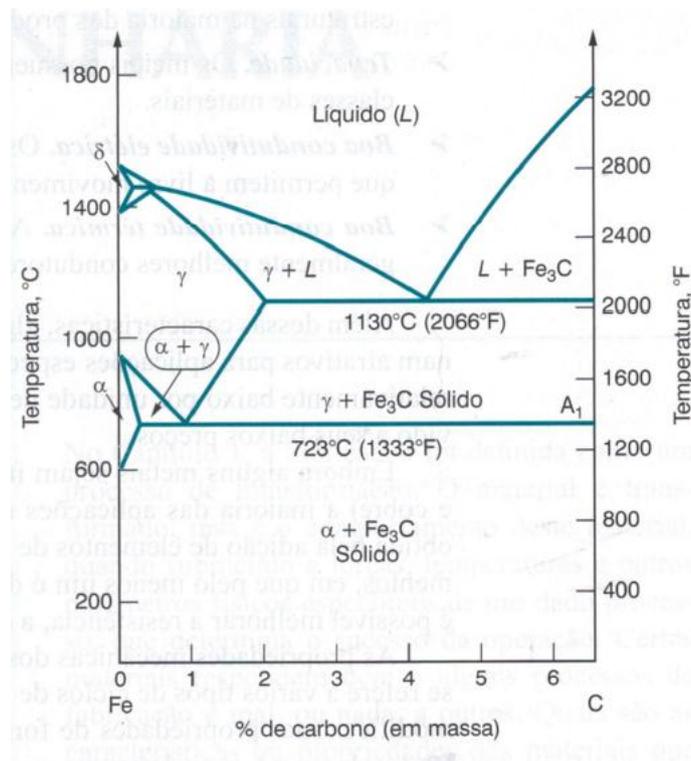


Figura 13 – Gráfico de diagrama de fase do Ferro- Carbono. Fonte: GROOVER, 2014.

Os limites de solubilidade do carbono no ferro são baixos na fase ferrita – apenas cerca de 0,022% a 733°C (1333°F). A austenita pode dissolver até cerca de 2,1% de carbono na temperatura de 1130°C (2066°F). Essa diferença de solubilidade entre as fases alfa e gama cria oportunidades de endurecimento por tratamento térmico. Mesmo sem tratamento térmico, a resistência do ferro aumenta bastante quando se eleva o teor de carbono; quando a liga passa a ser chamada aço. De forma precisa, aço é definido como uma liga ferro-carbono contendo de 0,02% a 2,11% de carbono. A maioria dos aços tem teor de carbono entre 0,05% a 1,1%C. (GROOVER, 2014)

Outra fase importante do sistema ferro-carbono é a Fe₃C, também conhecida como *cementita*. Ela é um composto metálico de ferro e carbono, é dura e frágil. À temperatura ambiente, sob condições de equilíbrio, as ligas ferro-carbono formam um sistema bifásico para teores de carbono um pouco superiores a zero. O teor de carbono em aços varia desde valores bem baixos a aproximadamente 2,1%C. Acima de 2,1%, até próximo de 4% ou 5%, a liga é definida como *ferro fundido*.

Os aços, com frequência, possuem outros elementos de liga, tais como manganês, cromo, níquel e/ou molibdênio, mas é o teor de carbono que transforma o ferro em aço. Existem centenas de composições de aços disponíveis comercialmente. Eles são divididos em

quatro categorias, são elas: aços-carbono comuns, aços de baixa liga, aço inoxidáveis e aços ferramenta.

3.2.4.2.1. Aços-carbono comuns

Esses aços contêm carbono como o principal elemento de liga, juntamente com pequenas quantidades de outros elementos (cerca de 0,4% de manganês e ainda menores quantidades de silício, fósforo e enxofre). A resistência mecânica dos aços-carbono comuns aumenta com o teor de carbono. O comportamento típico dessa correlação está mostrado na figura 14. Na figura anterior observamos que o aço a temperatura ambiente é uma mistura de *ferrita* e *cementita*, de forma que as partículas de cementita estão distribuídas pela ferrita e atuam como barreiras à deformação, sendo assim quanto mais carbono mais barreiras, e conseqüentemente, mais resistente e duro é o aço. (GROOVER, 2014)

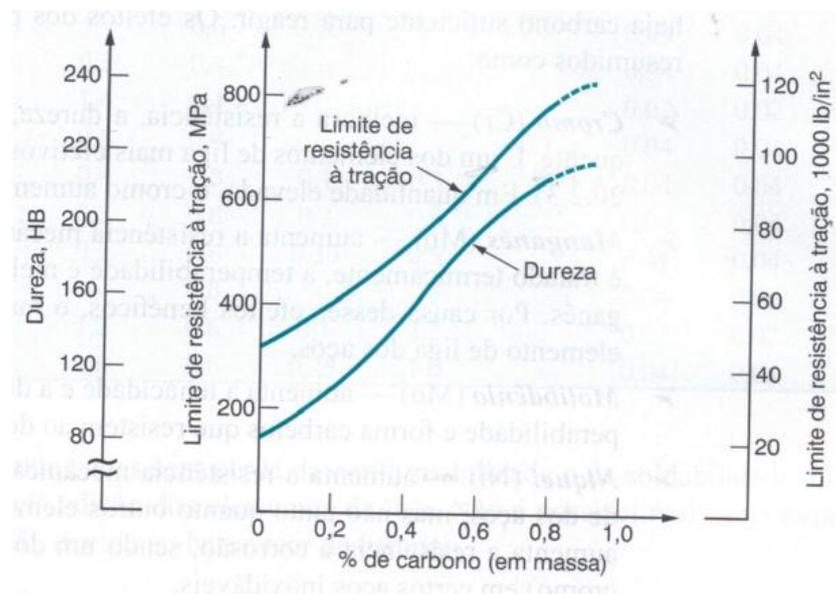


Figura 14 – Gráfico de limite de resistência à tração x dureza. Fonte: GROOVER, 2014.

Conforme a nomenclatura desenvolvida pelo Instituto Americano de Ferro e Aço – AISI e pela sociedade de engenheiros automotivos – SAE, os aços-carbono comuns são especificados por um sistema de quatro dígitos: 10XX, no qual 10 indica que o aço é um aço-carbono e o XX indica cem vezes o percentual de carbono. Por exemplo, o aço 1020 contém 0,20% de carbono. Os aços-carbono comuns são tipicamente classificados em função do teor de carbono em três classes:

1- Aços com baixo teor de carbono:

Segundo a AISI, essas ligas contêm menos de 0,20%C e são, de longe, os aços mais usados. As aplicações típicas incluem chapas metálicas de automóveis, chapas de aço para fabricação e trilhos de trens. Esses aços são relativamente fáceis de conformar, o que influi para torna-los populares em empregos nos quais a alta resistência não é necessária. (GROOVER, 2014)

2- Aços com médio teor de carbono:

Possuem teor de carbono entre 0,20% e 0,50% e são especificados para aplicações que requerem maior resistência mecânica que os aços de baixo teor de carbono. Os empregos desses aços incluem componentes de máquinas e partes de motores, tais como virabrequim e biela. (GROOVER, 2014)

3- Aços com alto teor de carbono:

Contem teor de carbono acima de 0,50%. Eles são especificados para aplicações que requerem resistência ainda mais alta e nas quais são necessárias rigidez e dureza. Molas, ferramentas de corte, lâminas e peças resistentes ao desgaste são exemplos do emprego desses aços. (GROOVER, 2014)

3.2.4.2.2 Aços de baixa liga

Os aços de baixa liga são ligas ferro-carbono que contem outros elementos de liga em teores inferiores a aproximadamente 5% em massa. Devido a essas adições, esses aços possuem melhores propriedades mecânicas que os aços- carbono comuns, e por tanto, usados em diversas aplicações. Melhores propriedades em geral significam maiores limite de resistência, dureza, dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade e também melhor combinação dessas propriedades. Um tratamento térmico é frequentemente necessário para atingir essas melhorias de propriedades. (GROOVER, 2014)

Os elementos de liga mais comuns adicionados a esses aços são cromo, manganês, molibdênio, níquel e vanádio. Algumas vezes, estes elementos são adicionados isoladamente,

entretanto normalmente são usadas combinações de vários elementos. Em geral, estes elementos formam soluções sólidas com o ferro e compostos metálicos com o carbono (carbeto), caso haja carbono suficiente para reagir.

3.2.4.2.3. Aço inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são um grupo de aço de alta liga projetada para terem alta resistência a corrosão. O principal elemento de liga nos aços inoxidáveis é o cromo, em geral acima de 15%. O cromo presente na liga forma uma camada fina de óxido impermeável em atmosferas oxidantes, que protege a superfície da corrosão. O níquel é outro elemento de liga utilizado em alguns aços inoxidáveis para elevar a proteção contra a corrosão. O carbono é empregado para aumentar a resistência mecânica e a dureza; entretanto, o aumento do teor de carbono tem o efeito de reduzir a proteção anticorrosiva, pois forma-se carbeto de cromo que reduz a disponibilidade do cromo livre na liga. (GROOVER, 2014)

Além da resistência à corrosão, os aços inoxidáveis são conhecidos pela combinação de resistência e ductilidade. Embora essas propriedades sejam desejáveis em muitas aplicações, elas em geral tornam essas ligas difíceis de serem processadas durante a fabricação e fazem com que fiquem mais caras em relação ao aço-carbono comuns ou de baixa liga.

3.2.4.2.4. Aços ferramenta

Designa-se aço ferramenta os aços usados para confecção de matrizes e ferramentas usadas na indústria, na fabricação manual, ou em máquina ferramentas, de toda a variedade de utilidades. (SCHEID, 2010). A cada família de aços ferramenta, foi normatizada uma letra maiúscula, seguido por um número. Uma observação importante é que normalmente não são encontrados os números em ordem, isso se deve ao fato de algumas composições químicas terem sido excluídas, devido ao desuso do mercado. Neste estudo apresentaremos a seguir as principais características de algumas famílias normatizadas pela SAE/AISI, a saber: Serie O, Serie W, Serie A, Serie D e Serie S.

- **Série O**

Esses aços são destinados para trabalho a frio de têmpera em óleo. Pela classificação SAE/AISI, existem três tipos de aços para trabalho à frio, dividido em grupos distintos, os da série O com tempera em óleo, os aços de médio teor de elementos de liga da série A e os aços de alto teor de liga e alto Carbono pertencentes a série D. Segundo a AISI *apud* SCHEID (2010), a série O contém, normalmente de 0,85 a 1,55% Carbono, Cromo até 0,85%, Níquel até 0,30%, podendo conter Tungstênio, Molibdênio e Vanádio. Sua aplicação é em matrizes para conformação à frio de metais, matrizes de corte, calibres, entre outros.

- **Série W**

As ligas pertencentes a essa classificação, possui tempera a água ou salmora, por isso a letra “W”, do inglês *Water*. O teor de Carbono desta série varia entre 0,60 até 1,40%. O teor de elementos de liga desta série ou é nula ou limita-se a pequenos teores de Cromo e Vanádio, sendo o primeiro limitado a 0,50% (eleva a temperabilidade) e o segundo a 0,25% (confere granulção refinada ao aço, agregando maior tenacidade). São aços conhecidos como aços ferramenta ao Carbono.

- **Série A**

Essa serie possui como característica trabalhos a frio e tempera a ar, entre os elementos de liga, esta serie possui os maiores valores de Cromo (0,90 – 5,50%), Manganês (0,40 – 2,10%), Molibdênio (0,70 – 1,20) e, em alguns casos, Vanádio entre 0,15 e 5,15%. Em casos especiais podem apresentar Tungstênio e Níquel. O teor de Carbono varia entre 0,45 e 2,00%, que eleva o teor de carbonetos, conferindo resistência à abrasão. Comparativamente aos aços da série D, são aços que apresentam o mesmo índice de deformação na têmpera, maior resistência a choques e menores temperaturas de tratamento térmico (SCHEID, 2010).

- **Série D**

Nesta serie o teor de Carbono está entre 1,40 e 2,50%, o teor de Cromo entre 11,00 e 13,50%, o que confere a fração volumétrica de carbonetos mencionada. Em alguns casos podem conter ainda teores de Molibdênio, Vanádio, Tungstênio e Cobalto. Sua tempera é feita a ar ou ar soprado, devido a sua composição, essa serie de aços é praticamente “indeformável”, por outro lado tem baixa resistência a choques mecânicos e alta resistência ao desgaste.

- **Série S**

É uma série de aços resistente a Choques, inicialmente desenvolvida para aplicação em molas, tem alta resistência à fadiga e a choques mecânicos provenientes de esforços súbitos (SCHEID, 2010). O teor de Carbono é mantido até o máximo de 0,65% o que garante tenacidade, entretanto reduz a dureza de têmpera. Para compensar este teor de Carbono, são adicionados, normalmente, elementos formadores de carbonetos, como o Cromo (0,50 – 3,5%), Molibdênio (0,20 – 1,80%) e Tungstênio (1,5 – 3,0%), podendo conter Vanádio e/ou Níquel.

4. MATERIAIS E METODOS

4.1. Materiais usados

Os ensaios foram realizados no laboratório de tratamento de superfície da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, coordenado pelo professor Dr. Luiz Carlos Casteletti. O experimento consiste em analisar o desgaste abrasivo de amostras de chapas metálicas expostas a máquina de desgaste, essas amostras são referentes a ligas de aço 1020 e 1045 e a liga de alumínio 7075.

As amostras foram colhidas no LTS-EESC/USP, todas fornecidas com autorização do coordenador do laboratório, as mesmas seguem Normas de composição AISI e NBR vigentes atualmente. Também foram fornecidas a nossa equipe o material necessário para realizar o tratamento superficial das chapas, a saber: lixas de granulometria 80, 120, 180, 200, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2000 e Álcool etílico;

A máquina de desgaste é um equipamento composto por uma bancada de aço, que sustenta um motor elétrico 0,5cv trifásico (367W), conectado por uma correia a um eixo horizontal com regulagem de pressão axial, nesse eixo fixa-se uma esfera de aço inox que fará o desgaste propriamente dito. Na mesa da bancada há uma “torre” que sustenta um conjunto de haste e braço. Na extremidade frontal do braço há um contrapeso juntamente com a haste, na ponta inferior da haste possui um bloco com função de prender a chapa, por outro lado na haste traseira há um prato onde é colocada a carga, a mesma tem a função de pressionar por efeito de torque a chapa contra a esfera presa ao eixo da máquina (Apêndices I, II, III e IV).

Faz parte da máquina de desgaste um inversor e um tacômetro, o primeiro tem a função de controlar a frequência da corrente de entrada, quando se controla a corrente é possível alterar a velocidade de rotação do motor, o segundo tem a função de medir a rotação do eixo horizontal.

Na segunda parte do nosso experimento foi necessário o uso de microscópio para fazer a análise do material desgastado, nessa parte usamos dois dispositivos. O primeiro foi cedido pelo Laboratório de Análise de Materiais - LAM da EESC/USP com autorização do professor L.C. Casteletti, esse microscópio trata-se do *ZEISS AXIO* com câmera embutida *AXIO CAM ERC55*. Ele foi usado para obter imagens da calota criada na amostra após ser

exposta ao ensaio. O segundo microscópio usado foi cedido pelo Departamento de Física da UFAM, com a autorização e supervisão da professora Msc. Querem Hapuque, trata-se do Microscópio óptico modelo BEL[®] PHOTONICS com aumento de até 500 vezes, esse equipamento tem a função de visualizar a hachura do desgaste da calota.

4.2. Métodos Experimentais

O estudo foi realizado através da visita nas dependências do laboratório de tratamento de superfícies coordenado pelo Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Neste laboratório foram feitas abordagens experimentais sobre os parâmetros dos ensaios usados para verificar e comparar as resistências ao desgaste de materiais metálicos: Liga não-ferrosa (liga de Al 7075) tratada superficialmente e duas ligas ferrosas (Aço 1020 e aço 1045) também tratada superficialmente.

O trabalho consistiu em colocar as amostras de ligas para desgastar na máquina de desgaste abrasivo de esfera fixa em eixo, para posterior análise da chapa no microscópio ZEISS AXIO com câmera embutida AXIO CAM ERC55 do laboratório da EESC-USP e em seguida produção de um gráfico de volume perdido pela distância percorrida, baseado nas equações 10 e equação 14 descrita abaixo. Para analisar as hachuras do desgaste e julgar se ocorreu desgaste a 2-corpos ou a 3-corpos (HUTCHINGS *in* CRUZ, 2008) fez necessário a metalografia do material usando o microscópico metalográfico modelo BEL[®] PHOTONICS indicado para observações da superfície de objetos não transparentes, o mesmo possui 5 objetivas plana-cromática e é dotada de um polarizador/analizador, com possibilidade de ampliação de 50 a 500 vezes, pertencente ao laboratório do Departamento de Física da Universidade Federal do Amazonas - UFAM.

$$V = \frac{d^4 * \pi}{64 * r} \quad \text{eq.10}$$

Onde V é o volume da calota, d é o diâmetro da calota, r é o raio da esfera.

$$D = 2 * \pi * r * t * \text{rot} \quad \text{eq.14}$$

Onde D é a distância percorrida, t é o tempo do ensaio e rot é a rotação do eixo que prende a esfera.

Outro parâmetro importante que influencia diretamente no desgaste é a força aplicada sobre a amostra. Para aferir essa força utilizamos a equação do momento angular, segundo a qual para um sistema em equilíbrio a soma dos momentos é igual a 0 ($\sum M = 0$). (HALLIDAY, 2008)

$$\sum M = 0 \quad \text{eq. 15}$$

$$M_1 = M_2 \quad \therefore \quad \tau_1 = \tau_2 \quad \text{eq. 16}$$

$$\tau = F * r \quad \text{eq. 17}$$

$$F = m * a \quad \text{eq. 18}$$

Substituindo equação 17 em 16, temos:

$$F_1 * r_1 = F_2 * r_2 \quad \text{eq. 19}$$

Substituindo eq. 18 em eq. 19:

$$m_1 * g_1 * r_1 = (F_2 + 3,64) * r_2 \quad \text{eq. 20}$$

Onde: m_1 é a massa de prova, g_1 é a gravidade, r_1 é raio maior, 3,64N é a força exercida pelo contrapeso F_2 é a força exercida na chapa e r_2 é o raio menor.

4.3. Conhecendo o equipamento

O tribômetro de desgaste abrasivo é um equipamento simples e versátil usado para medição e análise do desgaste, seus parâmetros de resultados são análises simples de resultados descritos na literatura, por tanto a resistência do material é concluída por comparação de resultados de outras ligas. Usamos um modelo composto por uma mesa de aço, uma base de fixação com eixo giratório ligado ao motor, um regulador de frequência (inversor) integrado ao motor elétrico de 0,5cv trifásico, uma esfera de aço e um conjunto de

haste e alavancas de metal com um prato de suporte de carga na parte traseira e um contra peso na parte dianteira. Como mostra na Figura 15.



Figura 15 – Tribômetro abrasivo/USP-São Carlos. Fonte: Santos, 2015.

O dispositivo utilizado possui acessórios de engate de amostras em formato de chapas na ponta da haste dianteira. Esse acessório juntamente com a alavanca tem por objetivo pressionar a chapa contra a esfera, que ficará girando conforme a rotação imposta pelo inversor de frequência. Para controlar o giro usa-se um tacômetro conjugado com o eixo que prende a esfera.

4.4. Experimentos

Os ensaios realizados foram do tipo abrasivo sem lubrificante, 2-corpos esfera fixa em eixo rotacional, com três ligas metálicas distintas, a saber: Aço AISI 1020, Aço AISI 1045 e alumínio 7075. Os testes realizados tinham o mesmo parâmetro de carga, velocidade de rotação e tempo de exposição ao desgaste (Tabela 04). A massa de prova usada nos ensaios das três ligas metálicas foi aferida em balança analítica com aproximadamente 96g, isso corresponde a uma força de 1,4N sobre a amostra.



Figura 16 – Aferição da massa de prova em balança analítica. Fonte: SANTOS, 2015.

ENSAIO DE DESGASTE DA LIGA ALUMÍNIO 7075				
TESTE	CARGA	FORÇA	ROTAÇÃO	TEMPO
1	96 g	1,4 N	230 rpm	5 minutos
2	96 g	1,4 N	230 rpm	10 minutos
3	96 g	1,4 N	230 rpm	15 minutos
4	96 g	1,4 N	230 rpm	20 minutos
ENSAIO DE DESGASTE DA LIGA AÇO 1020				
TESTE	CARGA	FORÇA	ROTAÇÃO	TEMPO
1	96 g	1,4 N	230 rpm	5 minutos
2	96 g	1,4 N	230 rpm	10 minutos
3	96 g	1,4 N	230 rpm	15 minutos
4	96 g	1,4 N	230 rpm	20 minutos
ENSAIO DE DESGASTE DA LIGA AÇO 1045				
TESTE	CARGA	FORÇA	ROTAÇÃO	TEMPO
1	96 g	1,4 N	230 rpm	5 minutos
2	96 g	1,4 N	230 rpm	10 minutos
3	96 g	1,4 N	230 rpm	15 minutos
4	96 g	1,4 N	230 rpm	20 minutos

Tabela 04 – Parâmetros usados nos ensaios de desgastes no LTS-USP/São Carlos. Fonte: autoria própria

4.4.1. Alumínio 7075

Essa liga foi cedida gentilmente pelo Departamento de Engenharia Aeronáutica (DEA) da USP-São Carlos. Antes de iniciar o experimento foram preparadas quatro amostras

dessa liga em forma de laminas de aproximadamente 20 mm x 25mm x 3mm, para posteriormente serem submetidas a processo de tratamento superficial.

O tratamento consiste em remover rebarbas, oxidação e impurezas que por ventura possa interferir no resultado do experimento. As rebarbas foram removidas com o auxilio de uma lixadeira mecânica, em seguida sua superfície foi preparada com processo de lixamento manual. Seguindo a seguinte ordem de granulometria das lixas: 80, 120, 180, 200, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2000, tomando o cuidado de limpar e resfriar a peça com agua corrente, para maior eficiência do tratamento, o avanço no número da lixa era feito a partir do momento que era possível ver apenas as linhas de ranhuras da lixa usada, quando se realiza a troca de lixa, a peça deve ser girada 90° horizontalmente, a fim de criar novas ranhuras perpendiculares as anteriores. Esse processo é reiniciado toda vez que há troca da lixa. Ao finalizar o processo as amostras foram lavadas com álcool etílico 96%.



Figura 17 – Amostras de Al 7075 preparadas. Fonte: SANTOS, 2015.

Em seguida uma das amostras foi fixada no porta amostra localizado na haste da máquina de desgaste, para que ela seja pressionada contra a esfera de metal do equipamento, colocou-se uma massa de prova de 96 g no prato na parte traseira da haste.

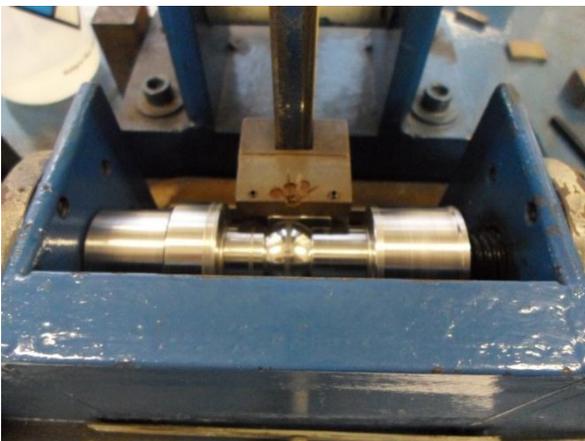


Figura 18 – Detalhe do teste. Fonte: SANTOS, 2015



Figura 19 – Massa de prova. Fonte: SANTOS, 2015

Os ensaios se deram na seguinte forma: o primeiro experimento durou 5 minutos, a amostra foi retirada e lavada com álcool em seguida fixada na haste da máquina de desgaste e iniciado o segundo experimento com duração de 10 minutos, o procedimento se repetiu para 15 e 20 minutos, respectivamente, uma observação importante é que sempre na transição dos ensaios a esfera foi lavada e deslocada 90° no eixo da direção de desgaste. A Figura 20 mostra como a amostra ficou após o ensaio.



Figura 20 – Amostra de Al 7075 desgastada. Fonte: SANTOS, 2015

Após os ensaios essa amostra foi levada ao laboratório de análise de materiais pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais da USP – São Carlos para que fosse medido o diâmetro da calota desgastada. Tais imagens foram obtidas com o auxílio do microscópio óptico *ZEISS AXIO* com câmera embutida *AXIO CAM ERC55*, juntamente com o software *Axio Vision* na plataforma do Windows® XP SP3. A equação 10 foi implementada para calcular o volume do desgaste do alumínio 7075, em relação à distância percorrida (equação 14). O gráfico 01 mostra os resultados obtidos.



Figura 21 – Microscópio óptico ZEISS AXIO com câmera embutida AXIO CAM ERC55. Fonte: SANTOS, 2015

A análise metalográfica no microscópio BEL[®]PHOTONICS, fez-se necessário para avaliar o elemento interfacial envolvido no mecanismo de desgaste. Segundo HUTCHINGS *in* CRUZ (2008), desgaste a 2-corpos produzem hachuras de desgaste linear, já o desgaste a 3-corpos possui desgaste com linhas indefinidas.

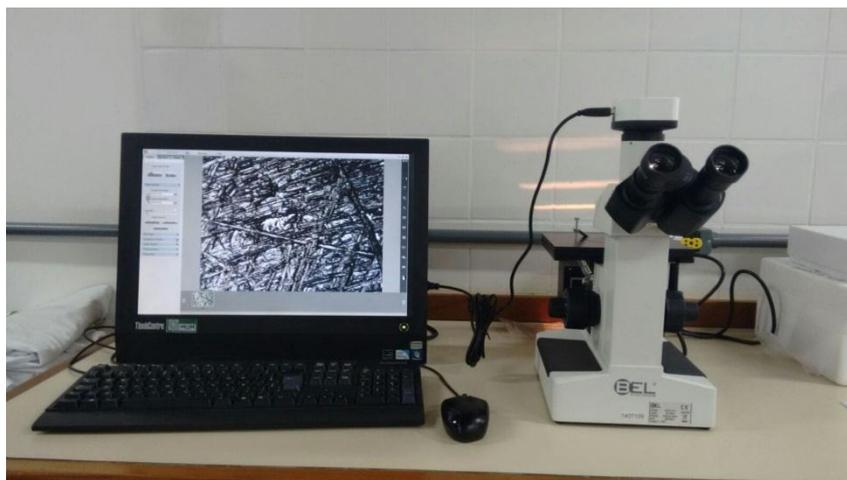


Figura 22 – Microscópio metalográfico BEL[®] PHOTONICS. Fonte: DQ-UFAM

4.4.2. Aço AISI 1020

O segundo experimento foi realizado com uma liga de aço-carbono na concentração de 0,20% de carbono misturado ao ferro. Essa liga é conhecida comercialmente como aço 1020. A equipe de pesquisa do professor Casteletti nos presenteou com 2 amostras desse material não tratado (Figura 23), todos com aproximadamente as mesmas dimensões das placas de alumínio 7075 do ensaio anterior.

O tratamento superficial desse material segue o mesmo procedimento descrito anteriormente, vale ressaltar que a limpeza final também feita com álcool etílico 96%.



Figura 23 – Aço 1020 parcialmente tratado. Fonte: SANTOS, 2015

Após o tratamento superficial, o corpo de prova foi colocado na máquina de desgaste para o ensaio, seguindo os mesmos parâmetros de tempo do experimento anterior. Em seguida a amostra foi colocada no microscópio óptico ZEISS AXIO para medir o diâmetro da calota, e conseqüentemente calcular o volume de matéria perdida.

5.2.3. Aço AISI 1045

Nosso terceiro experimento foi realizado com outra liga ferrosa muito comum no dia-a-dia, conhecida comercialmente como aço AISI 1045, essa liga possui 0,45% de carbono misturado ao ferro. Similar a amostra anterior, essa também foi doada pelo grupo de pesquisa do professor Casteletti. Uma amostra retirada de um tubo maciço cortado em forma de chapa, com superfície parcialmente tratada, como mostra a Figura 24.



Figura 24 – Aço 1045 parcialmente tratado. Fonte: SANTOS, 2015

O processo de tratamento superficial foi o mesmo empregado nos outros dois experimentos anteriores, com a limpeza final feita também com álcool etílico 96%. Após o preparo, a amostra foi fixada para iniciar o ensaio seguindo as mesmas normas de tempo dos outros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Alumínio 7075

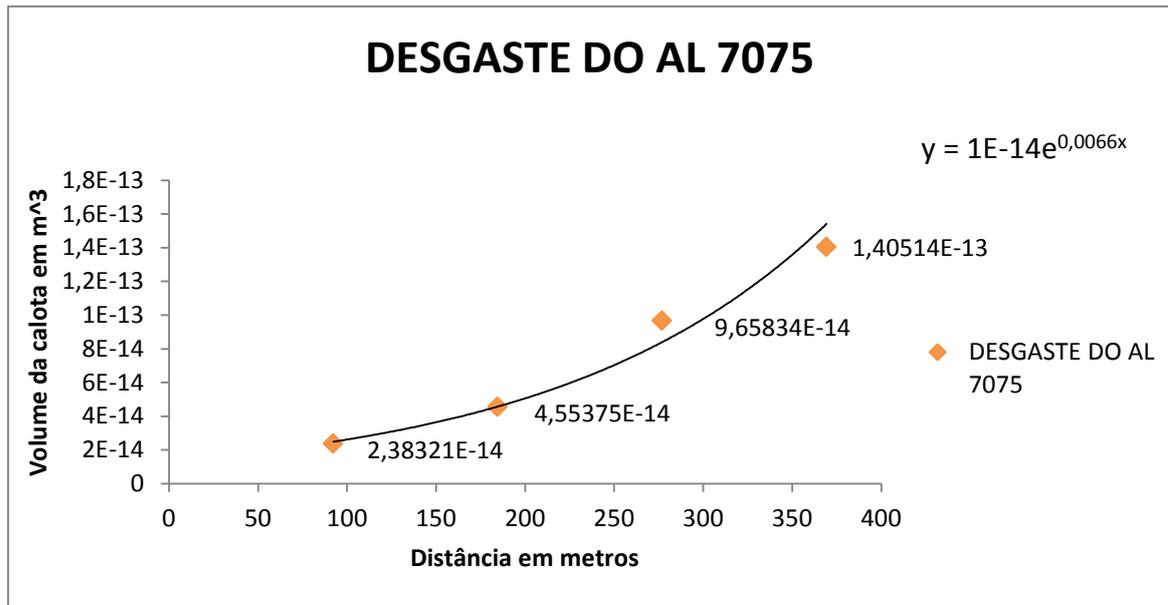


Gráfico 01 - de desgaste da liga de alumínio. Fonte: autoria própria.

Podemos observar que com aproximadamente 92 metros percorridos a amostra de alumínio perdeu por volta de $2,38 \times 10^{-14} \text{ m}^3$ de massa, já quando a distância percorrida foi 369 metros, a amostra dispensou aproximadamente $1,41 \times 10^{-13} \text{ m}^3$, isso nos permite afirmar que o gráfico denota características exponenciais, com função aproximada à equação descrita abaixo.

$$f(x) = 10^{-14} * e^{0,0066x} \quad \text{eq. 21}$$

5.1.1. Análise Metalográfica da liga Al 7075

A amostra não foi submetida a tratamento para remover oxidação e impurezas, devido a possíveis alterações no resultado, a mesma foi posicionada no microscópio metalográfico para obtenção das imagens (Figuras 25 e 26) a serem avaliadas.

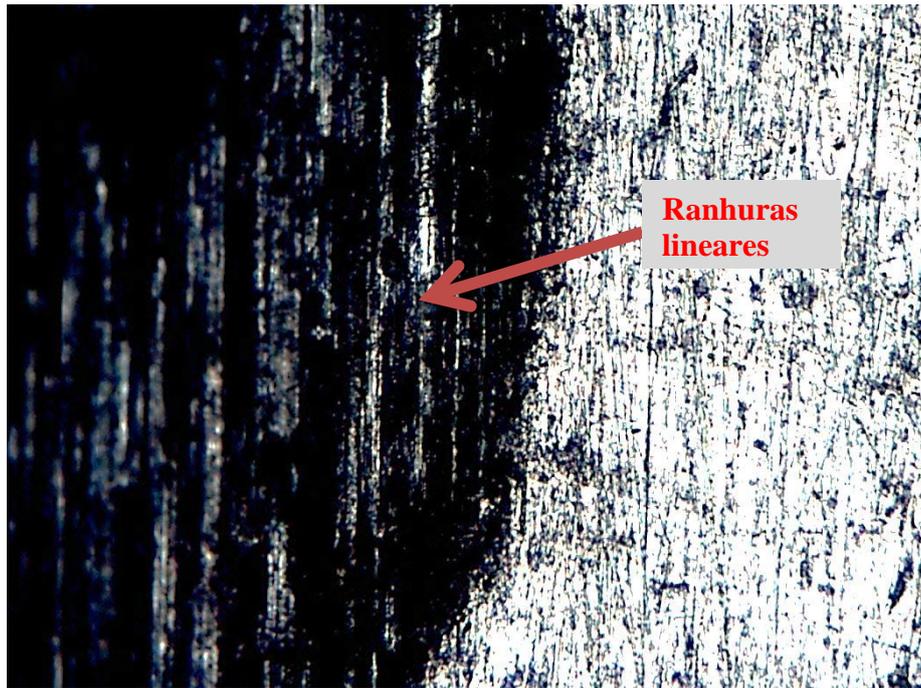


Figura 25 – Metalografia do alumínio: Borda da calota aumentada 500 vezes.
Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS - DQ-UFAM



Figura 26 – Metalografia do alumínio: chapa aumentada 500 vezes.
Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM

Na figura 25 é possível notar que as linhas de desgaste são constantes e bem definidas, comprovando que houve a presença de apenas 2 corpos durante o desgaste abrasivo, conforme sugere (ZUM-GAHR; 1983), nesse tipo de desgaste não há a remoção de massa por fratura, isso justifica as ranhuras lineares observadas nas imagens.

5.2. Aço AISI 1020

Aplicando a equação 10 para o volume e a equação 14 para a distância, obtemos a Gráfico 02 de desgaste do aço 1020.

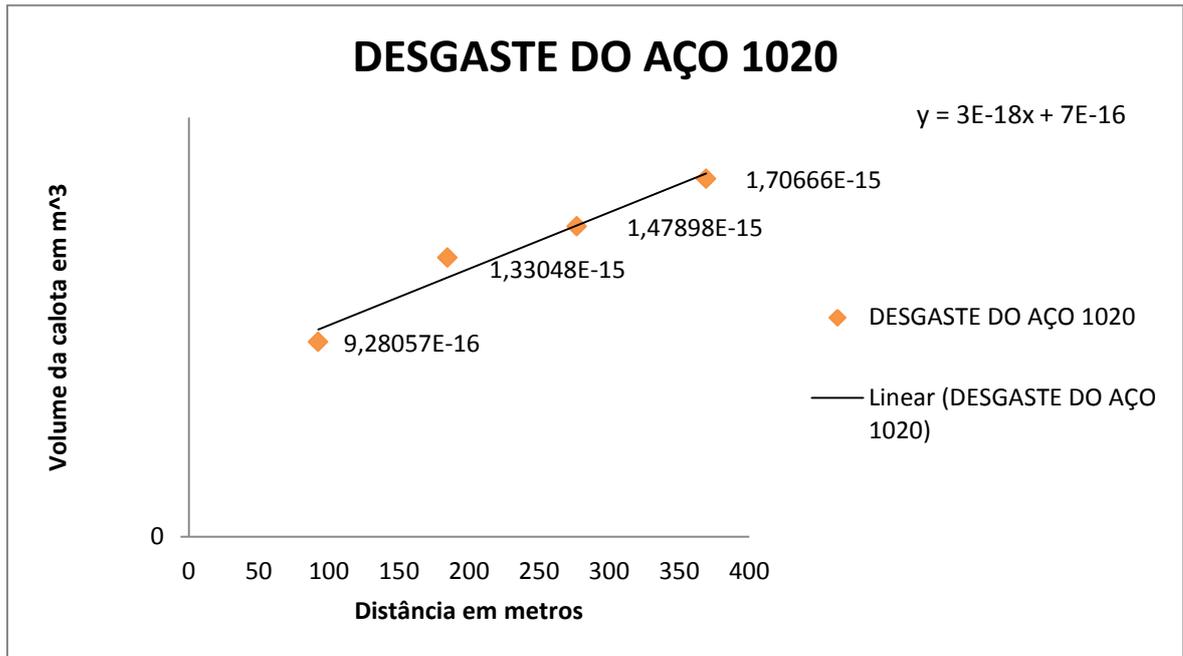


Gráfico 02: desgaste do aço 1020. Fonte: autoria própria.

A Gráfico 02 mostra que o volume desgastado é aproximadamente $9,28 \times 10^{-16} \text{ m}^3$ quando a distância percorrida é 92 m e $1,7 \times 10^{-15} \text{ m}^3$ quando a distância é 369 m, pela observação podemos inferir que o aço 1020 é mais resistente ao desgaste que a liga Al 7075. O gráfico do aço 1020, diferente do que acontece com o Al 7075, se aproxima de uma função do 1º grau, com equação aproximada descrita abaixo:

$$f(x) = 3 * 10^{-18}x + 7 * 10^{-16} \quad \text{eq. 22}$$

5.2.1. Análise metalográfica da liga Aço AISI 1020

De forma similar, a amostra de aço AISI 1020 também não foi submetida a tratamento para remover qualquer tipo de oxidação ou impurezas, o mesmo foi posicionado

no microscópio para obtenção de imagens passíveis de análise, as imagens feitas podem ser observadas nas Figuras 27 e 28.

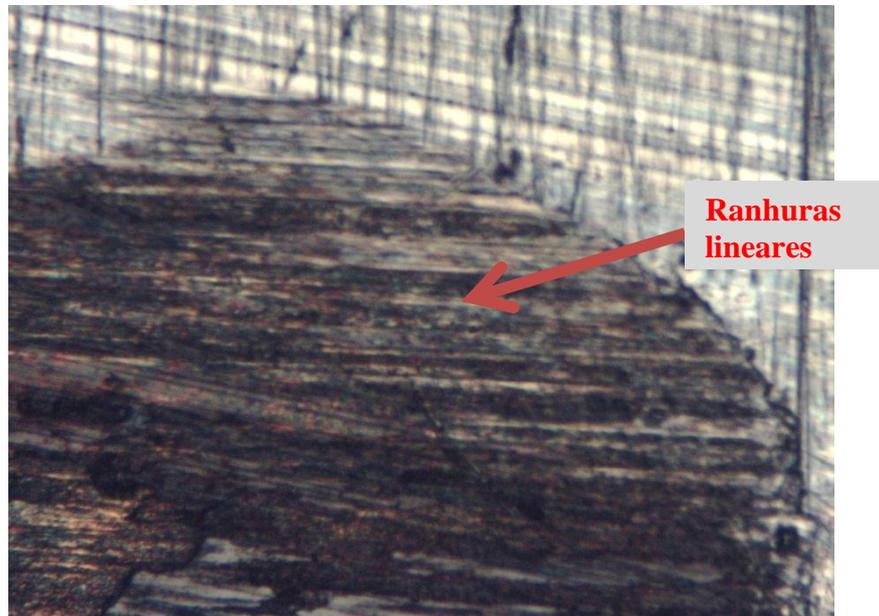


Figura 27 – Borda da calota de aço 1020 aumentada 500 vezes Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM

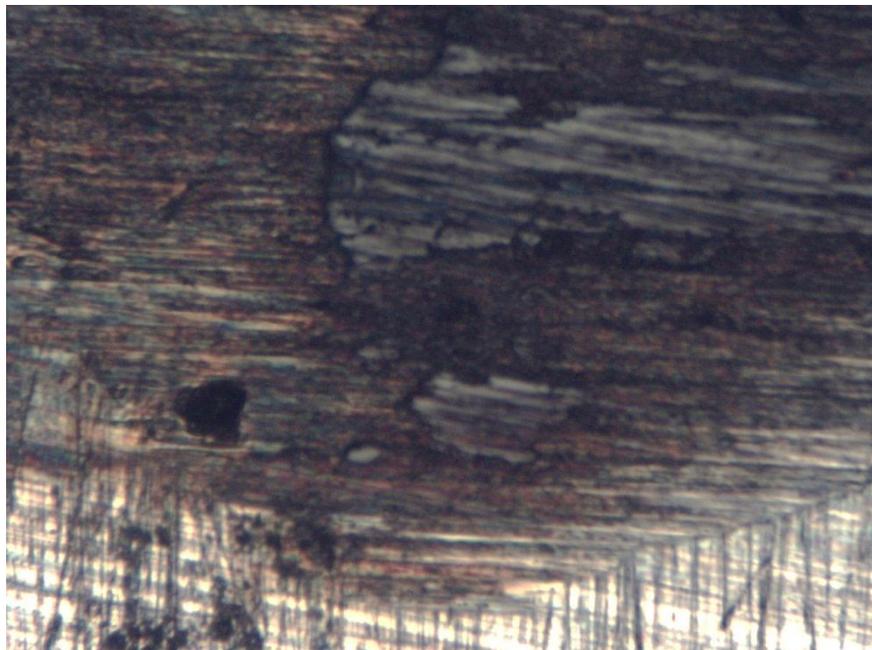


Figura 28 – Borda da calota 2 (10 min)- aço 1020 - parcialmente oxidada aumentada 500 vezes Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM

Em nível macroestrutural é possível observar na Figura 27 que a ranhura de desgaste é linear, o que comprova que não houve fratura do metal durante o ensaio. Esse material se

mostrou resistente ao desgaste abrasivo, o que já era esperado, uma vez que a liga de aço AISI 1020 possui dureza e resistência considerável.

5.3. Aço AISI 1045

Em todos os testes fizemos uso do microscópio óptico ZEISS AXIO para observar o diâmetro da calota na chapa, como mostra a Figura 29, em seguida usamos a equação 10 em conjunto com a equação 14 para montar as tabelas (apêndices V,VI e VII) que deram origem ao gráfico 01, 02 e 03.

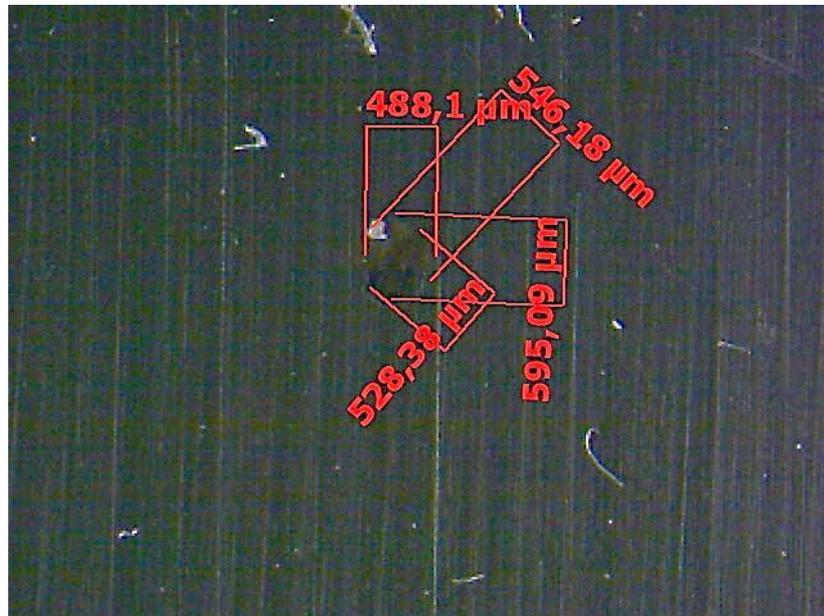


Figura 29 – Calota no aço 1045 com o tempo de 5 minutos.
Fonte: microscópio óptico ZEISS AXIO

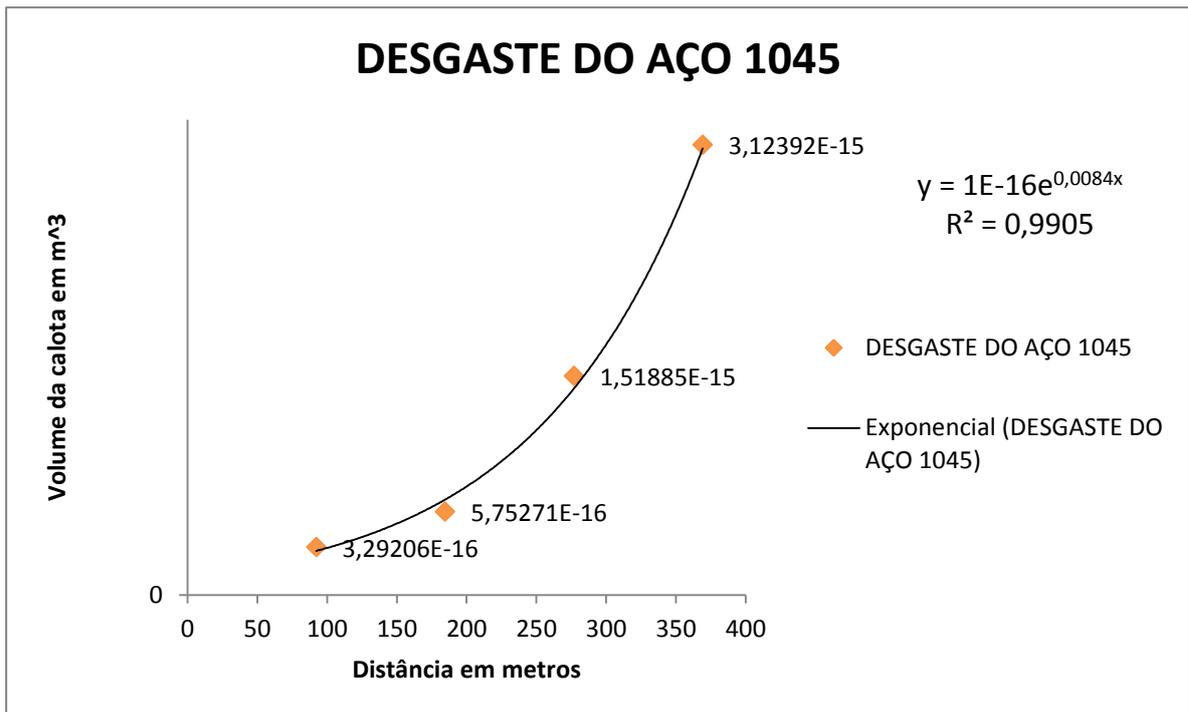


Gráfico 03 - Desgaste do aço 1045. Fonte: autoria própria.

Ao analisar o desgaste do aço AISI 1045 observamos que na distância de 92 m o volume de massa perdido foi de $3,29 \times 10^{-16} \text{ m}^3$, por outro lado, quando a distância percorrida aumentou para 369 m o volume desgastado foi $3,12 \times 10^{-15} \text{ m}^3$. Também é possível notar que o gráfico de desgaste se aproxima de um gráfico exponencial, assim como o gráfico do alumínio. A equação exponencial aproximada desse gráfico é mostrada abaixo:

$$f(x) = 10^{-16} * e^{0,0084x} \quad \text{eq. 23}$$

5.3.1. Análise Metalográfica da liga Aço AISI 1045

O aço AISI 1045, não foi submetido a procedimentos de remoção de oxidação e impureza para ser feita a metalografia, a amostra foi posicionada no microscópio para obtenção de imagens passíveis de análise, as imagens feitas podem ser observadas nas Figuras 30 e 31.

A hipótese é que essa liga tenha dureza e resistência próxima ao aço 1020, por tanto naturalmente as ranhuras de desgaste serão lineares, esse fato é comprovado nas figuras abaixo.

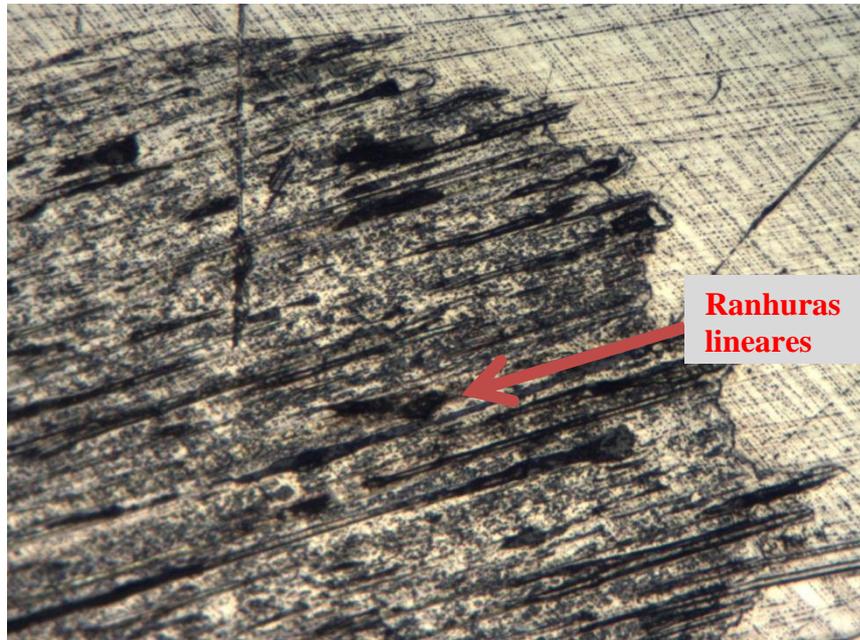


Figura 30 – Borda da calota (aço 1045) aumentada 500 vezes. Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM

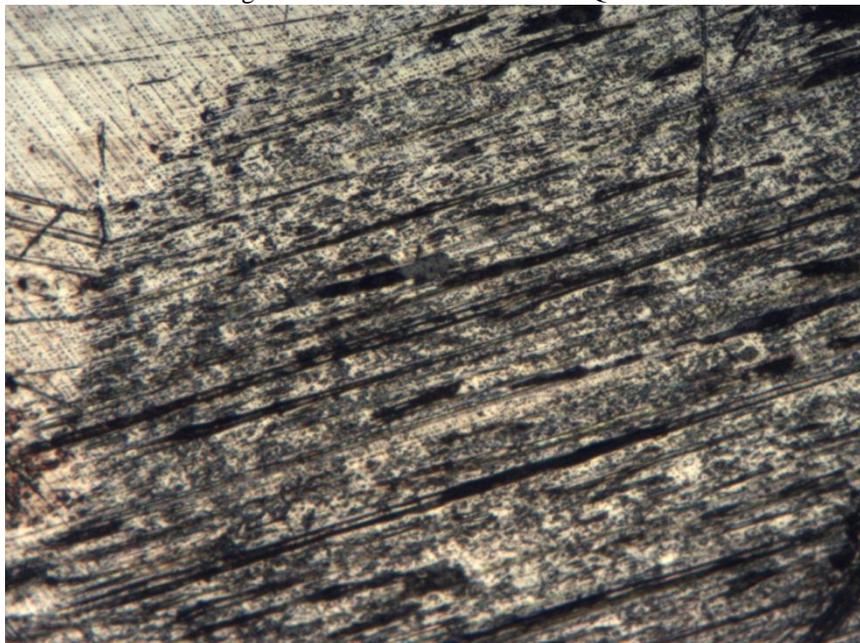


Figura 31 – Borda da calota 2 (10 min)-aço1045- parcialmente oxidada aumentada 500 vezes. Fonte: Fonte: microscópio metalográfico BEL® PHOTONICS -DQ-UFAM

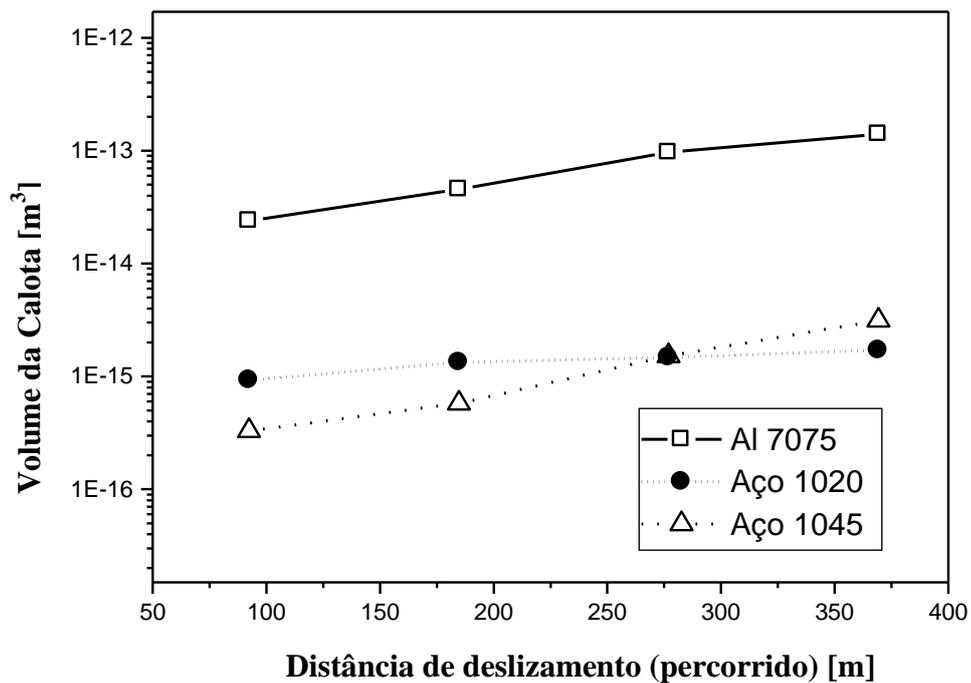


Gráfico 04 – Gráfico Semilog em y relacionando Distância de deslizamento com o volume de Calota impressa nas amostras. Fonte: autoria própria

O gráfico 04, mostra os resultado obtidos de forma agrupada, nos dando a dimensão real da resistência das amostras usadas nos ensaios. Nesse gráfico é possível notar que o aço 1045 aparece como o material mais resistente entre os selecionados, para tempos de ensaio menores (menores Distâncias de deslizamento).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entendemos que nosso estudo se mostra relevante para região devido à vasta aplicabilidade, por isso destacamos nosso interesse da construção de uma máquina de desgaste (projeto está localizado nos apêndices I, II, III e IV) para fomentar avanços nos estudos de tribologia em nossa instituição. Esperamos que nossos esforços possam despertar e motivar o interesse de outros acadêmicos, empresas e sociedade local pelo tema.

O gráfico 04 apresenta a resistência ao desgaste dos aços 1020 e 1045 maior do que a da liga Al 7075, tal resultado deve-se ao fato de que o carbono presente nas ligas torna os aços cada vez mais duros e resistentes ao desgaste quando comparados às ligas não ferrosas como é o caso da Al7075. Concernente aos aços 1020 e 1045, o resultado apresentou uma coerência até a distância de 276,9108 m, onde se obteve o mesmo volume de calota. Na maioria das situações, quanto maior o teor de carbono na liga, maior será sua dureza e resistência ao desgaste. Levando em consideração o fato de que o aço 1045 tem a propensão de ter uma maior resistência ao desgaste devido ao maior teor de carbono. Neste estudo, percebeu-se uma queda brusca na resistência ao desgaste do aço 1045 para distâncias de deslizamento acima de 276,9108 m, fato este que pode ser em decorrência de uma alteração abrupta no mecanismo de desgaste atuando naquele instante.

Outro fator a ressaltar concernente ao mecanismo de desgaste, em todas as peças não houve fratura do material, conclusão essa que se deu a partir da análise das caracterizações das superfícies desgastadas com auxílio da microscopia óptica e de varredura. A configuração da superfície foi de ranhuras paralelas e orientadas indicando um mecanismo abrasivo a dois corpos (ZUM-GAHR,1987).

CONCLUSÕES

1. A resistência ao desgaste dos aços 1020 e 1045 apresentaram valores maiores do que a da liga Al 7075, tal resultado deve-se ao fato de que o carbono presente nos aços, os torna cada vez mais duros e resistentes ao desgaste;
2. A resistência ao desgaste do aço 1045 diminuiu, para distâncias de deslizamento acima de 276,9108 m, fato este que pode ser em decorrência de uma alteração abrupta no mecanismo de desgaste atuando naquele instante;
3. O mecanismo de desgaste apresentado pelas três ligas foi o abrasivo a dois corpos, devido à configuração orientada e paralela dos sulcos feitos na superfície desgastada das três ligas em estudo.
4. O ensaio de desgaste de abrasão por esfera (ball cratering) mostrou-se eficiente e adequado para ligas não ferrosas como no caso da liga Al7075. Este ensaio apresenta-se adequado para ligas leves e filmes finos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COLAÇO, R.; VILAR, R. *Comportamento ao desgaste abrasivo de ligas FeCrC processadas e desenvolvidas por laser*, Tese de Doutorado, Instituto Superior técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2001;

COPPERMETAL AÇO E METAL. *Informações técnicas do alumínio 7075-T651*. Veleiros-SP-MKT-COPPER-001 07/2009. Disponível em:

http://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-copp_alumi7075.pdf. Acesso em: 08 mai. 2016;

CHEM TREND Release Innovation. *Alumínio & Ligas de Alumínio*. Disponível em:

http://www.chemtrend.com/pt-br/por_material/ligas_e_metais/aluminio. Acesso em: 08 mai. 2016;

CHIAVERINI, Vicente, 1914. *Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e tratamento*. 2ª Edição, Volume 2 – São Paulo: McGraw-Hill, 1986;

CRUZ, Kleber Agustin Sabat da, *Microestrutura de solidificação, resistência mecânica e ao desgaste de ligas Al-Sn e Al-Si*. 2008 119f– Tese de doutorado – UNICAMP/FEM - Campinas – SP;

FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. *Física básica – volume único*. 2ª Edição- São Paulo: Atual, 2004;

GROOVER, M.P., *Introdução aos processos de fabricação*, 1ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2014;

HALLIDAY, David, 1916 - *Fundamentos de física, volume 1: mecânica*/ David Halliday, Robert Resnick, Jearl Waker: Tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. – 8ª ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2008.

OLIVEIRA, Antônio Roberto de. *Corrosão e tratamento de superfície* / Antônio Roberto de Oliveira. — Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012. 104p.

RADI, Polyana Alves. *Estudos de Fenômenos Tribológicos em Materiais Carbonosos*. 2008. 148f. Tese de mestrado em Física e química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos;

RADI, Polyana Alves; SANTOS, Lúcia Vieira; BONETTI, Luiz Francisco; TRAVAIROLDI, Vladimir J.. *TRIBOLOGIA, CONCEITOS E APLICAÇÕES*. In: Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA / 2007, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Anais do 13º, 2007;

RODRÍGUEZ, Felipe Díaz del Castillo. *Tribología: fricción, desgaste y lubricación*. Laboratorio De Tecnología De Materiales, Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán-CuautitlánIzcalli, 2007. Disponível em <http://profefelipe.mex.tl/imagesnew/4/6/9/5/1/TRIBOLOGIA.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2016;

SCHEID, Adriano. *Curso básico de aços – Fabricação, Transformação e Usos*. Curitiba-PR, 2010. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM343/A%C7OS.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2016;

USBERCO, João. SALVADOR, Edgard. *Química - volume único*. 7ª edição reform. – São Paulo: Saraiva, 2006;

VIEGAS, José Carlos. *TRIBOLOGIA E LUBRIFICAÇÃO*. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/tribologia-e-lubrificacao-pdf-a46717.html>. Acesso em: 07 jun. 2015;

VIX LAB Equipamentos para laboratório. *Ficha técnica: Microscópio Biológico Modelo Metalográfico 40x-1600x Código: Be 230 – marca: Bel®*. Disponível em: http://www.vixlab.com.br/produto.asp?id_produto=422. Acesso em: 08 mai. 2016;

ZUM-GAHR, K,H, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, v.10, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1987.

QUEIROGA, Kayo Felipe Nunes Maia de. *TRIBOLOGIA*. Disponível no site<
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA4GYAF/tribologia>>. Acesso em: 17 jul. 2016.

APÊNDICES