



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

THIAGO SANTANA DE FRANÇA

AVALIAÇÃO DE UM TRIBÔMETRO PORTÁTIL FABRICADO NA CONFIGURAÇÃO PINO-DISCO

Recife

2019

THIAGO SANTANA DE FRANÇA

AVALIAÇÃO DE UM TRIBÔMETRO PORTÁTIL FABRICADO NA CONFIGURAÇÃO PINO-DISCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

F814a França, Thiago Santana de.
Avaliação de um tribômetro portátil fabricado na configuração pino-
disco / Thiago Santana de França – Recife, 2019.
47 f.: fig., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. De-
partamento de Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Abrasômetro. 3. Pino-disco. 4. Desgaste
abrasivo. I. Silva, Flávio José da (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-97

THIAGO SANTANA DE FRANÇA

AVALIAÇÃO DE UM TRIBÔMETRO PORTÁTIL FABRICADO NA CONFIGURAÇÃO
PINO-DISCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: ___/___/____

Nota: _____

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Flávio José da Silva/CTG-UFPE

Eng. Yuri Lira Santos/CTG-UFPE

Eng. Mayara Vasconcelos Santos/CTG-UFPE

À minha família de sangue, que não me permitiu desistir. À minha família de curso, que não me deixou sofrer sozinho. À minha família de alma, que me mostrou que a vida vai muito além das paredes desta instituição. Sem vocês, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Se há alguém lendo esta página, significa que eu finalmente consegui. Foram anos difíceis até chegar a este ponto. Ingressar nesta instituição não foi nada fácil, e sair dela foi menos ainda. Cada dia longe dos meus pais, cada dia longe da minha zona de conforto, cada noite mal dormida, cada dia sem saber se voltaria ou não para casa, me tornaram mais resistente às dificuldades que a vida pode apresentar.

Aos meus pais, Ivanildo e Luciana, o primeiro de uma série de agradecimentos pois vocês são as pessoas mais importantes nesta jornada. Vocês não puderam acompanhar de perto cada dificuldade que eu precisei enfrentar, mas em cada ligação, em cada mensagem, eu sabia que vocês estavam mandando energias positivas para que eu fosse até o fim.

Aos meus primos, que nunca me deixaram esquecer a importância da família, muito obrigado. Cada conquista que compartilhamos nos tornou mais próximos. Ainda virão muitas outras para comemorarmos juntos e muitas analogias para serem feitas com objetos nada convencionais. Ana, Camila, Cecília, Joana, Rodrigo e Carlos, muito obrigado por tudo.

Ao meu querido primo, Carlos Henrique, eu preciso fazer um agradecimento especial. Como já lhe disse mais de uma vez, você como meu irmão. Mais que isso, você é, certamente, uma das pessoas que mais me inspiraram na vida. Desde o dia da prova do vestibular até o último dia como aluno deste curso, jamais me esqueci e jamais me esquecerei das suas palavras de ânimo e inspiração. Pois é, meu irmão, finalmente consegui.

Aos meus companheiros de curso, obrigado por suportarem meus dias ruins. Por compartilharem as preocupações com as disciplinas e por também não desistirem no meio do caminho. Certamente ficamos mais resistentes juntos.

Ao meu orientador, Dr. Flávio José da Silva, por ter aceitado me orientar mesmo quando não tínhamos perspectivas de bolsas. Obrigado pela paciência e pelo apoio ao longo desses anos e principalmente neste último ano.

Ao meu caro amigo Igor, obrigado por ter me apresentado a área de Tribologia. Se não fosse você eu jamais teria me apaixonado por esta ciência e certamente não estaria onde estou hoje. Obrigado por ser um grande amigo.

Aos meus amigos Ryan, Paulo Fernando, Bárbara, Tamires, Paulo Eloi, Carlos, Bruno e Junior. Vocês me apresentaram um mundo de oportunidades que eu jamais esperava conhecer. Obrigado por terem aceitado alguém como eu, tão divergente, no seu grupo. Vocês são maravilhosos.

Aos meus companheiros de trabalho, que tiveram muita paciência comigo para me ensinar e para me apoiar quando as coisas ficaram difíceis na reta final do curso.

Por fim, agradeço à minha grande amiga Adrienne. Você se tornou a melhor amiga que eu poderia ter e foi, sem dúvidas, a peça chave do meu crescimento como pessoa em muito tempo. Obrigado pelos momentos bons e até pelos não tão bons. Acima de tudo, muito obrigado por ter me acompanhado por tanto tempo.

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar um tribômetro pino-disco e avaliar a reprodutibilidade dos ensaios realizados no mesmo. Para este estudo, foram realizados ensaios de desgaste em amostras de Aço SAE 1045 e Al 6351-T6 e os resultados foram comparados com os resultados de outros dois equipamentos fabricados na mesma configuração. Para os ensaios foram utilizados parâmetros, a saber: velocidade de deslocamento do carro igual a 0,35 mm/min, rotação do disco abrasivo igual a 66 RPM, carga aplicada na amostra igual a 4,6 N. Foi utilizado abrasivo #220 para comparar os equipamentos. Foram registradas a perda de massa e a taxa de desgaste dos materiais e estes resultados serviram como dados comparativos. Uma análise estatística do intervalo de confiança dos resultados foi realizada para garantir a confiabilidade dos resultados e a representatividade dos mesmos. Ensaio com variação da granulometria do abrasivo foram utilizados para verificar a influência deste parâmetro para o ensaio de desgaste. Após os ensaios foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura para caracterizar os mecanismos de desgaste envolvidos. Os resultados obtidos revelaram uma divergência entre a perda de massa e a taxa de desgaste registrados nos três equipamentos. Contudo, a reprodutibilidade dos ensaios no equipamento foi constatada, validando sua aplicação para uso em estudos futuros.

Palavras-chave: Abrasômetro. Pino-disco. Desgaste abrasivo.

ABSTRACT

This work was carried out with the objective of analyzing a pin-disk tribometer and evaluating the reproducibility of the tests performed on it. For this study, wear tests were performed on SAE 1045 Steel and Al 6351-T6 samples and the results were compared with the results of two other equipment manufactured in the same configuration. The tests were performed using following parameters: carriage speed equal to 0.35 mm / min, abrasive disc rotation equal to 66 RPM, load applied to sample equal to 4.6 N. Abrasive # 220 was used for comparing the equipments. Mass loss and material wear rate were recorded and these results served as comparative data. A statistical analysis of the confidence interval of the results was performed to ensure the reliability of the results and their representativeness. Tests with varying abrasive grain size were used to verify the influence of this parameter on the wear test. After the tests, scanning electron microscopy analyses were performed to characterize the wear mechanisms involved. The obtained results showed a divergence between the mass loss and the wear rate registered in the three equipments. However, the reproducibility of the tests in the equipment was verified, validating its application for use in future studies.

Keywords: Abrasometer. Pin-disk. Abrasive wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Entradas e saídas de um tribossistema.	18
Figura 2 – Componentes básicos de um tribossistema.	19
Figura 3 – A força de atrito, F , é necessária para deslocar um objeto carregado por uma força normal, W	20
Figura 4 – Mecanismos que causam danos a componentes e estruturas.	23
Figura 5 – Sistemas tribológicos sujeitos ao desgaste abrasivo	27
Figura 6 – Desgaste abrasivo (a) com dois corpos e (b) com três corpos	27
Figura 7 – Forma esquemática do abrasômetro de roda de borracha.	30
Figura 8 – Esquema de um tribômetro pino-disco	31
Figura 9 – Tribômetro pino-disco do Laboratório de Superfícies e Desgaste - LSD – UFPE.	33
Figura 10 – Perda de massa registrada em ensaios pino-disco no Laboratório de Superfícies e Desgaste (LSD - UFPE) em Aço SAE 1045 e Al 6351-T6.	37
Figura 11 – Aspecto das lixas de carbetto de silício (a) nova, (b) após ensaio com Aço SAE 1045 e (c) após ensaio com Al 6351-T6.	39
Figura 12 – Comparação entre a perda de massa registrada em três equipamentos para Aço SAE 1045.	39
Figura 13 – Comparação entre a perda de massa registrada em três equipamentos para Al 6351-T6.	40
Figura 14 – Taxas de desgaste registradas para o Aço SAE 1045 e Al 6351-T6 em cada equipamento	41
Figura 15 – Resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura em Aço SAE 1045 após ensaio com lixa de carbetto de silício #220.	43
Figura 16 – Resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura para Al 6351-T6 após ensaio com lixa de carbetto de silício #220.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de ensaios tribológicos.....	29
Tabela 2 – Composição química dos materiais utilizados na avaliação do dispositivo pino-disco	32
Tabela 4 – Parâmetros do ensaio de desgaste no dispositivo pino-disco.	34
Tabela 5 – Perda de massa das amostras de Aço SAE 1045	36
Tabela 6 – Perda de massa das amostras de Al 6351-T6.....	36
Tabela 7 – Perdas de massa médias das amostras	37
Tabela 8 – Perda de massa média de cada material após os ensaios	38
Tabela 9 – Taxa de desgaste dos materiais.....	38
Tabela 10 – Comparação entre as taxas de desgaste registradas em três equipamentos	40
Tabela 11 – Comparação entre a perda de massa em relação à granulometria da lixa	42
Tabela 12 – Comparação entre as taxas de desgaste em relação à granulometria da lixa.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	TRIBOLOGIA	16
2.1.1	Tribossistema	18
2.1.2	Propriedades tribológicas	19
2.2	ATRITO.....	19
2.2.1	Leis do atrito	21
2.3	DESGASTE.....	22
2.4	MODOS DE DESGASTE	24
2.4.1	Fadiga de superfície.....	24
2.4.2	Adesão.....	24
2.4.3	Erosão	25
2.4.4	Abrasão.....	26
2.5	DESGASTE ABRASIVO	26
2.6	TESTES TRIBOLÓGICOS	28
2.6.1	Abrasômetro de roda de borracha.....	30
2.6.2	Abrasômetro pino-disco	31
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	MATERIAIS.....	32
3.2	PREPARAÇÃO DO ENSAIO PINO-DISCO.....	32
3.3	VARIAÇÃO DO TAMANHO DO ABRASIVO.....	35
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO MECANISMO DE DESGASTE.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	AVALIAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DOS ENSAIOS.....	36
4.2	PERDA DE MASSA	37
4.3	TAXA DE DESGASTE	38
4.4	COMPARAÇÃO DE ENSAIOS DE DESGASTE ENTRE TRÊS EQUIPAMENTOS	39

4.5	INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO ABRASIVO.....	42
4.6	CARACTERIZAÇÃO DO MECANISMO DE DESGASTE.....	43
5	CONCLUSÕES.....	45
	REFERÊNCIA.....	46

1 INTRODUÇÃO

O advento de cada revolução industrial trouxe ao mundo grandes avanços nas diversas áreas da tecnologia, mas à medida que a indústria se desenvolve, também devem ser desenvolvidos os meios de garantir sua integridade. Uma das maiores preocupações no meio industrial é o controle ou a redução do desgaste em máquinas e sistemas de pequeno a grande porte devido as despesas relacionadas à manutenção corretiva e à substituição de componentes desgastados e às paradas de produção. Por esta razão, foram intensificadas as buscas por novos materiais e revestimentos mais resistentes e eficientes ao longo das décadas.

A demanda por componentes mecânicos que tenham alto desempenho frente ao desgaste atinge as mais variadas gamas de setores industriais. Ter produtos de qualidade não é mais o bastante para se manter no mercado, é necessário produzir de forma *enxuta* e sem manutenções corretivas não programadas, pois estas afetam diretamente nos custos da produção e refletem num significativo aumento nas despesas das empresas.

O atrito é um fenômeno físico que sempre envolve deslocamento de partículas em diferentes estados de agregação. A força conhecida como *atrito* pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo ao se mover sobre outro (HUTCHINGS, I. M., 2001). Além de se opor ao movimento, o atrito é responsável pelo desgaste de componentes de máquinas e também pode contribuir com o dano a ferramentas de trabalho. Aproximadamente 80% a 90% dos componentes de máquinas trabalha em condições de atrito (BURAKOWSKI, T.; WIERZCHOŃ, T., 1999).

Desgaste ocorre em diversas ocasiões. Em aplicações industriais, por exemplo, em equipamentos móveis, bombas, trituradores, rolamentos, mancais, pistões, vedações e engrenagens, e no corpo humano como o quadril, os joelhos e cotovelos (ZUM GAHR, 1987).

Entre os diversos tipos de modos de desgaste conhecidos está a abrasão, que é a remoção ou o deslocamento de material da superfície devido a partículas duras, ou às vezes por protuberâncias na contraface a que é forçada a deslizar ao longo da superfície (HUTCHINGS, I. M., 2001). Um forte exemplo da ação de partículas abrasivas desgastando materiais é na extração de petróleo e gás em alto mar. A mistura de partículas livres e fluidos dentro dos dutos durante o processo força a escolha de materiais altamente resistentes à corrosão e ao desgaste. A ação conjunta de corrosão e desgaste abrasivo aumenta a severidade da perda de material.

Além da busca por novos materiais e técnicas de revestimento é necessário investir em pesquisa na área de Tribologia para aperfeiçoar os conhecimentos e aplica-los à indústria. Alinhado a este ponto, é de grande importância tratar da simulação dos mecanismos de desgaste realizada em laboratórios e centros de pesquisa.

Há diversos dispositivos capazes de simular o desgaste abrasivo. Entre os possíveis métodos de ensaio de desgaste abrasivo é possível destacar o uso de dispositivos montados na configuração pino-disco, que consiste num sistema composto por uma amostra de material fabricada na forma de pino sobre a qual é exercida uma força que a pressiona contra a superfície de um disco com material abrasivo. O movimento do disco cria uma trajetória de perda de massa do pino. Este tipo de ensaio permite a modificação de fatores que influenciam diretamente o desgaste como: velocidade, tipo e tamanho de abrasivo, carga aplicada e presença de lubrificação.

O equipamento utilizado neste trabalho está localizado no Laboratório de Superfícies e Desgaste (LSD), no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM – UFPE). Os resultados deste trabalho permitirão que o equipamento estudado seja utilizado na simulação de desgaste em diferentes condições e com custos e tempo reduzidos, além de permitir variações nas interações tribológicas.

Para avaliar o equipamento alvo deste estudo os resultados serão confrontados com os resultados obtidos em dois outros equipamentos de mesma configuração utilizando os mesmos parâmetros de ensaio e mesmos materiais.

1.1 OBJETIVOS

Um objetivo geral e alguns objetivos específicos foram estabelecidos para conduzir o desenvolvimento deste projeto.

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar um tribômetro do tipo pino-disco no desgaste abrasivo de aço 1045 e liga de alumínio 6351-T6 com lixas de carvão de silício comparando os resultados obtidos em equipamentos de mesma configuração

1.1.2 Objetivos específicos

Para dar suporte ao objetivo geral deste trabalho alguns objetivos específicos foram determinados:

- Revisar os conceitos de tribologia;
- Avaliar a reprodutibilidade de ensaios no mesmo equipamento
- Medir o desgaste abrasivo de aço 1045 e liga de alumínio 6351-T6 contra carbetto de silício
- Avaliar a influência do tamanho do abrasivo no desgaste de materiais
- Caracterizar os mecanismos de desgaste das amostras por microscopia eletrônica de varredura

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos fundamentais para as aplicações da tribologia, sua história e como ela pode ser usada como ferramenta na economia do país. Também serão apresentados os conceitos de tribossistema e como este auxilia na análise do desgaste de superfícies.

O atrito será tratado de maneira breve e de forma a apresentar as leis fundamentais do atrito e como estas dão suporte nas observações a cerca de como ocorre o desgaste.

Serão apresentados os mecanismos e modos fundamentais do desgaste e será dada ênfase ao estudo do desgaste abrasivo.

2.1 TRIBOLOGIA

A história da tribologia como conhecemos é, de fato, recente, mas o desafio de superar o atrito remete aos primórdios das civilizações. A invenção da roda é um exemplo claro de como os povos antigos se preocupavam em desenvolver tecnologias que os auxiliassem a vencer a força de resistência ao movimento. Também nas civilizações mais antigas se observa o uso de água e, posteriormente, óleos naturais como lubrificantes para elementos mecânicos móveis com o objetivo de reduzir o atrito e, por consequência, o desgaste.

A tribologia é uma ciência multidisciplinar que permeia áreas como física, química, engenharia mecânica, ciência dos materiais e metalurgia. Definida como “a ciência e a tecnologia das superfícies que interagem entre si em movimento relativo”, a tribologia trata do atrito, do desgaste e da lubrificação (HUTCHINGS, I. M., 2001). O funcionamento de diversas máquinas e mecanismos depende diretamente do movimento relativo entre duas superfícies sólidas em contato.

Do grego: *tribos*, que quer dizer “atrito” e *logia* que significa “estudo”, a palavra “tribologia” teve sua primeira menção registrada em 1966 pelo comitê do Reino Unido e sua primeira citação foi feita por *P. Jost* no mesmo ano, que a definiu como a “ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas e assuntos associados” (FERNANDES, 2015).

Atrito pode ser interpretado como um processo de dispersão de energia, desgaste como uma dissipação de uma estrutura superficial com ou sem dissipação de massa e lubrificação pode ser considerada como o processo pelo qual a carga entre dois corpos em movimento relativo é dissipada (ZUM GAHR, 1987).

A tribologia passou a aparecer como disciplina nos cursos de engenharia após a segunda guerra mundial, no Reino Unido, mas foi em 1964 que a tribologia, reconhecida como ciência, teve sua primeira conferência, a *Institution Mechanical Engineering* (SANTOS, 2018). Poucas pessoas se reconheciam como “tribologistas” na *Major Wear Conference*, em 1968, nos Estados Unidos, e desde este evento os laboratórios de tribologia têm começado a surgir gradualmente (BUDINSKI, K. G., 1988). Apesar de seu registro ser bem recente, os estudos a respeito do desgaste, do atrito e da lubrificação possuem uma longa e interessante história.

O atrito e o desgaste são fenômenos tão antigos quanto a própria humanidade. Na era paleolítica o fogo era gerado através do atrito entre pedaços de madeira ou pelo impacto entre pedras de sílex, rochas sedimentares silicatadas (ZUM GAHR, 1987).

Superar a resistência ao movimento tem sido uma árdua tarefa para a humanidade ao longo de sua história. Algumas das soluções mais antigas para superar o atrito eram o uso de água e posteriormente óleos naturais em contatos motores. Uma grande invenção para reduzir o problema do atrito foi a roda, inventada aproximadamente ao mesmo tempo na Mesopotâmia, na Europa Central e no Cáucaso do Norte, por volta do ano 3000 A.C.. Os mecanismos básicos do atrito foram estudados por Leonardo da Vinci, na Itália, e formulados como leis por Guillaume Amontons, na França, no século seguinte. Na década de 1980 o Ministério do Comércio e Indústria do Japão investigou formas de melhorar a funcionalidade e durabilidade de máquinas através de melhorias tribológicas sistemáticas (HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A., 2012).

O comitê do Reino Unido estimou, em 1966, a economia que a indústria do país teria caso os princípios tribológicos conhecidos até então fossem amplamente aplicados. Estudos semelhantes foram realizados em outros países e as conclusões estavam de acordo que pelo menos 1% do PIB do país poderia ser economizado com o mínimo de investimento adicional em pesquisa e que existia um potencial para economias ainda maiores com pesquisas adicionais (HUTCHINGS, I. M., 2001). Aplicando esta estimativa ao Brasil, tomando como referência o valor do PIB de 2018, a economia obtida ao se aplicar os conhecimentos básicos acerca de desgaste, atrito e lubrificação seria da ordem de R\$68 bilhões.

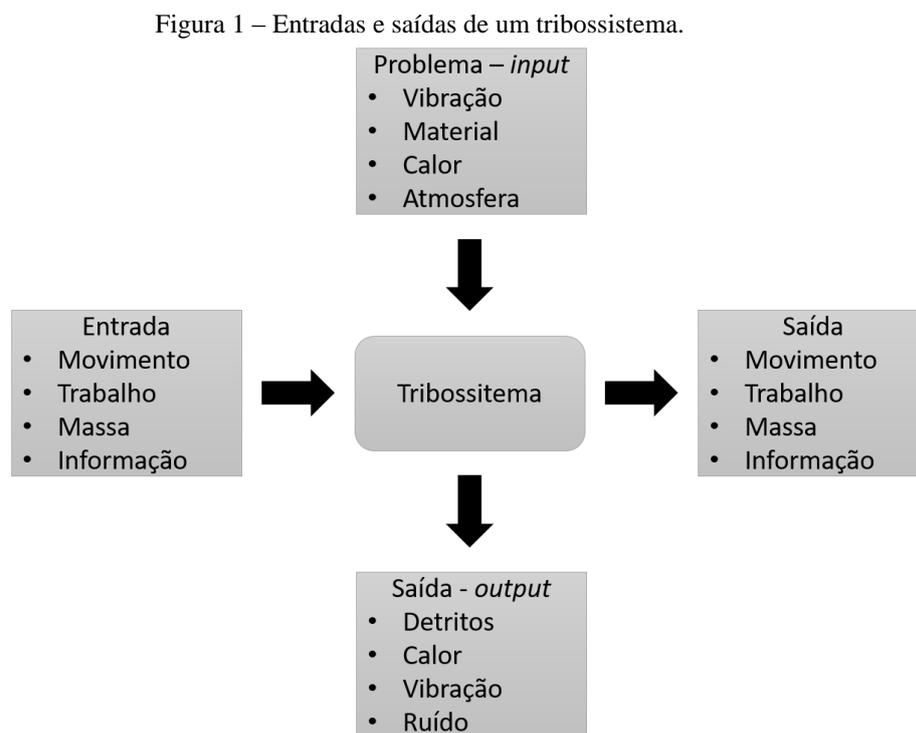
Muitas vertentes da indústria necessitam de aplicações diretas de princípios tribológicos para prosperar. Uma das vertentes que mais se destaca é a indústria automobilística. Apenas 21,5% da energia produzida por um motor de combustão interna é utilizada para deslocar o veículo. Da energia total produzida pelo motor, 62% não é aproveitada, 5% é usada para superar a resistência aerodinâmica e 33% perdida com o atrito dos componentes (FERNANDES, 2015).

Ao longo da história, grandes nomes da ciência trabalharam para compreender as variáveis envolvidas no processo de desgaste. Nomes como Charles Augustin Coulomb (1736 – 1806), Leonhard Euler (1707 – 1783), Osborne Reynolds (1842 – 1919), Heinrich Rudolph Hertz (1857 – 1894) e muitos outros são lembrados por suas importantes contribuições no desenvolvimento histórico dos presentes conhecimentos a respeito de atrito, desgaste e lubrificação (ZUM GAHR, 1987).

A compreensão e aplicação da Tribologia tem se tornado cada vez mais importante nas aplicações que necessitam de movimento relativo. Sobre este assunto merecem destaque os automóveis, os aviões, componentes de máquina para transmissão de movimento e vedação, entre outras tantas aplicações.

2.1.1 Tribossistema

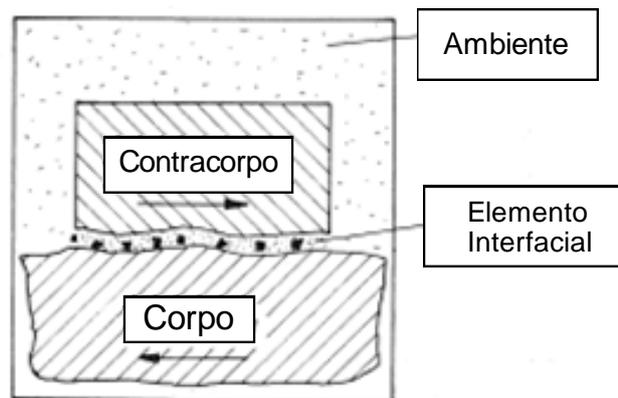
Uma forma útil de analisar o processo tribológico é fazendo o uso de um tribossistema. A proposta de um sistema tecnológico é a transformação de entradas (*inputs*) em saídas (*outputs*). A relação entre uma entrada útil e uma saída útil deve ser considerada como a função técnica do tribossistema (ZUM GAHR, 1987). A Figura 1 apresenta o esquema de um tribossistema.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

A estrutura de um tribossistema muda com o tempo através da ação do atrito e do desgaste. Isto pode acarretar numa mudança no comportamento do próprio sistema. Um tribossistema é composto, em geral, por quatro elementos: um corpo sólido, um contra corpo, elemento interfacial e o ambiente (ZUM GAHR, 1987). A Figura 2 apresenta o esquema representativo de um tribossistema.

Figura 2 – Componentes básicos de um tribossistema.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

2.1.2 Propriedades tribológicas

As propriedades tribológicas compreendem todas as propriedades que constituem condições de interação mútua da superfície e do ambiente de corpos em contato. As propriedades tribológicas descrevem: o coeficiente de atrito e a intensidade do desgaste, bem como a resistência à adesão. Estas propriedades dependem tanto das condições em que o atrito ocorre, como também das potenciais propriedades de fricção, ou seja, tipo de atrito, método de lubrificação e natureza do desgaste (BURAKOWSKI, T.; WIERZCHOŃ, T., 1999).

2.2 ATRITO

Atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas aos materiais, mas sim características de um sistema. O atrito é a resistência ao movimento e surge das interações de sólidos em suas superfícies de contato real. Atrito e desgaste são, respectivamente, os grandes responsáveis pelas perdas de energia e material (ZUM GAHR, 1987).

Atrito ocorre universalmente na natureza e na tecnologia. É essencial para o movimento de criaturas vivas e veículos. Torna possível a tarefa de carregar objetos e ainda constitui a base de muitos dispositivos básicos, como freios, embreagens e transmissões por correias (BURAKOWSKI, T.; WIERZCHON, T., 1999). Em contrapartida, em muitos casos o atrito é um efeito indesejado, causando considerável perda de energia para superar a resistência ao movimento.

Os problemas derivados do desgaste e do atrito não estão restritos apenas a substituição de componentes mecânicos e paradas em linhas de produção. Em carros de passeio, por exemplo, um terço da energia liberada pelo combustível é utilizada para superar o atrito do motor, da transmissão, dos pneus e freios. Apenas 21,5% de toda a energia liberada pelo combustível é realmente utilizada para movimentar o veículo (HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A., 2012).

Um carro de passeio utiliza em média 340 litros de combustível por ano apenas para vencer o atrito (HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A., 2012). Em valores atuais, com o litro da gasolina custando em média R\$4,50, um condutor pagaria cerca de R\$1530,00 por ano para que seu veículo vencesse a inércia.

A força de atrito é definida como a resistência encontrada por um corpo em movimento sobre o outro. Esta definição engloba duas classes importantes de movimento relativo: deslizamento e rolagem (HUTCHINGS, I. M., 2001). Diferenciar atrito deslizante e atrito por rolagem é bastante útil, mas ambos não são mutuamente excludentes.

Tanto no movimento de deslizamento quanto no movimento de rolagem, uma força tangencial é necessária para mover um objeto que está em cima de uma superfície (HUTCHINGS, I. M., 2001). A Figura 3 apresenta as direções das forças envolvidas no deslocamento de corpos.

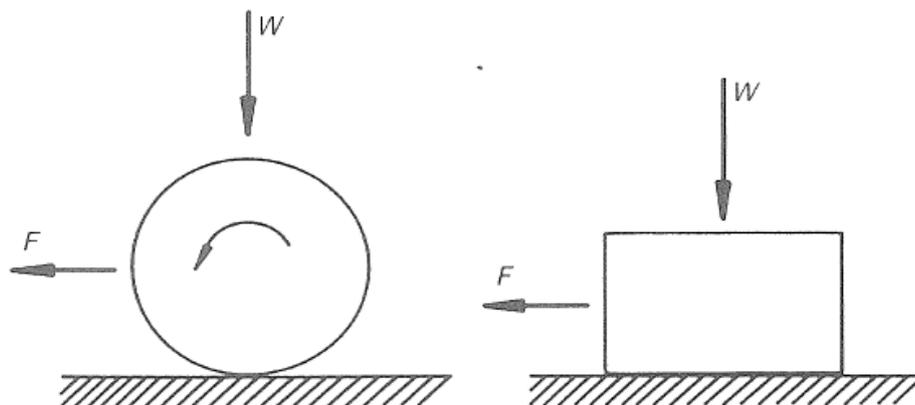


Figura 3 – A força de atrito, F , é necessária para deslocar um objeto carregado por uma força normal, W .

Fonte: Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials (1992)

A razão entre a força de atrito e a carga normal é conhecida como coeficiente de atrito. A magnitude da força de atrito é convencionalmente descrita pelo valor do coeficiente de atrito, o qual pode variar bastante. Desde valores como 0,001 para rolamentos com baixo carregamento até valores acima de 10 para superfícies metálicas polidas deslizando umas sobre as outras no vácuo (HUTCHINGS, I. M., 2001). O coeficiente de atrito é uma razão adimensional a qual independe da carga normal W . Devido às diferenças nas geometrias de contato, o coeficiente de atrito μ pode ser significativamente menor no contato de rolamento do que no contato de deslizamento (TYRKIEL, E., 1995).

2.2.1 Leis do atrito

Sob as mesmas condições de deslizamento, o coeficiente de atrito para um dado par de materiais, em condições fixadas de lubrificação, deve ser constante. Esta observação levou à formulação de duas leis empíricas para o atrito por deslizamento. Leonardo da Vinci foi o primeiro a descrever este fenômeno em meados do século XV, mas foi Amontons, em 1699, quem redescobriu estas leis (HUTCHINGS, I. M., 2001).

Há três Leis do Atrito por Deslizamento. As duas primeiras, descritas e formuladas, respectivamente por Leonardo da Vinci e Amontons. A terceira Lei do Atrito por Deslizamento é atribuída a Coloumb (1785) (TYRKIEL, E., 1995). As leis são:

- A força de atrito é diretamente proporcional à força normal;
- A força de atrito é independente da área de contato deslizante aparente;
- A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

Sob o efeito de um carregamento normal à superfície, a força de atrito depende do coeficiente de atrito (BURAKOWSKI, T.; WIERZCHOŃ, T., 1999). A primeira lei é expressa pela equação:

$$F = \mu W \quad (1)$$

A primeira lei é obedecida tanto em caso de atrito seco quanto no caso de atrito lubrificado. Os polímeros, no entanto, não obedecem a primeira lei devido a sua tendência a fluir plasticamente e a submeterem-se a soldagem de asperezas localizadas (TYRKIEL, E., 1995).

A segunda lei, apesar de não ser tão explorada quanto a primeira, é válida para a grande maioria dos materiais com exceção dos polímeros novamente (TYRKIEL, E., 1995).

A terceira lei é menos fundamentada que as duas outras. É uma observação comum que a força necessária para iniciar o deslizamento é maior que a força necessária para mantê-lo.

Desta forma tem-se o coeficiente de atrito estático μ_s e o coeficiente de atrito dinâmico μ_d (HUTCHINGS, I. M., 2001). O coeficiente de atrito estático é sempre maior que o coeficiente de atrito dinâmico.

Num sistema onde duas ou mais superfícies estão interagindo entre si havendo atrito o resultado é o desgaste tribológico.

2.3 DESGASTE

A falha de um componente pode ser resultado de um dano causado por deformação plástica, pela formação e propagação de trincas, por corrosão ou por desgaste (ZUM GAHR, 1987). Deformações elásticas, e principalmente deformações plásticas, podem tornar componentes inapropriados para as aplicações para as quais foram projetadas. Trincas impedem que componentes sejam capazes de suportar as cargas para as quais foram desenhados, podendo resultar em falhas catastróficas sob carregamentos muito menores que aqueles para os quais foram dimensionados.

Corrosão e desgaste são mecanismos que atacam, primeiramente, as superfícies dos componentes. Vibração, ruído, aquecimento, mudança geométrica e geração de detritos podem ser causados por corrosão e por desgaste (ZUM GAHR, 1987). Estes efeitos podem causar perda completa da função de componentes, máquinas e estruturas completas, podendo levar à falha catastrófica. Deve se assumir com cautela que o desgaste é um fenômeno totalmente mecânico, já que a corrosão química pode estar relacionada a outros fatores de desgaste (BOTH, 2011). A Figura 4 apresenta os mecanismos que podem resultar em danos a componentes e estruturas.

Figura 4 – Mecanismos que causam danos a componentes e estruturas.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

Desgaste é definido como o dano causado a uma superfície sólida, na maioria das vezes na forma de remoção gradual de material da superfície, pela ação do movimento relativo em contato com uma substância ou substâncias. (BUDINSKI, K. G., 1988). Quando superfícies se movem uma sobre a outra ocorre desgaste: dano a uma ou a ambas as superfícies, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Perdas relativamente pequenas de material podem ser suficientes para causar falhas completas em máquinas (HUTCHINGS, I. M., 2001). Em geral, o desgaste é medido pela perda de massa, de volume ou por mudanças dimensionais.

O desgaste é uma perda progressiva de material mensurada na forma de volume perdido e raramente caracteriza uma falha catastrófica num equipamento pois sua severidade pode ser observada no aumento da vibração e desalinhamento do sistema, elemento ou componente (RODRIGUES, 2017). Mesmo que a perda de material seja progressiva, não é incomum observar fragmentações que adentram o meio e dão origem a outro mecanismo de desgaste que pode causar falha crítica.

Há vários fatores que determinam o tipo de desgaste e a perda. Recebem destaque fatores como temperatura de contato, tensão de contato, velocidade de contato, direção de contato, atmosfera e a presença de partículas livres. É importante ter em mente que desgaste é um efeito que ocorre num sistema.

As causas do desgaste são, em geral, de caráter mecânico, mas podem ser também uma combinação da ação mecânica com a interação química do ambiente (BURAKOWSKI, T.; WIERZCHÓN, T., 1999). A forma como material é removido da superfície pode ser descrita por diversos mecanismos de desgaste. O modo de desgaste é definido com base na aparência da

superfície após o contato e não muito nos mecanismos químicos e físicos da remoção do material (HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A., 1994).

2.4 MODOS DE DESGASTE

Os modos de desgaste se diferenciam entre si pela aparência, pela causa, pelo mecanismo de desgaste e pela forma de solucionar seus respectivos problemas de desgaste. Os modos de desgaste mais comuns a se observar são a abrasão, a erosão, adesão e a fadiga de superfície. Outra abordagem para desgaste é baseada no tipo de contato entre os sólidos, o que divide o desgaste entre o provocado por deslizamento entre superfícies e o provocado por partículas duras (BOTH, 2011).

2.4.1 Fadiga de superfície

O desgaste por fadiga superficial ocorre devido ao carregamento cíclico, como uma sequência de deformações plásticas e elásticas, seja por rolamento ou deslizamento e impacto de sólidos e líquidos sobre a superfície do material (ZUM GAHR, 1987). Essa variação de carregamentos é responsável por criar e propagar trincas na superfície ou logo abaixo dela, que posteriormente podem causar desprendimento de partículas.

A fadiga de superfície é descrita como a quebra de uma superfície sólida como resultado de tensões cíclicas produzidas por uma ação de deslizamento ou de rolagem contínua sobre a superfície (BUDINSKI, K. G., 1988). É um fenômeno que resulta do carregamento e do descarregamento sobre uma superfície em um nível de tensão que pode ser suportado uma vez, mas não se for repetido várias vezes (HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A., 1994). Um exemplo comum da fadiga de superfície é o desgaste do asfalto nas rodovias. O carregamento cíclico e repetitivo dos pneus dos veículos causa dano e conseqüente remoção de material. Uma forma de reduzir a fadiga de superfície é a redução do atrito pela lubrificação

2.4.2 Adesão

A adesão é um modo de desgaste constituído pela perda progressiva de material de superfícies sólidas em movimento relativo o qual tem início com as duas superfícies unidas. Quando dois sólidos estão em movimento relativo, a força de atrito que se opõe ao movimento ocorre devido à adesão entre as duas superfícies (BUDINSKI, K. G., 1988). No desgaste por

adesão, o fato das superfícies estarem soldadas no estado sólido resulta em quebra do material em uma, ou em ambas, as superfícies. Quando há a perda de material de ambas as superfícies, partículas ficam livres no sistema e se separa, interrompendo o modo de desgaste por adesão e o tornando desgaste por abrasão.

Microscopicamente não há uma superfície metálica de deslizamento que seja completamente livre de rugosidades. Mesmo que a topografia e a rugosidade sejam de ordem micrométrica, a presença de picos e vales é inevitável (RODRIGUES, 2017).

O contato entre as asperidades microscópicas de duas superfícies em movimento relativo é realizado na área de contato real. Devido ao atrito no contato, são formadas temperaturas e pressões elevadas, podendo fundir as duas superfícies e desta forma criar uma solda pontual. Como o movimento relativo entre as superfícies deve prosseguir, as soldas formadas são cisalhadas e o desgaste nas superfícies é causado (ZUM GAHR, 1987).

A severidade do desgaste adesivo é determinada pela presença ou ausência de filmes, como óxidos ou lubrificantes. Sob cargas baixas, a remoção do filme de óxidos pode ser equilibrada pela formação de novos óxidos, e haverá baixa taxa de desgaste. Se a carga for elevada o suficiente para romper ou remover a camada de óxidos mais rápido do que ela pode se recuperar haverá contato íntimo entre as duas superfícies e o correrá o fenômeno de adesão (BOTH, 2011)

Para evitar a soldagem por adesão dos materiais é necessário um estudo quanto à compatibilidade entre os metais. Materiais quimicamente compatíveis tendem a formar ligações covalentes, mais fracas e fáceis de separar, ou metálicas, que criam juntas fortes e rígidas, o que aumenta a severidade do desgaste por adesão (RODRIGUES, 2017). O uso de materiais dissimilares quando possível é uma forma de tentar contornar o problema. O controle da dureza dos materiais também pode ser considerado: se não há esforços cíclicos causando fadiga, alta dureza é um fator positivo (BOTH, 2011). Lubrificação é sempre eficiente para reduzir desgaste adesivo.

2.4.3 Erosão

O modo de desgaste por erosão ocorre quando partículas duras suspensas num fluido se chocam repetidamente com uma superfície sólida (TYRKIEL, E., 1995). Também definido como a perda progressiva de material de uma superfície devido a interação mecânica entre a referida superfície e um fluido ou um fluxo de impacto. (BUDINSKI, K. G., 1988). O fluido pode ser formado por vários componentes, incluindo partículas sólidas. Quando o fluido é capaz

de reagir quimicamente com a superfície, a remoção de material pode ocorrer por uma combinação do processo mecânico e de corrosão. A ocorrência do desgaste erosivo é esperada quando partículas duras incidem em um sólido a uma velocidade significativa (superior a 1 m/s) (BOTH, 2011).

2.4.4 Abrasão

O modo de desgaste por abrasão é produzido pela ação de partículas duras ou por protuberâncias forçadas e movidas contra uma superfície (BUDINSKI, K. G., 1988). O modo de desgaste por abrasão causa deformações plásticas na superfície do material antes de removê-lo.

O desgaste abrasivo ocorre quando uma das superfícies em contato é consideravelmente mais dura que a outra. As asperidades da superfície mais dura são pressionadas sobre a superfície mais dúctil e isto resultará num fluxo plástico do material mais mole ao redor do material mais duro (HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A., 1994).

No setor industrial, o desgaste por abrasão é o modo de desgaste que apresenta maior perda entre os outros modos de desgaste, ocasionando prejuízos significativos (OLIVEIRA, 2016).

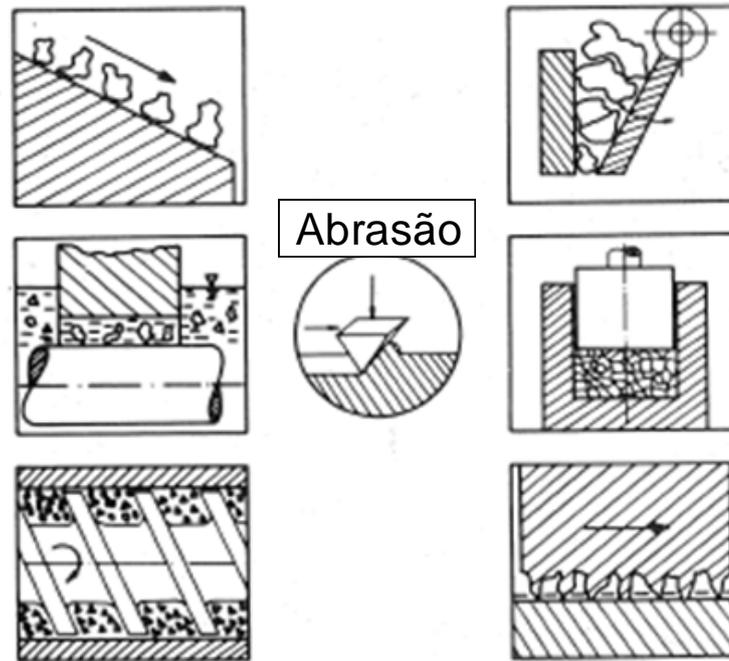
2.5 DESGASTE ABRASIVO

No desgaste abrasivo o material pode ser removido ou deslocado de uma superfície por partículas duras ou por saliências duras sobre um contracorpo, forçado contra uma superfície e arrastado ao longo dela (HUTCHINGS, I. M., 2001).

Partículas duras podem ser produtos de um processamento, como sílica e alumina, fragmentos do próprio desgaste severo ou podem entrar no tribossistema originárias de uma fonte externa. Protuberâncias e asperidades atuam como partículas duras se a superfície for muito mais dura que a contraface (ZUM GAHR, 1987). A Figura 5 apresenta alguns sistemas sujeitos ao desgaste abrasivo.

Sistemas hidráulicos com corpos estranhos, quebradores de pedras, trituradores, mancais sujos e qualquer outro tipo de componente mecânico móvel com presença de partículas duras pode sofrer com os efeitos do desgaste abrasivo. O desgaste dependerá, entre outros fatores, do material da contraface, das condições de operação, da natureza das partículas duras, do ângulo de ataque, etc. (ZUM GAHR, 1987).

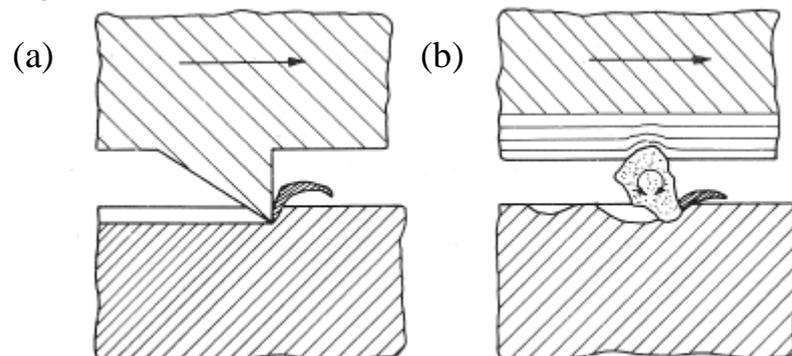
Figura 5 – Sistemas tribológicos sujeitos ao desgaste abrasivo



Fonte: Zum Gahr (1987).

Há diversas formas de qualificar e classificar os mecanismos de desgaste abrasivo, mas há uma distinção muito comum feita entre estes mecanismos: desgaste abrasivo com dois corpos e desgaste abrasivo com três corpos. A Figura 6 apresenta o aspecto do desgaste abrasivo com dois corpos e do desgaste abrasivo com três corpos.

Figura 6 – Desgaste abrasivo (a) com dois corpos e (b) com três corpos



Fonte: Zum Gahr (1987).

O desgaste abrasivo com dois corpos é causado pelas protuberâncias da contraface ou por partículas duras engastadas na mesma. Neste modo de desgaste as partículas abrasivas movem-se livremente sobre uma face (ZUM GAHR, 1987).

No desgaste abrasivo com três corpos as partículas duras estão livres para rolar e deslizar entre as duas superfícies que estão deslizando (HUTCHINGS, I. M., 2001). É uma situação que ocorre quando as partículas abrasivas estão presas entre duas contrafaces se movendo em direções diferentes. Um fluido também pode estar presente (TYRKIEL, E., 1995). Neste modo de desgaste as partículas abrasivas atuam como elementos entre o corpo sólido e o contra corpo (ZUM GAHR, 1987).

O desgaste abrasivo pode ser caracterizado, em geral, pelo mecanismo de corte e sulcamento e ocorre quando partículas duras são projetadas de uma superfície sob pressão contra outra ou até mesmo suspensas num fluido, sendo a característica principal riscos na direção do deslizamento, para o desgaste com dois corpos e endentações devido a partículas rolando sobre a superfície no desgaste com três corpos (CARDOSO, 2016).

2.6 TESTES TRIBOLÓGICOS

Um teste tribológico envolve o estudo do desgaste, do atrito e da lubrificação. Há uma vasta gama de equipamentos que podem ser utilizados para avaliar o desgaste de superfícies e há um número razoável de normas e correlações entre os equipamentos de teste. De forma geral há seis tipos de ensaios tribológicos: ensaio de campo, ensaio de bancada, ensaio de subsistema, ensaio de componente, ensaio de componente simplificado e ensaio de modelo (ZUM GAHR, 1987).

Segundo Zum Gahr a precisão dos dados obtidos decai dos ensaios de campo até os ensaios de modelo simplificado. A Tabela 1 apresenta características dos ensaios tribológicos mencionados anteriormente.

Tabela 1 – Tipos de ensaios tribológicos.

Ensaio tribológico	Características
Ensaio de campo	Ocorre por longos períodos de tempo e em condições muito próximas da prática.
Ensaio de bancada	Ocorre em condições de laboratório, o que leva a simplificações relativas ao ambiente ou variáveis de operação.
Ensaio de subsistema	Interações entre diferentes partes do sistema são reduzidas. Vibrações, temperatura e ambiente são substancialmente diferentes dos ensaios de bancada e de campo.
Ensaio de componentes	Representam uma simplificação ainda maior que os ensaios de subsistema.
Ensaio de componentes simplificado	Simplifica o ensaio de componentes ao reduzir a um número ainda menor de componentes analisado por vez.
Ensaio de modelo simplificado	Ocorrem durante curtos períodos de tempo e sob carregamentos ou velocidades para testar o comportamento tribológico de materiais ou lubrificantes em condições extremas.

Fonte: Rodrigues (2017).

É comum que o comportamento tribológico de vários materiais e lubrificantes sejam estudados seja para novas aplicações ou para otimização de processos. Também é comum utilizar ensaios tribológicos para avaliações de qualidade, tempo de vida de serviço de componentes ou para servir de base para o planejamento de manutenções preventivas. O projeto de novos componentes pode ser melhorado com as informações obtidas através dos ensaios tribológicos. A representação de sistemas complexos por modelos simplificados e a realização de simulações usando estes modelos é particularmente importante para o estudo dos mecanismos básicos do atrito, da lubrificação e do desgaste (ZUM GAHR, 1987).

As técnicas de avaliação dos efeitos do desgaste são numerosas e estão descritas em literaturas e normas específicas. Os equipamentos utilizados para realizar os ensaios de desgaste são chamados de desgaste testador, tribotester ou tribômetro (CARDOSO, 2016). Centenas de tribômetros são descritos na literatura, mas podem ser classificados em dois grupos principais (ZUM GAHR, 1987):

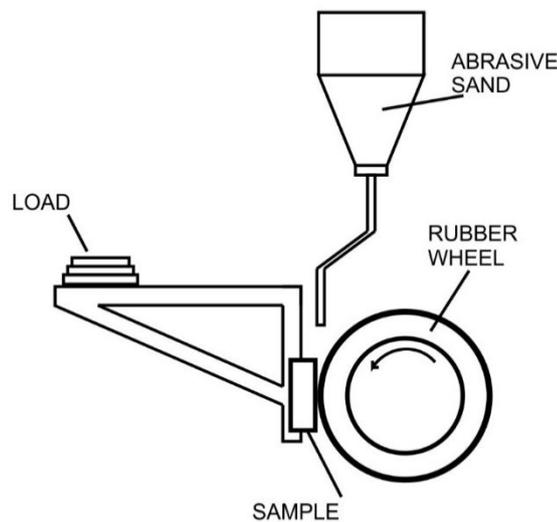
- Tribômetros para estudo de comportamento tribológico do corpo e do contra corpo em um sistema “fechado”;
- Tribômetros para estudo do comportamento tribológico apenas do corpo sólido.

Os tribômetros utilizados para avaliar os efeitos do desgaste abrasivo são, em geral, encontrados no segundo grupo enquanto os tribômetros para avaliar outros modos de desgaste são geralmente encontrados no primeiro grupo.

2.6.1 Abrasômetro de roda de borracha

O abrasômetro de roda de borracha é utilizado para simular em laboratório as condições reais de desgaste abrasivo em materiais metálicos. É utilizado para determinar a resistência ao riscamento da superfície do material (CARDOSO, 2016). O ensaio tribológico com abrasômetro de roda de borracha é regido pela norma técnica ASTM G65 e os elementos principais do equipamento são a roda metálica com revestimento de borracha, a carga aplicada e a areia abrasiva.

Figura 7 – Forma esquemática do abrasômetro de roda de borracha.



Fonte: o autor (2018)

O ensaio com abrasômetro de roda de borracha foi desenvolvido para simular condições de desgaste abrasivo sob baixa tensão. O princípio de funcionamento deste dispositivo consiste no desgaste associado a grãos abrasivos de granulometria controlada soltos arrastados sobre a superfície, provocando riscamento (OLIVEIRA, 2016).

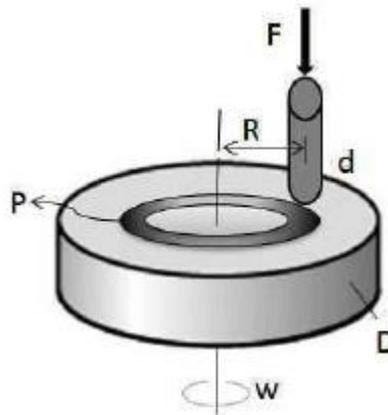
2.6.2 Abrasômetro pino-disco

O dispositivo pino-disco é um equipamento no qual um pino carregado é forçado sobre a superfície de um disco em movimento circular. É possível notar, ao longo do ensaio, uma pista circular formada sobre o disco originada pelo desgaste causado pela carga aplicada sobre o pino.

O resultado deste ensaio é uma medida da perda de massa do corpo de prova ao longo do tempo. Esta medida é obtida comparando a massa inicial e final do material que foi desgastado. Com os resultados obtidos é possível determinar a distância percorrida, o coeficiente de desgaste e a resistência ao desgaste (OLIVEIRA, 2016).

Devido a possibilidade de variar diversos parâmetros no ensaio diversas condições podem ser simuladas. É possível variar a rotação, a velocidade linear, a carga aplicada sobre o pino, o percurso total e a presença, ou não, de lubrificação.

Figura 8 – Esquema de um tribômetro pino-disco



Fonte: Oliveira (2016).

Na Figura 8 é possível identificar alguns dos parâmetros que podem ser variados no ensaio pino disco. Sendo **F** a carga aplicada sobre o pino, **d** o diâmetro do pino, **R** o raio da pista de desgaste formada, **P** o caminho percorrido pelo pino e **W** a rotação do disco. Também indicado na figura está o diâmetro **D** do disco.

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão tratadas as etapas do desenvolvimento prático dos ensaios realizados ao longo deste trabalho.

3.1 MATERIAIS

Para realizar a comparação entre os dispositivos pino-disco foram preparados corpos de prova em Alumínio 6351 – T6 e aço SAE 1045. Ambos são materiais comerciais e suas fichas técnicas e certificados de qualidade foram disponibilizados. As composições dos materiais estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química dos materiais utilizados na avaliação do dispositivo pino-disco

Material	Composição %										
	C	Al	P	S	Si	Mn	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti
Alumínio 6351 – T6	-	96	-	-	1	0,6	0,5	0,1	0,6	0,2	0,2
Aço SAE 1045	0,45	-	0,023	0,027	0,89	0,18	>95				

Fonte: Acervo pessoal (2019).

Os corpos de prova foram fabricados em forma cilíndrica de diâmetro e comprimento médio de 4mm e 12mm, respectivamente. Para os abrasivos, foram utilizadas lixas com duas granulometrias diferentes: #220 e #320. As lixas foram cortadas em formato circular com raio de 50mm

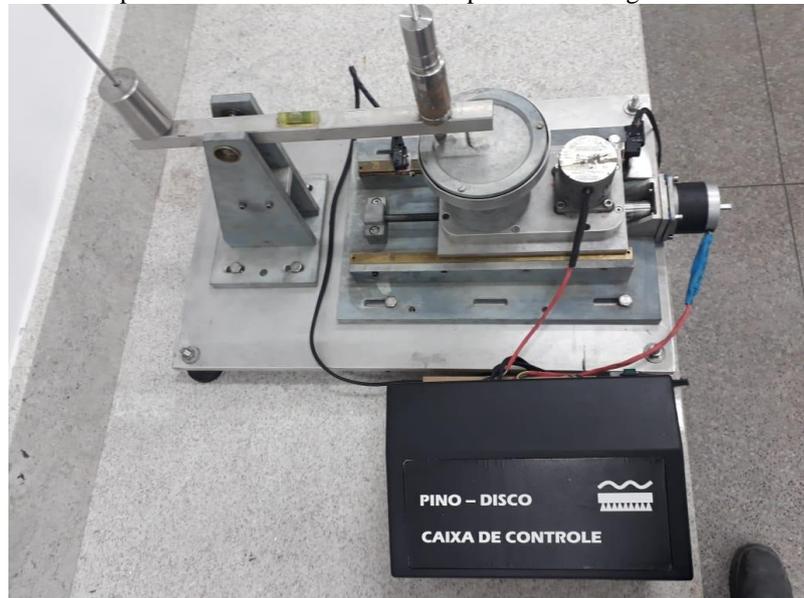
3.2 PREPARAÇÃO DO ENSAIO PINO-DISCO

Para a realização dos ensaios um computador é ligado paralelamente ao equipamento permitindo que o operador manipule a velocidade de avanço do carro do disco e a rotação do disco. Estes parâmetros são definidos ao inserir os dados no *software* do equipamento. Também é permitido ao operador variar a carga sob o pino durante o ensaio. Esta ação é realizada manualmente por meio da adição, ou retirada, de anilhas fabricadas em aço inoxidável, usinadas especialmente para uso no equipamento. Um par de sensores controla o início e o fim do ensaio. A Figura 9 apresenta o tribômetro pino-disco utilizado para realização deste trabalho.

O dispositivo é composto por controlador, disco abrasivo, carro, carga, amostra e motor elétrico. As informações de parâmetros do ensaio são inseridas no computador e enviadas para

o controlador que converte as informações e liga os motores elétricos. Os motores são responsáveis pela rotação do disco abrasivo e pelo deslocamento do carro através de um eixo sem fim.

Figura 9 – Tribômetro pino-disco do Laboratório de Superfícies e Desgaste - LSD – UFPE.



Fonte: o autor (2019).

Antes de iniciar o ensaio os corpos de prova foram preparados. Cada corpo de prova passou por limpeza em banho ultrassom, secagem e pesagem. A limpeza foi feita em banho ultrassônico durante 5 minutos. A secagem foi realizada com secador de cabelo convencional durante 1 minuto. Foram realizadas 3 pesagens em balança analítica para cada amostra e a média destes valores foi utilizada para representar a massa do corpo de prova. Todas as etapas do ensaio foram realizadas em ambiente à temperatura de 20°C.

O corpo de prova é acoplado à haste e colocado em contato com o abrasivo já fixado no disco enquanto o equipamento está posicionado no início do ensaio. A carga é então colocada sobre o corpo de prova e os parâmetros do ensaio são inseridos no *software* do equipamento. Após definir os parâmetros o ensaio é iniciado.

Quando toda a trajetória do ensaio é percorrida o equipamento para e o corpo de prova pode ser removido. O corpo de prova passa novamente pela etapa de preparação para que seja medida a perda de massa. Após remover o corpo de prova o carro do disco retorna à posição de início. O abrasivo é então substituído e o equipamento está pronto para o próximo ensaio.

Foram utilizados 3 corpos de prova de cada material estudado. Cada corpo de prova foi ensaiado cinco vezes, resultando em 15 ensaios para cada material. O resultado é dado pela média da perda de massa referente a cada material.

A análise da perda de massa permite o cálculo da taxa de desgaste e a resistência ao desgaste do material. O equipamento utilizado para registrar a perda de massa foi uma balança analítica ATY224, fabricada pela Shimadzu, com capacidade de 220 gramas e precisão de 0,1 miligramas. A perda de massa é calculada como a diferença entre a massa do corpo de prova antes do ensaio e a massa do corpo de prova após o ensaio. A taxa de desgaste pode ser definida como a razão entre a perda de massa e o tempo total de ensaio em minutos ou a razão entre a perda de massa e o deslocamento total em metros. A resistência ao desgaste dada pelo inverso da taxa de desgaste.

$$\text{Perda de massa} = m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}} \quad (2)$$

$$\text{Taxa de desgaste} = \frac{\text{Perda de massa}}{\text{tempo}_{\text{minutos}}} \quad (3)$$

$$\text{Taxa de desgaste} = \frac{\text{Perda de massa}}{\text{deslocamento}_{\text{metros}}} \quad (4)$$

A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios comparativos. Estes parâmetros foram escolhidos para reproduzir condições de ensaios já registrados na literatura.

Tabela 3 – Parâmetros do ensaio de desgaste no dispositivo pino-disco.

Parâmetro	Valor
Rotação	66 RPM
Velocidade linear	0,35 mm/s
Carga aplicada	4,6 N

Fonte: Adaptado de Oliveira (2016).

O raio inicial do percurso é igual a 40mm e o raio final igual a 5mm, a distância total percorrida no ensaio é de 16,95 metros por lixa utilizada. O mesmo ensaio já havia sido realizado nas mesmas condições em outros equipamentos de mesma configuração e os resultados destes ensaios serão utilizados para comparação entre os equipamentos.

Após a realização dos ensaios de avaliação do equipamento, foram realizados ensaios com variação do abrasivo para comparar a influência da granulometria da lixa no desgaste dos materiais estudados.

A metodologia dos ensaios foi baseada em outros trabalhos que seguiram as normas técnicas apropriadas para a condução correta dos experimentos.

3.3 VARIAÇÃO DO TAMANHO DO ABRASIVO

Outra série de ensaios com os dois materiais foi realizada para avaliar a influência do tamanho do abrasivo como parâmetro do ensaio. Usando lixas #320 e mantendo fixos os outros parâmetros, os resultados foram comparados com os resultados obtidos para perda de massa e taxa de desgaste em lixas #220.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO MECANISMO DE DESGASTE

Uma análise por microscopia eletrônica de varredura foi realizada num microscópio Tescan Mira3 para caracterizar os mecanismos de desgaste atuando no tribossistema durante os ensaios de desgaste no dispositivo pino-disco. Uma amostra representativa de cada material foi utilizada nesta análise

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos no decorrer dos ensaios laboratoriais, bem como uma discussão a respeito dos mesmos.

4.1 AVALIAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DOS ENSAIOS

A Tabela 5 apresenta os resultados de perda de massa das três amostras de Aço SAE 1045 nos cinco ensaios realizados no equipamento 1.

Tabela 4 – Perda de massa das amostras de Aço SAE 1045

Ensaio	Perda de massa (mg)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
1	7,23	7,40	5,20
2	7,27	6,77	7,17
3	6,07	5,47	6,77
4	7,03	7,67	7,40
5	6,73	6,63	7,80
Média	6,89 ± 0,46	6,79 ± 0,76	6,87 ± 0,90

Fonte: o autor (2019)

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para perda de massa das três amostras de Al 6351-T6 nos cinco ensaios realizado no equipamento 1.

Tabela 5 – Perda de massa das amostras de Al 6351-T6

Ensaio	Perda de massa (mg)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
1	10,40	8,23	8,80
2	12,07	9,30	9,83
3	5,10	8,43	11,13
4	7,63	9,17	9,80
5	10,73	7,60	9,77
Média	9,19 ± 2,50	8,55 ± 0,63	9,87 ± 0,64

Fonte: o autor (2019)

Uma análise estatística foi realizada para verificar se há diferença entre as médias obtidas para a perda de massa em cada um dos materiais estudados. Verificando o intervalo de confiança para t-student de 95%, percebeu-se que nos resultados de perda de massa do Aço

SAE 1045 as médias são estatisticamente iguais pois seus valores estão nos intervalos de confiança umas das outras. Para o Al 6351-T6, este comportamento estatístico também é observado.

4.2 PERDA DE MASSA

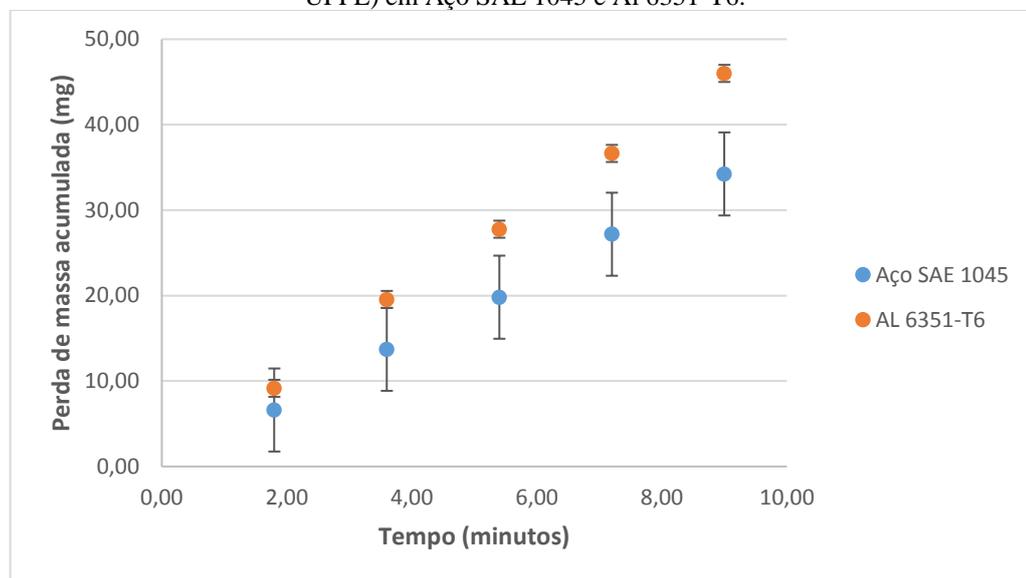
As amostras de Aço SAE 1045 e alumínio 6351-T6 foram ensaiadas com o objetivo de verificar a perda de massa com relação ao tempo de ensaio. Os resultados da perda de massa são apresentados na tabela 7 e exibidos na forma de gráfico na figura 10.

Tabela 6 – Perdas de massa médias das amostras

Tempo (minutos)	Deslocamento (metros)	Perda de massa acumulada (mg)	
		Aço SAE 1045	Al 6351-T6
1,80	16,95	6,61 ± 0,73	9,14 ± 1,64
3,60	33,90	13,71 ± 0,73	19,54 ± 1,64
5,40	50,85	19,81 ± 0,73	27,77 ± 1,64
7,20	87,80	27,18 ± 0,73	36,63 ± 1,64
9,00	84,75	34,23 ± 0,73	46,00 ± 1,64

Fonte: o autor (2019)

Figura 10 – Perda de massa registrada em ensaios pino-disco no Laboratório de Superfícies e Desgaste (LSD - UFPE) em Aço SAE 1045 e Al 6351-T6.



Fonte: o autor (2019)

É possível perceber o comportamento linear dos resultados. Desta forma, as equações das retas que descrevem a perda de massa para o Aço SAE 1045 e para o Al 6351-T6 são, respectivamente:

$$y = 3,84x - 0,33 \quad (a)$$

$$y = 5,12x - 0,08 \quad (b)$$

onde y indica a perda de massa e x o tempo de ensaio, em minutos.

Analisando os dados apresentados é possível notar que o alumínio tem uma perda de massa superior à observada para o aço. A perda de massa na liga de alumínio é 34% maior que a perda de massa registrada para o aço. Este comportamento é justificado pelo fato do alumínio possuir características de um metal mais dúctil quando comparado ao aço. A perda de massa média de cada material é apresentada na tabela 8.

Tabela 7 – Perda de massa média de cada material após os ensaios

Material	Perda de massa média (mg)
Aço 1045	6,85 ± 0,73
Al 6351-T6	9,20 ± 1,64

Fonte: Acervo pessoal (2019)

4.3 TAXA DE DESGASTE

A Tabela 8 apresenta os valores de taxas de desgaste para os materiais estudados. As taxas de desgaste são obtidas da razão entre a média das perdas de massa e o tempo total de ensaio. Observando os resultados exibidos nota-se que a taxa de desgaste do Al 6351-T6 é 34% maior que a taxa de desgaste do Aço SAE 1045, mesmo valor obtido ao comparar a perda de massa dos dois materiais.

Tabela 8 – Taxa de desgaste dos materiais

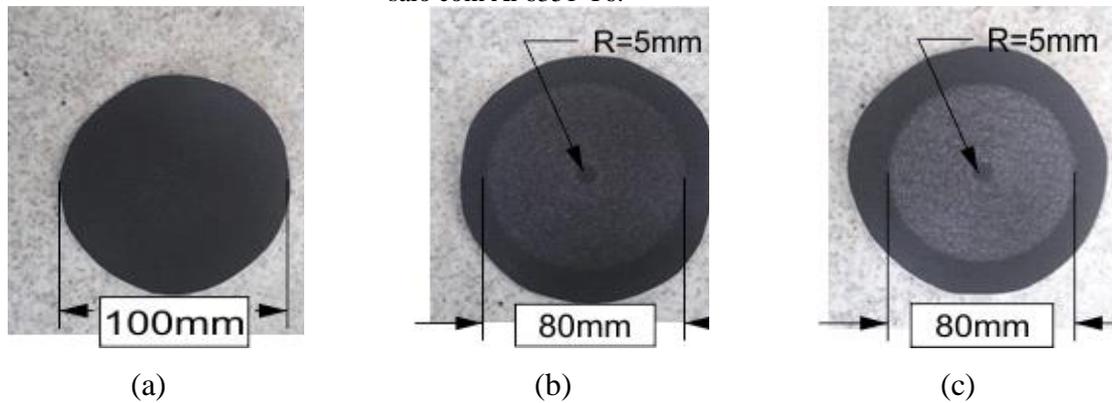
Material	Taxa de desgaste mg/min
Aço SAE 1045	3,80
Al 6351-T6	5,11

Fonte: o autor (2019)

Nota-se também que os valores de taxa de desgaste se aproximam dos valores obtidos para os coeficientes angulares das retas de perda de massa. O coeficiente angular da equação da reta da perda de massa do Aço SAE 1045 é 1% maior que a taxa de desgaste registrada para este material. Por sua vez, a taxa de desgaste do Al 6351-T6 é 0,1% maior que o coeficiente angular da reta de perda de massa deste material.

A Figura 11 apresenta o aspecto das lixas antes e depois de (b) ensaios de desgaste no Aço SAE 1045 e (c) Al 6351-T6.

Figura 11 – Aspecto das lixas de carbeto de silício (a) nova, (b) após ensaio com Aço SAE 1045 e (c) após ensaio com Al 6351-T6.



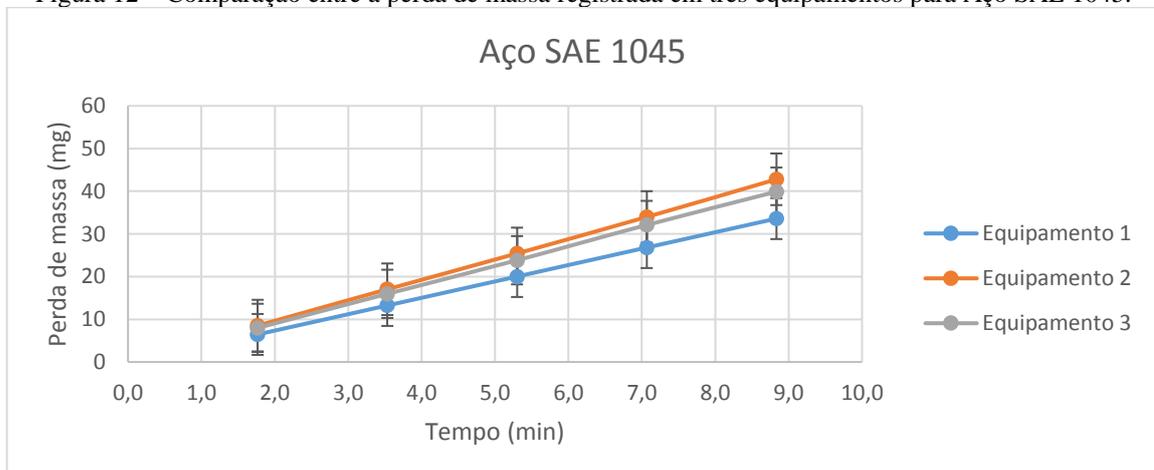
Fonte: o autor (2019).

A marca da pista de desgaste é mais notável nos ensaios com Al 6351-T6 caracterizando maior quantidade de material depositado na lixa do que após ensaios com Aço SAE 1045. Isto contribui com o que foi apresentado até o momento, estando de acordo com a maior perda de massa no Al 6351-T6.

4.4 COMPARAÇÃO DE ENSAIOS DE DESGASTE ENTRE TRÊS EQUIPAMENTOS

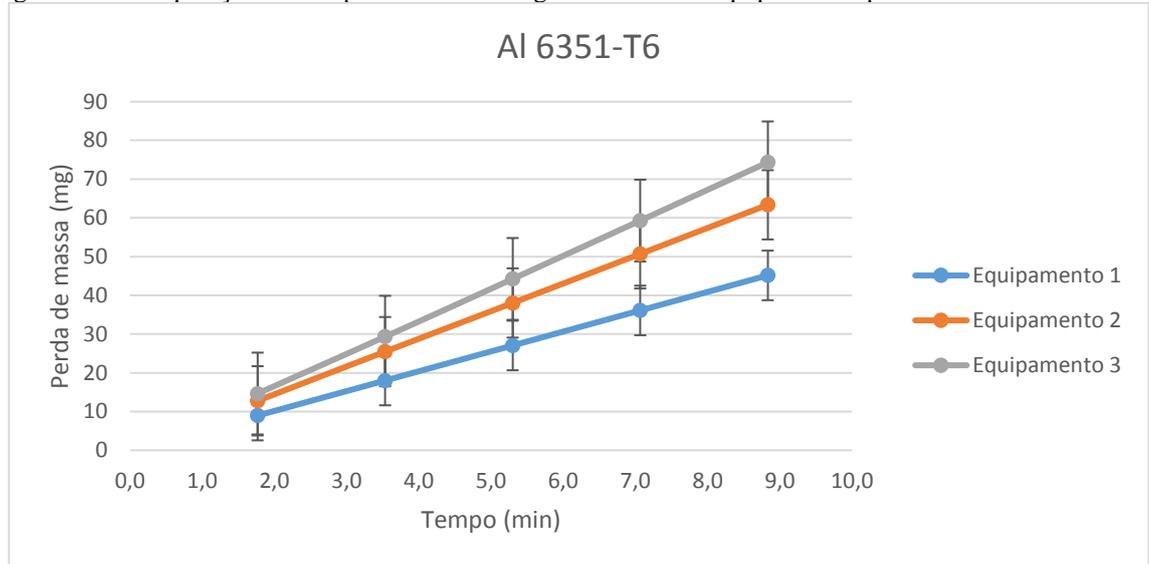
Para realizar a análise dos resultados registrados no tribômetro pino-disco alvo deste estudo foram analisados resultados de ensaios realizados em outros dois equipamentos fabricados nas mesmas configurações. Os resultados obtidos dos ensaios nos três equipamentos estão dispostos nas figuras 12 e 13.

Figura 12 – Comparação entre a perda de massa registrada em três equipamentos para Aço SAE 1045.



Fonte: o autor (2019)

Figura 13 – Comparação entre a perda de massa registrada em três equipamentos para Al 6351-T6.



Fonte: o autor (2019)

Os resultados apresentados nas figuras demonstram a divergência entre os ensaios realizados nos três equipamentos. Analisando os resultados dos ensaios com Aço SAE 1045 é possível notar que a maior perda de massa é registrada nos ensaios realizados no equipamento 2. Para o Al 6351-T6, os dados mostram que os ensaios no equipamento 3 possui os maiores valores para perda de massa.

A perda de massa do Aço SAE 1045 registrada nos ensaios realizados no equipamento 1 mostra que esta é 22% menor que a registrada no equipamento 2 e 16% menor do que a registrada no equipamento 3.

Para os ensaios realizados com Al 6351-T6, os resultados apresentados no equipamento 1 evidenciam uma perda de massa 29% menor que a registrada no equipamento 2, enquanto foi registrada perda de massa 39% menor que no equipamento 3.

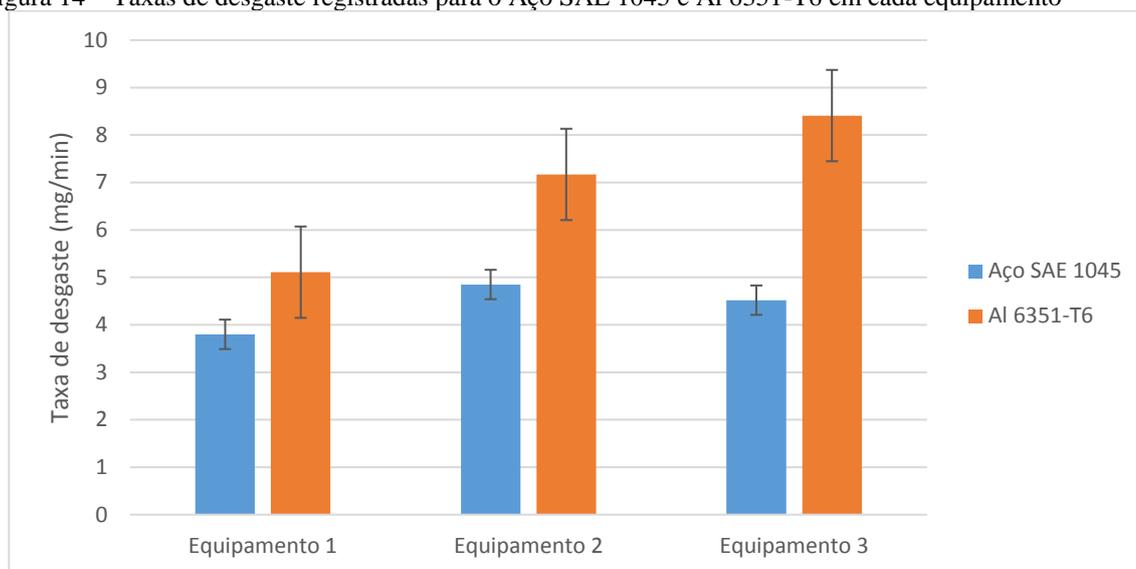
A Tabela 9 apresenta a variação da taxa de desgaste entre os laboratórios para os materiais estudados e a figura 14 representa de forma gráfica estes dados.

Tabela 9 – Comparação entre as taxas de desgaste registradas em três equipamentos

Material	Taxa de desgaste (mg/min)		
	Equipamento 1	Equipamento 2	Equipamento 3
Aço 1045	3,80 ± 0,41	4,85 ± 0,17	4,52 ± 0,10
Al 6351-T6	5,11 ± 0,91	7,17 ± 0,08	8,41 ± 0,17

Fonte: o autor (2019)

Figura 14 – Taxas de desgaste registradas para o Aço SAE 1045 e Al 6351-T6 em cada equipamento



Fonte: o autor (2019)

A análise dos resultados evidenciou que a taxa de desgaste do Aço SAE 1045 ensaiado no equipamento 1 é 22% menor que a taxa de desgaste registrada no equipamento 2 e 16% inferior a encontrada no equipamento 3. Por sua vez, na análise do Al 6351-T6, fica evidente que a taxa de desgaste obtida dos ensaios com o equipamento 1 é 29% inferior a obtida com o equipamento 2 e 39% inferior a obtida nos ensaios do equipamento 3.

A divergência dos resultados que é apresentada na tabela 9 e evidenciada na figura 14 pode estar relacionada a erros instrumentais. Como alguns dos parâmetros do ensaio precisam ser delimitados manualmente, grandes fontes de erro experimental surgem durante o ensaio.

A interpretação dos resultados obtidos nos ensaios de desgaste abrasivo deve ser realizada com cautela, principalmente quando se pretende comparar com resultados de equipamentos diferentes. Grandes variações nos resultados, indicando diferenças no comportamento das propriedades tribológicas dos materiais sob estudo podem estar relacionadas a:

- Fatores de projeto e fabricação dos equipamentos;
- Ajustes de carga nos ensaios;
- Precisão dos instrumentos de medida;
- Operador ao realizar as etapas do experimento.

4.5 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO ABRASIVO

Ambos os materiais foram submetidos a ensaios com lixas de granulometria maior, #320 com a finalidade de comparar a influência deste parâmetro na perda de massa e na taxa de desgaste dos materiais ensaiados no equipamento 1. A Tabela 10 apresenta a perda de massa dos materiais ensaiados.

Tabela 10 – Comparação entre a perda de massa em relação à granulometria da lixa

Material	Perda de massa (mg) na	Perda de massa (mg) na
	lixa #220	lixa #320
Aço 1045	6,85 ± 0,73	5,04 ± 0,53
Al 6351-T6	9,20 ± 1,64	6,97 ± 0,75

Fonte: o autor (2019)

Ao analisar os resultados apresentados na tabela é possível notar a influência do tamanho do abrasivo como parâmetro do ensaio de desgaste. O aumento da granulometria da lixa significa, também, redução do tamanho das partículas abrasivas contidas na superfície. Estes resultados indicam que a redução no tamanho do abrasivo significa, também, a redução na perda de massa e, por consequência, na taxa de desgaste. Desta forma, fica evidente a menor intensidade do desgaste em abrasivos com maior granulometria.

A Tabela 11 apresenta as taxas de desgaste dos materiais com a variação do abrasivo.

Tabela 11 – Comparação entre as taxas de desgaste em relação à granulometria da lixa

Material	Taxa de desgaste (mg/min)	Taxa de desgaste (mg/min)
	na lixa #220	na lixa #320
Aço 1045	3,80 ± 0,41	2,80 ± 0,29
Al 6351-T6	5,11 ± 0,93	3,87 ± 0,42

Fonte: o autor (2019)

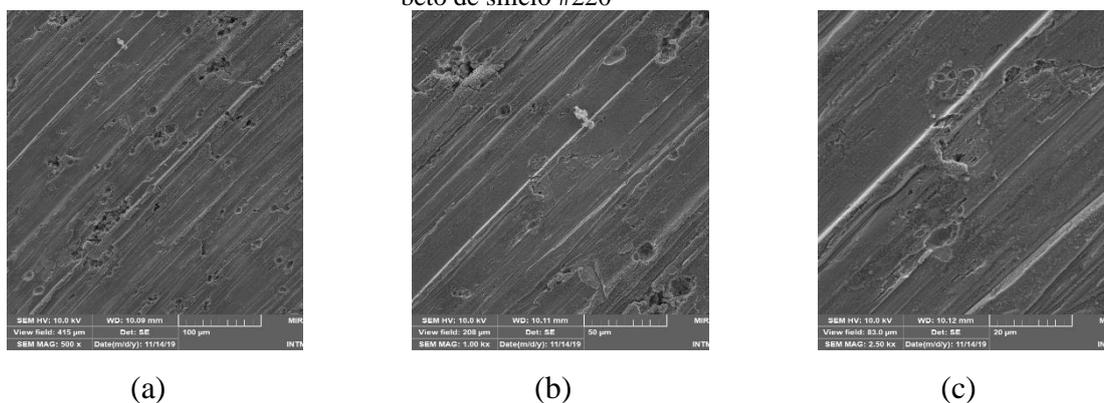
Os resultados apresentados evidenciam uma taxa de desgaste 35,7% maior, no Aço SAE 1045, para lixas #220 em relação a lixas #320. Para o Al 6351-T6, a taxa de desgaste obtida nas lixas #220 foi 32% maior do que a taxa de desgaste obtida em lixas #320. Estes resultados estão de acordo com o comportamento observado na perda de massa e fortalece o argumento de que a intensidade do desgaste é menor em lixas com maior granulometria.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DO MECANISMO DE DESGASTE

Foram analisadas as superfícies de uma amostra representativa de cada material ensaiado no sistema pino-disco. As análises foram feitas em MEV para identificar mecanismos de desgaste microscópicos que evidenciem o mecanismo de desgaste que causa perda de massa dos materiais.

A Figura 15 apresenta os resultados da microscopia realizada no Aço SAE 1045 com aumentos de (a) 500x, (b) 1000x e (c) 2500x. É possível notar a presença de riscos, indicando a presença de microcorte no tribossistema. As imagens evidenciam também a presença de indentações na superfície, que podem ser justificadas pela presença de partículas abrasivas livres no tribossistema. Por ser um material duro, durante o ensaio de desgaste, a passagem do Aço SAE 1045 pela lixa também provoca o rompimento de partículas abrasivas e estas ficam soltas na interface do desgaste, caracterizando desgaste abrasivo com três corpos.

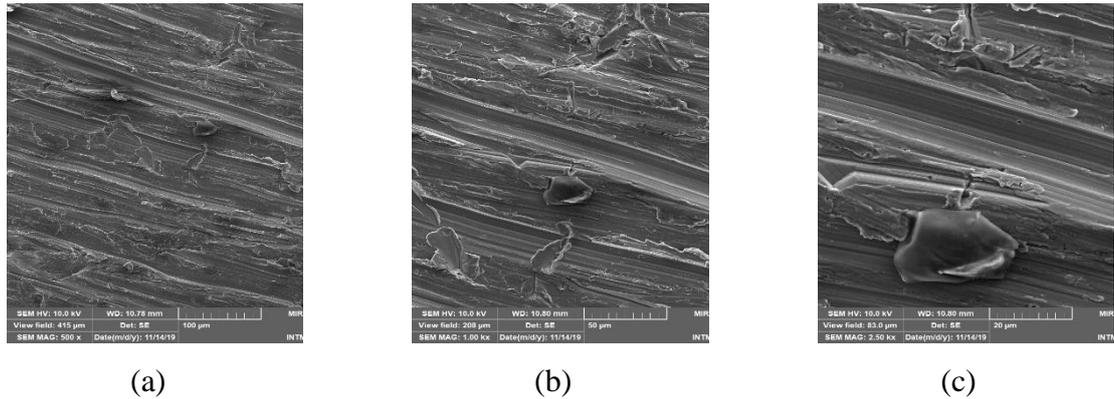
Figura 15 – Resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura em Aço SAE 1045 após ensaio com lixa de carbeto de silício #220



Fonte: o autor (2019)

A Figura 16 apresenta os resultados da microscopia no Al 6351-T6 com aumentos de (a) 500x, (b) 1000x e (c) 2500x. Fica evidente que os riscos na superfície do Al 6351-T6 são mais profundos que os riscos observados na superfície do Aço SAE 1045. Este comportamento é justificado pela dureza do Al 6251-T6 ser inferior. Também é possível notar que há material acumulado nas laterais dos riscos, caracterizando os mecanismos de microsulcamento e microcorte. Desta forma, no desgaste de materiais com durezas mais baixas, há deslocamento de material antes que haja a separação do mesmo da superfície.

Figura 16 – Resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura para Al 6351-T6 após ensaio com lixa de carbeto de silício #220



Fonte: o autor (2019)

Diferente do Aço SAE 1045, o Al 6351-T6 não apresenta evidências de indentações na superfície. Este fenômeno é justificável, por ser um material mais dúctil, as amostras de Al 6351-T6 não são capazes de quebrar as partículas abrasivas e estas, por sua vez, não ficam livres na interface de desgaste.

Este fenômeno de quebra de partículas abrasivas também auxilia no entendimento da menor perda de massa que ocorre no Aço SAE 1045 em relação ao Al 6351-T6. Com a quebra de partículas a eficiência do abrasivo diminui, fazendo com que também diminuam a perda de massa e a taxa de desgaste no material.

5 CONCLUSÕES

Ao final deste projeto, concluiu-se que o tribômetro pino-disco analisado exibiu boa reprodutibilidade nos experimentos com o Aço SAE 1045 e com o AL 6351-T6 quando ensaiados contra lixas de carbeto de silício em um sistema sem lubrificação.

A comparação dos resultados de perda de massa registrados no mesmo equipamento apresentou desvios padrões que variam de 0,46 a 2,8 para um intervalo de confiança de 95% no que diz respeito a reprodutibilidade dos ensaios no dispositivo estudado.

A variação dos resultados obtidos em diferentes equipamentos utilizando os mesmos parâmetros evidencia que há fontes de erros experimentais que precisam ser corrigidas para garantir que os resultados sejam compatíveis.

O comportamento tribológico dos materiais neste ensaio confirma que o Aço SAE 1045 possui maior resistência ao desgaste que o Al 6351-T6. Também ao analisar o comportamento tribológico nota-se a grande influência do tamanho do abrasivo como parâmetro para os ensaios em dispositivos pino-disco.

Os micromecanismos de desgaste observados na análise via MEV caracterizam o mecanismo de desgaste abrasivo, validando a aplicação do equipamento alvo deste estudo como ferramenta de pesquisa para avaliação de desgaste abrasivo em laboratório.

REFERÊNCIA

- BLAU, P. J.; BUDINSKI, K. G. **Development and use of ASTM standards for wear testing.** [s.d.].
- BOTH, G. B. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- BUDINSKI, K. G. **Surface engineering for wear resistance.** Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1988.
- BURAKOWSKI, T.; WIERZCHON, T. **Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies.** Boca Raton, Fla: CRC Press, 1999.
- CARDOSO, F. **Análise do desgaste abrasivo em revestimento duro depositado pelo processo de soldagem GTAW com duplo arame tubular das ligas FeCrC-B, FeCrC-Nb e FeCrC-NbW.** Monografia—Jaraguá do Sul: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2016.
- CORONADO, J. J. **Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de metais.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- DOERING, A. et al. **Evaluation of ASTM G65 abrasive —Spanning 13 years of sand.** *Wear*, v. 271, n. 9–10, p. 1252–1257, jul. 2011.
- FERNANDES, G. P. **Aplicação da tribologia na pesquisa e desenvolvimento de materiais para embreagens automotivas: para o estudo do atrito e do desgaste com foco na origem do desenvolvimento, estabilidade e deterioração do tribofilme.** Tese—São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo, 2015.
- HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. **Global energy consumption due to friction in passenger cars.** *Tribology International*, v. 47, p. 221–234, mar. 2012.
- HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. **Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions.** 2017.
- HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A. **Coatings tribology: properties, techniques, and applications in surface engineering.** Amsterdam ; New York: Elsevier, 1994.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** Repr ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- OLIVEIRA, M. DOS A. **Desgaste abrasivo do aço hadfield com diferentes teores de carbono em abrasômetro do tipo pino dsico.** [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, jul. 2016.

RODRIGUES, A. H. A. **Adaptação de um abrasômetro tipo roda de borracha para posicionamento horizontal da amostra**. Projeto de conclusão de curso—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

SANTOS, M. V. **Contribuição a um projeto, construção e validação de um abrasômetro roda de borracha – configuração vertical/horizontal**. Trabalho de conclusão de curso—Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

TYRKIEL, E.; INSTITUTE OF MATERIALS; INTERNATIONAL FEDERATION FOR HEAT TREATMENT AND SURFACE ENGINEERING (EDS.). **A guide to surface engineering terminology**. London: Institute of Metals in association with the IFHT, 1995.

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