

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS GABRIEL SOARES

**PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UM TRIBÔMETRO
MODELO PINO SOBRE DISCO (“*PIN ON DISK*”)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

LUCAS GABRIEL SOARES

**PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UM TRIBÔMETRO
MODELO PINO SOBRE DISCO (“*PIN ON DISK*”)**

Proposta de Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Junior

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014



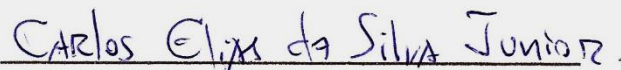
TERMO DE APROVAÇÃO

PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UM TRIBÔMETRO MODELO PINO SOBRE DISCO (“PIN ON DISK”)

por

Lucas Gabriel Soares

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em vinte e oito de julho de dois mil e quatorze como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.


Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Junior
Orientador


Profa. Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves
Membro titular


Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Ao meu pai Julio Cezar Soares, pelo exemplo de vida e de luta.

Aos meus tios João, Amalha, Maria Inês, Milton, Marisa, Valdeci, Teresinha, José e Ronaldo, pelos exemplos de coragem e apoio nos momentos difíceis.

Às memórias de minha mãe Marcia Fatima Soares, minha avó Maria Madalena da Silva e meu avô Geniplo Miguel da Silva, que tanto lutaram e contribuíram para minha educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha família, pelo apoio e confiança.

Agradeço ao meu professor orientador Dr. Carlos Elias da Silva Junior pela dedicação e atenção na orientação deste trabalho.

À Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves pela sugestão do tema e apoio no trabalho.

À Laison Cabral, Rodrigo Kos Scarpetta, Paulo Boselli, Cezar Kolarovic e Wanderlei Malaquias pela ajuda na realização deste trabalho.

Ao Diretor geral da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio, professor Devanil Antonio Francisco; à Chefe de Gabinete do Diretor Geral, Ana Lúcia Rosa e à Secretária do Gabinete do Diretor Geral, Thais Helena de Lima Simão, que contribuíram para viabilização desse projeto.

À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que esse trabalho se concretizasse.

“Eu sustento que a única finalidade da ciência está em aliviar a cansaço da existência humana” (Galileu Galilei)

RESUMO

SOARES, Lucas Gabriel. Proposta de construção de um tribômetro modelo pino sobre disco (“*pin-on-disk*”). 2014. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Este trabalho propõe a construção de um tribômetro modelo pino sobre disco (“*pin-on-disk*”) projetado para testes com lubrificantes. O trabalho está dentro da área de tribologia, ciência moderna que basicamente trata do comportamento do atrito e do desgaste nos diversos materiais que estão em contato mecânico e apresentam movimento relativo entre si nas diversas condições de pressão, velocidade de escorregamento, temperatura, lubrificação, vibração, atmosfera, dentre outros. Busca classificar alguns dos diversos modelos de tribômetros existentes de acordo com sua aplicação, e também expõe um planejamento para o teste tribológico. Por fim apresenta alguns dos equipamentos que serão utilizados no tribômetro proposto.

Palavras chave: Tribologia. Testes tribológicos. Tribômetro pino-sobre-disco. Desgaste.

ABSTRACT

SOARES, Lucas Gabriel. Proposal of construction of a pin on disk tribometer. 2014. Final Thesis (Graduation) – Mechanical Industrial Engineering Course, Technological Federal University of Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

This work proposes the construction of a pin on disc tribometer designed for tests with lubricants. The work is inside the tribology area, modern science which basically deals with the behavior of the friction and wear in many materials that are in mechanical contact and keeps relative movement between themselves in different conditions of pressure, sliding velocity, temperature, lubrication, vibration, atmosphere, among others. The work tries to classify some of the many existing tribometers according to their application, and also expose a schedule for the tribological test. Finally presents some of the equipments that will be used in the proposed tribometer.

Keywords: Tribology. Tribological tests. Pin-on-disc tribometer. Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tribômetros desenvolvidos por Leonardo da Vinci	15
Figura 2 – Representação esquemática de forças sobre um corpo qualquer	24
Figura 3 – Diagrama dos tipos de desgaste em função do elemento interfacial e do tipo de movimento das interfaces.....	28
Figura 4 – Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste.	29
Figura 5 – Pintura rupestre demonstrando a aspersion de água para a redução de atrito no Egito 2400 AC	31
Figura 6 – Lubrificação e competitividade	33
Figura 7 – Estágios de desgaste típicos que aparecem ao longo do tempo de serviço em contatos deslizantes.....	36
Figura 8 – Classificação dos danos superficiais e desgaste	37
Figura 9 – Contatos conformes (a) e contatos não conformes (b)	40
Figura 10 – Classificação de tribômetros de acordo com o grau de realismo	43
Figura 11 – Razões para realizar um tribômetro	45
Figura 12 – Recomendações para planejamento do teste tribológico.....	47
Figura 13 – Conselhos para avaliação do desgaste.....	49
Figura 14 – Configurações normalmente empregadas para ensaios tribológicos	51
Figura 15 – Configurações comuns para testes de desgaste abrasivo	53
Figura 16 – Tribômetro modelo pino sobre disco	55
Figura 17 – Tribômetro construído no Instituto Tecnológico de Aeronáutica	55
Figura 18 – Projeto do tribômetro em Solidworks.....	56
Figura 19 – Pinos tipo esfera com seus respectivos porta-pinos.....	56
Figura 20 – Motor elétrico WEG	58
Figura 21 – Inversor de frequência WEG CFW 08.....	59
Figura 22 – Extensômetro	60
Figura 23 – Ponte de Wheatstone.....	60
Figura 24 – Gráfico de deformação x carga mostrando histerese, repetibilidade e não linearidade.....	61
Figura 25 – Temporizador LWKT COEL	63
Figura 26 – Painel digital.....	65

Figura 27 – Orçamento do projeto.....	66
Figura 28 – Motor elétrico WEG	67
Figura 29 – Inversor WEG CFW 08.....	67
Figura 30 – Botão de comando duplo	68
Figura 31 – Célula de carga BSPL 5 Kg.....	68
Figura 32 – Temporizador LWKT COEL	69
Figura 33 – Sensor indutivo.....	69
Figura 34 – Indicador Digital WT21 LCD.....	70
Figura 35 – Bucha roscada	71
Figura 36 – Manípulo vertical	71
Figura 37 – Manípulo horizontal	72
Figura 38 – Eixo da célula de carga	72
Figura 39 – Peso 1 Newton.....	73
Figura 40 – Peso 2 Newtons.....	73
Figura 41 – Peso 5 Newtons	74
Figura 42 – Peso 10 Newtons	74
Figura 43 – Eixo INA	75
Figura 44 – Mancal.....	75
Figura 45 – Eixo do motor	76
Figura 46 – Recipiente	76
Figura 47 – Eixo	77
Figura 48 – Bucha deslizante	77
Figura 49 – Eixo fuso vertical	78
Figura 50 – Eixo fuso horizontal	78
Figura 51 – Ponteira esfera.....	79
Figura 52 – Porca ponteira.....	79
Figura 53 – Pino quadrado	80
Figura 54 – Porca M8.....	80
Figura 55 – Barra roscada.....	81
Figura 56 – Mesa soldada	81
Figura 57 – Cantoneira.....	82
Figura 58 – Sapata.....	82
Figura 59 – Rolamento miniatura	83
Figura 60 – Amostra de desgaste	83

Figura 61 – Amostra de desgaste pino	84
Figura 62 – Suporte do sensor	84
Figura 63 – Acoplamento	85
Figura 64 – Rolamento referência 6904	85
Figura 65 – Rolamento referência 6002	86
Figura 66 – Suporte massa	86
Figura 67 – Contra peso.....	87
Figura 68 – Braço 1.....	87
Figura 69 – Braço 2.....	88
Figura 70 – Braço3.....	88
Figura 71 – Chapa frontal.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASTM - American Society for Testing and Materials

ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

F_{at}	Força de atrito
F	Força tangencial
F_N	Força normal
F_G	Força da gravidade
μ	Coefficiente de atrito
μ_s	Coefficiente de atrito estático
μ_k	Coefficiente de atrito dinâmico ou cinético
μ_a	Parcela do coeficiente de atrito relativo à adesão
μ_p	Parcela do coeficiente de atrito referente à deformação plástica
μ_e	Parcela do coeficiente de atrito referente à deformação elástica
μ_{part}	Parcela do coeficiente de atrito referente à terceiros corpos
K	Coefficiente de desgaste ($mm^{-3} N \cdot m$)
Vol	Volume de material perdido
w	Força normal aplicada
V	Velocidade de escorregamento (m/s)
N	Rotação fornecida pelo tribômetro (rpm)
r_e	Raio efetivo (m)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	16
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivos gerais	17
1.3.2	Objetivos específicos	17
1.4	JUSTIFICATIVA	18
2	REVISÃO BIBLOGRÁFICA	21
2.1	O ATRITO	21
2.1.1	Materiais de atrito	22
2.1.2	O atrito de deslizamento	23
2.1.3	O atrito de rolamento	25
2.2	O DESGASTE	25
2.2.1	Mecanismo de desgaste	27
2.3	LUBRIFICAÇÃO	30
2.4	TRIBOLOGIA	33
2.5	CONTATOS MECÂNICOS	39
2.6	O PARÂMETRO PRESSÃO X VELOCIDADE (P x V)	40
2.7	CLASSIFICAÇÃO DE TRIBÔMETROS	41
2.8	PLANEJAMENTO DO TESTE TRIBOLÓGICO	44
2.9	EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE DESGASTE	48
2.10	EXEMPLOS DE TESTES TRIBOLÓGICOS	50
2.10.1	Desgaste abrasivo	51
2.11	MEDIÇÃO DO DESGASTE	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1	O TRIBÔMETRO PROPOSTO	54
3.2	MOTOR ELÉTRICO	57
3.3	INVERSOR DE FREQUENCIA	58
3.4	CÉLULA DE CARGA	59
3.5	TEMPORIZADOR	62
3.6	PAINEL DIGITAL	64
3.7	ORÇAMENTOS	65
3.8	COMPRA DOS EQUIPAMENTOS	66
3.9	FABRICAÇÃO DAS PEÇAS	70
4	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita uma apresentação sobre a proposta de Trabalho de Conclusão de Curso enfocando uma proposta de construção de um tribômetro modelo pino sobre disco (*“pin on disk”*).

A palavra tribômetro vem da palavra tribologia. A origem do termo tribologia vem do grego e significa estudo do esfregar (atrito). A tribologia pode ser definida como a ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento e dos assuntos e práticas relacionados (JOST, 1990). Portanto, sempre que existir o contato mecânico entre corpos e o movimento relativo entre os mesmos, esta interação será objeto de estudo da tribologia.

O termo tribologia foi usado pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost, considerado o marco de criação da tribologia. H. Peter Jost foi o primeiro a estudar os impactos econômicos devido a utilização dos conhecimentos em tribologia. Houve um grande aumento no relato de prejuízos relacionados a desgaste no início da década de 1960. H. Peter Jost avaliou que unindo o conhecimento existente em várias áreas como lubrificação, atrito, desgaste, física, química, engenharia de materiais, mecânica dos fluidos, dentre outras ciências, seria possível reduzir os prejuízos com desgaste em torno de vinte por cento.

Um dos principais focos de estudo da tribologia é o desgaste. Portanto, na tribologia são estudados como fatores relacionados à natureza dos materiais, às suas propriedades físicas, às suas propriedades mecânicas, às tensões decorrentes do contato e as próprias condições de contato influem sobre os mecanismos e as taxas de desgaste dos materiais que compõem os corpos em contato mecânico.

Leonardo da Vinci é considerado o pai da tribologia moderna pois fez relevantes contribuições para o entendimento do atrito e do desgaste. Ele mediu através de experimentos, forças de atrito em planos horizontais e inclinados, demonstrando que essas forças são dependentes da força normal ao deslizamento dos corpos e independentes da área de contato aparente. Propôs também uma distinção entre atrito de escorregamento e de rolamento, e introduziu o coeficiente de atrito como sendo proporcional à força normal. Na Figura 1 é possível ver os equipamentos construídos por Leonardo da Vinci, que são os primeiros tribômetros documentados na história.

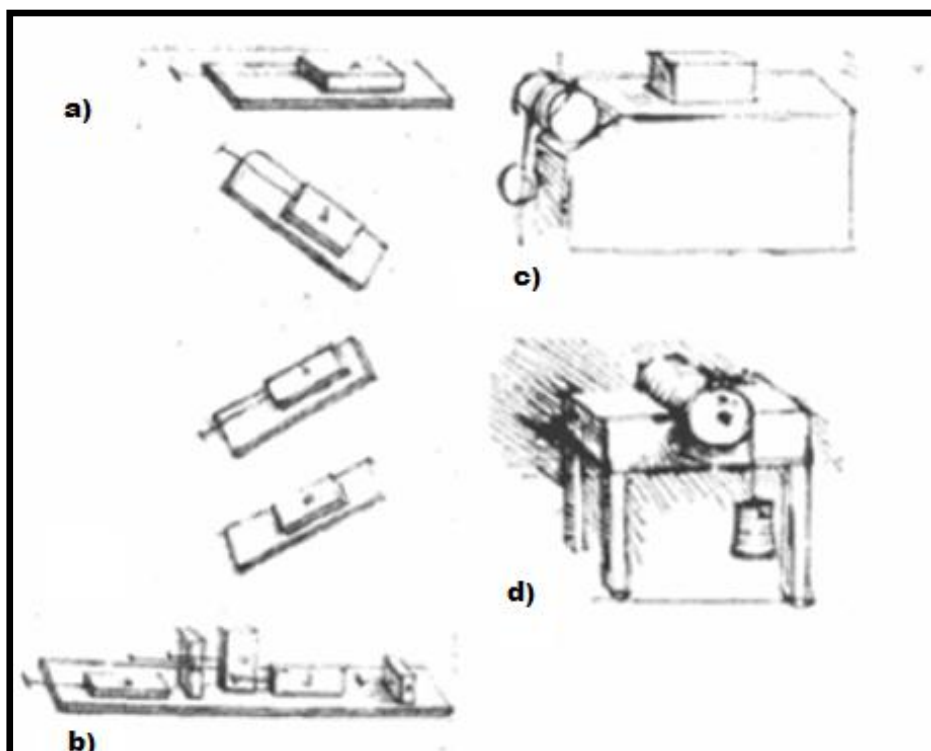


Figura 1 – Tribômetros desenvolvidos por Leonardo da Vinci
Fonte: RADl et al., (2007).

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Os lubrificantes são largamente utilizados em uma série de processos e sistemas do setor metal-mecânico. Muitas vezes é necessário testar ou comparar o comportamento de diferentes lubrificantes para um sistema específico, como, por exemplo, o sistema peça-ferramenta-fluido de corte, para fazer a escolha de maneira adequada, seja por um produto mais flexível, mais barato, mais eficiente ou mais seguro.

Existe uma grande gama de fluidos lubrificantes disponíveis no mercado, os quais devem atender às necessidades operacionais e de legislação (ambiental e de saúde do trabalhador), o que torna necessário uma análise padronizada do sistema.

O tribômetro é um equipamento usado para realizar a caracterização tribológica do sistema por meio da medição da temperatura, pressão, coeficiente e forças de atrito, desgaste, vibração ou demais parâmetros importantes no processo,

considerando uma condição específica de carga, de torque, de velocidade e de rotação. Esses dados fornecerão subsídios para proceder à escolha mais adequada de um lubrificante para o processo em estudo.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Necessita-se construir um tribômetro que auxilie no desenvolvimento de pesquisas na área de lubrificação e desgaste de materiais no câmpus local da UTFPR, tanto para a realização de testes de seleção de lubrificantes, quanto para o desenvolvimento de novos produtos.

Existe o interesse de professores que já desenvolveram pesquisas na área e gostariam de continuar o seu trabalho com fluidos de corte. Foi proposto a construção de um tribômetro do tipo pino sobre disco (*“pin-on-disk”*) especialmente projetado para análise de lubrificantes. Como já houve o desenvolvimento de um tribômetro no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), esse projeto servirá de modelo para o projeto aqui proposto. Assim, será possível corrigir eventuais falhas do projeto anterior, bem como propor melhorias e/ou acrescentar novas funções a esta presente proposta de construção de um tribômetro.

1.3 OBJETIVOS

Nos tópicos seguintes serão estabelecidos os principais objetivos norteadores deste trabalho.

1.3.1 Objetivos gerais

O trabalho aqui apresentado tem como objetivo principal a construção de um tribômetro do tipo pino sobre disco (*"pin on disk"*), para realizar a caracterização tribológica de processos que na sua execução envolvem a refrigeração e a lubrificação de superfícies em atrito empregando fluidos lubrificantes, como por exemplo, na usinagem dos metais, permitindo o teste dos lubrificantes em diferentes condições, bem como verificar a influência dos mesmos sobre o desgaste resultante nestas superfícies.

1.3.2 Objetivos específicos

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos, em consonância ao objetivo geral:

- Compreender a ciência da tribologia, os princípios da lubrificação e refrigeração.
- Detalhar os principais sistemas de medição usados e necessários para a construção de um tribômetro, a fim de escolher os sistemas que melhor atendam às necessidades dos usuários e permitam testar uma ampla gama de possibilidades.
- Estudar as normas internacionais que regem a construção e a realização de ensaios no tribômetro pino sobre disco, a fim de garantir sua validade.
- Operacionalizar e calibrar o tribômetro, uma vez que o método científico exige repetibilidade e reprodutibilidade dos procedimentos para que os resultados obtidos sejam confiáveis.

1.4 JUSTIFICATIVA

Devido à dificuldade e complexidade em se reproduzir exatamente um tribosistema ou ainda monitorar todas as variáveis físicas relacionadas ao tribosistema durante a operação de uma máquina real, Zum Gahr (1987) e Hutchings (1992) sugerem que os tribosistemas sejam representados em ensaios de laboratório em condições controladas e que os desempenhos dos materiais sejam qualificados em relação aos mecanismos básicos de desgaste. Uma vez que o ensaio é capaz de aproximar os mecanismos de desgaste de um determinado tribosistema, pode-se então utilizá-lo para comparar os diversos tipos de materiais quando submetidos a esse tribosistema.

O processo de desenvolvimento ou de escolha de fluidos de corte envolve vários aspectos. Devido ao amplo uso de fluidos de corte na usinagem (processo de fabricação dos mais, se não o mais utilizado na manufatura), torna-se fundamental a pesquisa para encontrar produtos mais seguros (ao homem e ao meio ambiente), mais eficientes e baratos. O tribômetro proposto ajudaria a mapear vários desses aspectos.

Segundo Gonçalves (2013), é importante mapear os requisitos e as restrições necessários para utilização de fluidos de corte porque, desta forma, é possível desenvolver, ou mesmo escolher, um produto de qualidade que possa atender às diversas necessidades do processo, sejam elas mecânicas (tribológicas e de usinagem), físico-químicas (que não apresentem substâncias que sejam prejudiciais ao processo, à máquina-ferramenta, à peça, à ferramenta de corte e ao homem) e microbiológicas (que não comprometa a saúde humana e nem seja agressiva ao meio ambiente).

Ressalta-se que no processo de usinagem é importante entender a formação do cavaco e a influência dos fluidos de corte para cada sistema tribológico específico, considerando o material da peça, o material da ferramenta, o processo de usinagem e os parâmetros de corte, para assim escolher o lubrificante mais adequado. Por exemplo, avaliar se a função fundamental do fluido é a lubrificação (condição importante em situações de usinagem com baixas velocidades de corte), ou a refrigeração (importante em usinagens a altas velocidades de corte), ou até mesmo a retirada do cavaco, (função importante, por exemplo, nos processos de

furação e roscamento). Os sistemas peça, ferramenta e fluido de corte são exemplos típicos de sistemas tribomecânicos.

Conhecendo o comportamento dos sistemas tribomecânicos e como as formas de lubrificação podem contribuir para o melhor desempenho dos processos, torna-se mais fácil compreender os tipos de desgaste e também como agir para amenizá-los (GONÇALVES, 2013).

Não somente nos testes de desempenho de fluidos de corte, mas também no processo de desenvolvimento de novos fluidos é necessário uma varredura das condições tribológicas do sistema. Como o comportamento do sistema tribológico muda de acordo com a variação dos parâmetros é interessante simular esses sistemas e obter o máximo de dados possível. O tribômetro é uma máquina especialmente desenvolvida para realizar ensaios e para tomada de dados tribológicos.

Em muitos processos de usinagem utiliza-se uma grande quantidade de fluido de corte para a refrigeração e/ou lubrificação da operação de corte. O método de refrigeração tradicionalmente utilizado é conhecido como método de inundação (ou jorro). Para o desenvolvimento dos testes de novos fluidos de corte torna-se importante viabilizar o processo, testando apenas uma pequena quantidade de fluido de corte, garantido economia e também segurança. Uma vez que não se sabe de antemão qual será o comportamento desse fluido, se ele pode ser perigoso ou sensível ao operador, se pode ser agressivo ao meio ambiente, se pode prejudicar a máquina, o ferramental ou a peça, também neste aspecto o tribômetro será de grande valia.

Importante citar que os testes no tribômetro devem apresentar resultados muito parecidos com os obtidos nos experimentos de usinagem, sendo válida a correlação entre eles. A comprovação por meio de experimentos de usinagem, em uma fase posterior à do desenvolvimento ou escolha do fluido, é importante principalmente para avaliar a influência do fluido de corte sobre os esforços de usinagem durante toda a vida da ferramenta, sobre os tipos de desgastes desenvolvidos na ferramenta e sobre o resultado do processo de usinagem, por meio da avaliação dos parâmetros de qualidade (de forma e de superfície) do componente usinado.

Para tornar um fluido de corte viável é importante que ele cumpra outros requisitos que não diretamente ligados a tribologia, como estar em conformidade

com a legislação ambiental (ou seja, apresentar padrões mínimos adequados à saúde humana e à segurança ambiental, assim como uma análise de viabilidade de todo o ciclo do produto). Percebe-se desta forma o grande desafio que é o processo de desenvolvimento e seleção de fluidos de corte. Esta análise engloba o conhecimento de várias ciências. Vale ressaltar também que o uso mundial de fluidos de corte é gigantesco.

A pesquisa e desenvolvimento de tecnologia nessa área é bastante promissora, principalmente devido a necessidade de produtos que atendam melhor aos requisitos de produtividade, qualidade, segurança, meio ambiente, saúde e custos. Santos e Sales (2007, p.188) também comentam sobre a seleção de fluidos de corte " A seleção ideal é difícil devido à variedade de produtos disponíveis no mercado. O custo é alto e a utilização de um fluido tem que compensar economicamente, isto é, os benefícios devem superar os gastos".

O teste tribológico seria portanto o pré-requisito para avaliar a capacidade do lubrificante.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos envolvidos no estudo do atrito, do desgaste, da lubrificação e da tribologia. Este embasamento teórico permitirá uma melhor compreensão do equipamento, sua área de estudo e sua finalidade, bem como facilitar futuras análises dos dados obtidos em ensaios experimentais.

2.1 O ATRITO

Existem várias definições para o atrito. Segundo BHUSHAM (2001) atrito é a resistência ao movimento durante o deslizamento ou rolagem quando um corpo sólido move-se tangencialmente em relação a outro corpo sólido com o qual está em contato. Esta definição deixa claro que os corpos devem estar em contato. Porém, caso exista um lubrificante entre as superfícies, estas não estariam em contato mas existiria resistência ao movimento, e esta resistência é uma força de atrito. Portanto, a definição de BHUSHAM (2001) engloba apenas o atrito seco. KAPP e BUTT (2010) definem o atrito como a força entre duas superfícies que interagem que resiste ou impede o movimento relativo. Segundo esta definição não há restrições, ou seja, não é necessário que os corpos estejam em contato para existir força de atrito. A definição de KAPP E BUTT (2010) também engloba tanto o atrito cinético, quanto o estático, ao destacar “impede o movimento” e não simplesmente “resiste ao movimento”.

Existem muitas divergências entre as definições feitas por diversos autores sobre o atrito. Isso reflete a complexidade do tema, além dos múltiplos significados que podem ter a palavra atrito. Portanto, é importante saber qual o conceito de atrito irá se abordar em determinado problema. Os resultados estarão diretamente relacionados com a definição empregada, pois esta definição conduzirá ao seu próprio modelo de solução.

Uma abordagem interessante, oriunda das ciências térmicas, define o atrito como uma irreversibilidade. Um processo é chamado de irreversível se o sistema e

todas as partes que compõe sua vizinhança não puderem ser restabelecidos exatamente aos seus respectivos estados iniciais após o processo ter ocorrido (MORAN & SHAPIRO, 2009).

Diversas formas de atrito podem ser englobadas nessa definição que usa a palavra atrito para descrever a dissipação gradual de energia cinética em diversas situações: onde corpos ou substancia apresentam movimento relativo entre si. Tais como: atrito interno proveniente do amortecimento da vibração em sólidos, atrito viscoso, relativo a diminuição interna em líquidos, atrito superficial atuando entre um avião em movimento e o ar ao seu redor e, atrito sólido que é o atrito entre dois corpos que apresentam um movimento relativo de um em relação ao outro (LARSEN-BASSE, 1992).

Neste trabalho será destacado o atrito sólido. O movimento de um corpo sólido sobre o outro pode ser basicamente de duas formas: movimento de deslizamento e de rolamento.

2.1.1 Materiais de atrito

Segundo BALOTIN (2010), os materiais de atrito são elementos chave para o desempenho dos sistemas de freio presentes em automóveis. Estes materiais possuem elevados e estáveis coeficientes de atrito, desprezando condições ambientais. Também possuem elevada vida útil (pouco desgaste), e alto grau de conforto (não apresentam ruídos e vibrações). Ainda segundo BALOTIN (2010), o desenvolvimento de materiais de atrito é uma tarefa difícil, devido a interação dos diferentes componentes e à ocorrência de efeitos de liga. Os constituintes dos materiais de atrito são normalmente determinados pelo método de tentativa e erro. Estes materiais possuem cerca de dez a vinte componentes.

2.1.2 O atrito de deslizamento

A preocupação objetiva com a medida da energia dissipada por atrito nas aplicações de engenharia talvez explique a preocupação constante com a força ou com o coeficiente de atrito e não com o conceito ou fenômeno do atrito (CAMPANHA, 2007).

A norma ASTM Standard apresenta definições relativas à terminologia padrão para erosão e desgaste. Ela define como força de atrito (F_{at}) a força tangencial resistente na interface entre dois corpos, quando sob ação de uma força externa, um corpo move-se ou tende a mover-se em relação ao outro. O Coeficiente de atrito é definido como a razão da força resistente ao movimento tangencial (F) entre dois corpos em relação a força normal (F_N) pressionando esses corpos um contra o outro, e é normalmente designada por μ . A Equação 1 relaciona estes termos

$$F_{at} = \mu \cdot F_N \quad (1)$$

A Figura 2 mostra um esquema de como as forças citadas atuam em um corpo qualquer. A força (F_g) mostrada nesta figura é a força da ação gravitacional atuante sobre o corpo mostrado.

Em muitos casos é necessária uma força maior para tirar o corpo da inércia do que para mantê-lo em movimento. Ou seja, o coeficiente de atrito estático (μ_s) é geralmente um pouco superior ao coeficiente de atrito dinâmico ou cinético (μ_k).

As definições acima são apenas referentes ao atrito deslizante e sem a presença de lubrificação. Portanto são leis genéricas, não aplicadas a todas as situações.

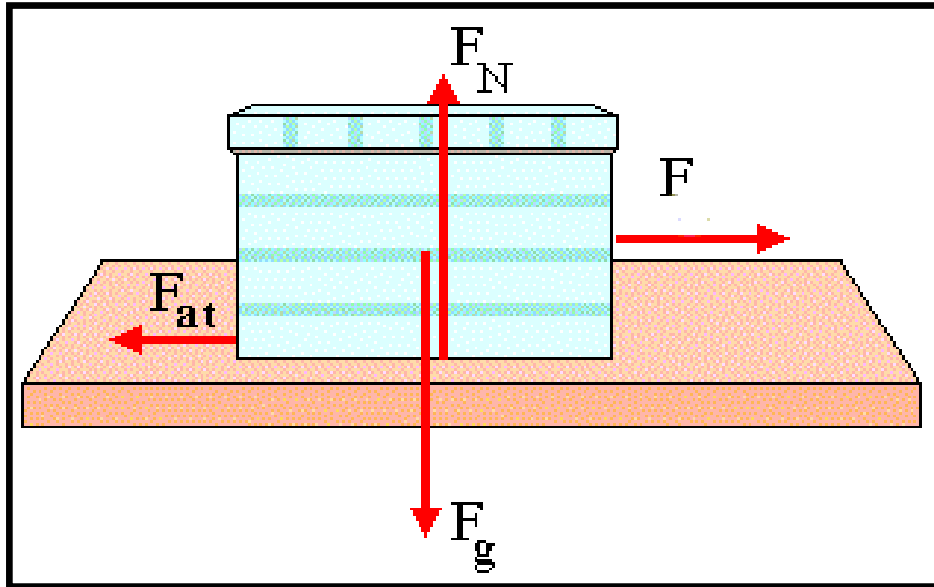


Figura 2 - Representação esquemática de forças sobre um corpo qualquer
 Fonte: www.geocities.ws (2013).

CAMPANHA (2007) cita que uma nova definição de atrito e suas componentes foi delineada por pesquisadores, presente na Equação 2.

$$\mu = \mu_a + \mu_p + \mu_e + \mu_{part} \quad (2)$$

Onde:

- μ_a se deve à adesão entre as superfícies. É muito importante em aplicações de vácuo e para superfícies extremamente limpas. Sob condições normais, a adesão provavelmente influencia pouco no atrito, exceto indiretamente no efeito da deformação plástica.

- μ_p é a deformação plástica causada pela diferença de dureza das asperezas de uma superfície sobre a outra. O resultado é a formação de canais permanentes na superfície do material mais mole.

- μ_e é a contribuição devido a deformação elástica do material abaixo das regiões plasticamente deformadas. Torna-se mais importante quando as superfícies estão em trabalho depois do período de amaciamento.

- μ_{part} se deve às partículas denominadas terceiros corpos que permanecem entre as superfícies. Aparece após uma certa distância do deslizamento e são geralmente aglomerações de pequenas partículas.

Portanto os mecanismos microscópicos que estão envolvidos nos diversos níveis de atrito são: adesão, interações mecânicas pela aspereza da superfície, sulcamento de uma superfície devido às asperezas da outra, deformação e/ou fratura das camadas superficiais, tais como óxidos, e interferência e deformação plástica causadas por terceiros corpos, basicamente devido a um aglomerado de partículas oriundas do desgaste que se interpõem entre as superfícies em movimento (HUTCHINGS, 1992).

2.1.3 O atrito de rolamento

Sabe-se pela prática, desde tempos remotos, que rolar objetos é mais fácil do que empurrar. A resistência ao rolamento é chamada de atrito de rolamento e normalmente é extremamente baixa. Seu princípio é muito aplicado em rodas e em mancais de rolamentos, que não serão abordados diretamente neste trabalho.

2.2 O DESGASTE

O desgaste ocorre quando duas superfícies se movimentarem uma em relação à outra. O desgaste pode ser definido como a perda progressiva de substância da superfície de um corpo sólido, líquido ou gasoso (DETTOGNI, 2010).

HUTCHINGS (1992) define desgaste como sendo “a destruição de uma ou de ambas superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material”.

MACHADO e SILVA (2004), no seu livro sobre usinagem, citam que o desgaste ao contrário da avaria, ocorre de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas, às vezes a nível atômico, às vezes a nível granular ou

granulares. Pode ocorrer segundo vários mecanismos, e a deformação plástica pode fazer parte dos mesmos. Neste processo a temperatura tem um papel decisivo e atinge ferramentas de corte de qualquer material.

A ação na superfície de um corpo sólido por contato e movimento relativo de outro corpo sólido, líquido ou gasoso é denominada ação tribológica. O desgaste resulta em pequenas partículas soltas (partículas de desgaste), e em modificações no material e na geometria da camada de superfície solicitada tribologicamente. Normalmente o desgaste é bastante prejudicial. Mas em alguns casos ele é desejável, como por exemplo, nas operações de lixamento e de polimento.

Uma das formas de se evitar o desgaste é utilizar lubrificantes. Ainda assim, mesmo que um lubrificante não seja adicionado ao sistema utilizado, componentes da atmosfera (especialmente oxigênio e vapor de água) têm importante efeito e precisam ser considerados em qualquer estudo da interação entre superfícies. A importância econômica da tribologia e grande necessidade por uma pesquisa sistemática e aprimoramento da transferência do conhecimento para a prática está sendo reconhecida nas últimas décadas (DETTOGNI, 2010).

Estudos realizados pela ASME nos Estados Unidos apontaram uma perda econômica de 1% a 2,5% do produto interno bruto devido ao desgaste. Na Alemanha, pesquisas da década de 80 revelaram que desgaste e corrosão juntas contribuem com a perda de 4,5% do produto interno bruto (ZUM GAHR, 1987).

Torna-se interessante portanto investigar para tentar reduzir os prejuízos econômicos com o desgaste. Segundo DETTOGNI (2010) é possível para tal buscar uma otimização do processo, redesenho do projeto, produção, montagem e aplicação. O projeto pode efetivamente reduzir o desgaste do componente ao otimizar a transferência de carga e movimento, permitindo apenas baixa tensão, usando material apropriado e lubrificante em função da carga, temperatura e ambiente. O grau de precisão da forma, tamanho e perfil da superfície e rugosidade exerce influência sobre o atrito e o desgaste. Os principais fatores de desgaste são variáveis metalúrgicas como dureza, tenacidade, composição química, constituição e microestrutura, e variáveis do processo como materiais em contato, pressão, velocidade, temperatura e acabamento superficial. Além de outros fatores como lubrificação e corrosão.

DETTOGNI (2010) também cita que para metais puros a resistência ao desgaste aumenta linearmente com a dureza. Já para ligas a relação entre

resistência ao desgaste e dureza não é tão simples, e varia conforme a microestrutura do material. Muitos outros fatores influenciam a taxa de desgaste. O tamanho da partícula abrasiva e o coeficiente de atrito são exemplos, tornando assim o estudo dos fenômenos de desgaste bastante complexos. Estes, além de envolver a deformação e corte superficial por partículas abrasivas, ou atrito entre superfícies metálicas, muitas vezes ocorre devido a vários mecanismos concomitantes de desgaste da superfície, os quais podem também estar associados a outros fenômenos de degradação como impacto, corrosão ou fadiga. Na especificação e normalização de ligas para resistir ao desgaste, as maiores dificuldades residem na inexistência de ensaios padronizados para discriminar os níveis de aceitação ou rejeição, conforme as aplicações particulares. Para maior facilidade de análise e prevenção procura-se geralmente identificar os mecanismos predominantes de remoção de material.

2.2.1 Mecanismo de desgaste

Os processos de desgaste podem ser classificados como desgaste por deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e desgaste erosivo, dependendo da cinemática do sistema. Quanto aos elementos interfaciais podem ser classificados como a seco (junção) ou lubrificado, ou desgaste a dois corpos ou três corpos (GONÇALVES, 2013). A Figura 3 mostra um resumo dos possíveis processos de desgaste.

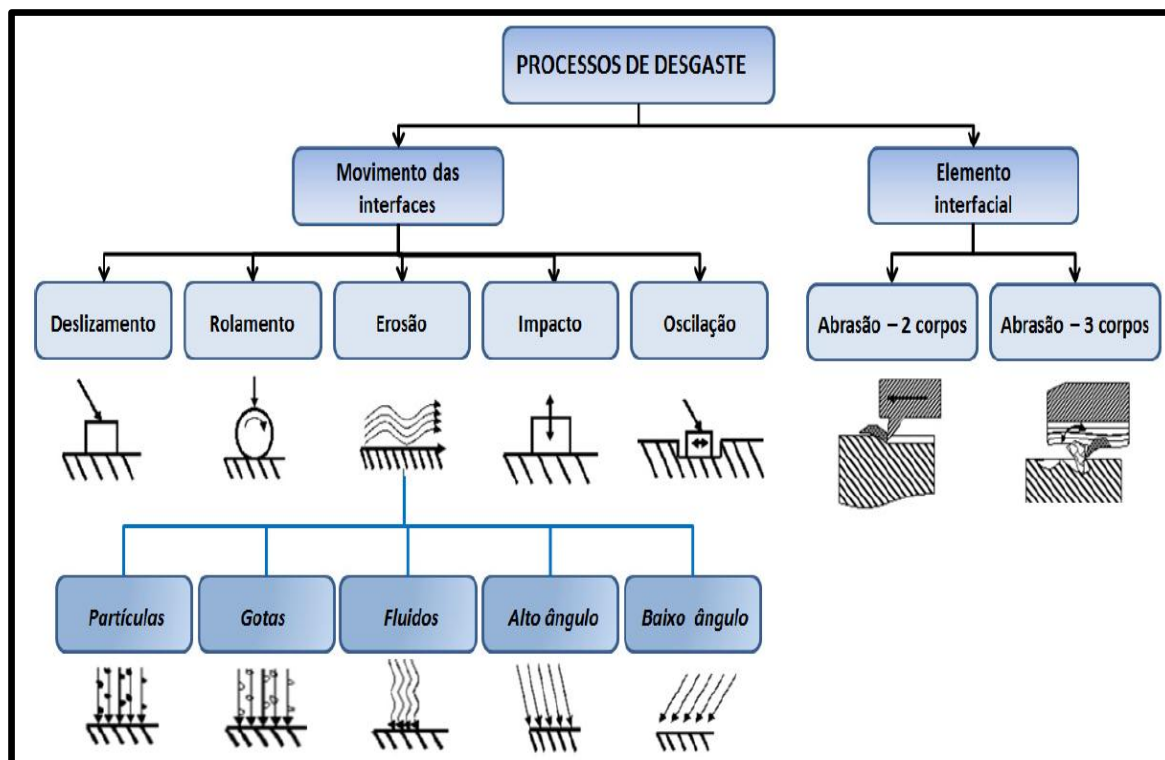


Figura 3 – Diagrama dos tipos de desgaste em função do elemento interfacial e do tipo de movimento das interfaces

Fonte: Adaptado de GONÇALVES, 2013.

O desgaste a três corpos é caracterizado pela presença de partículas sólidas pressionadas entre duas superfícies como, por exemplo, poeira em lubrificantes ou minerais em rochas sob pressão (RADI et al., 2007). O desgaste a dois corpos se produz quando partículas abrasivas fixas são animadas de movimento relativo em relação à superfície em estudo.

São quatro mecanismos básicos envolvidos nos processos de desgaste: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica (GONÇALVES, 2013). A Figura 4 mostra um desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste.

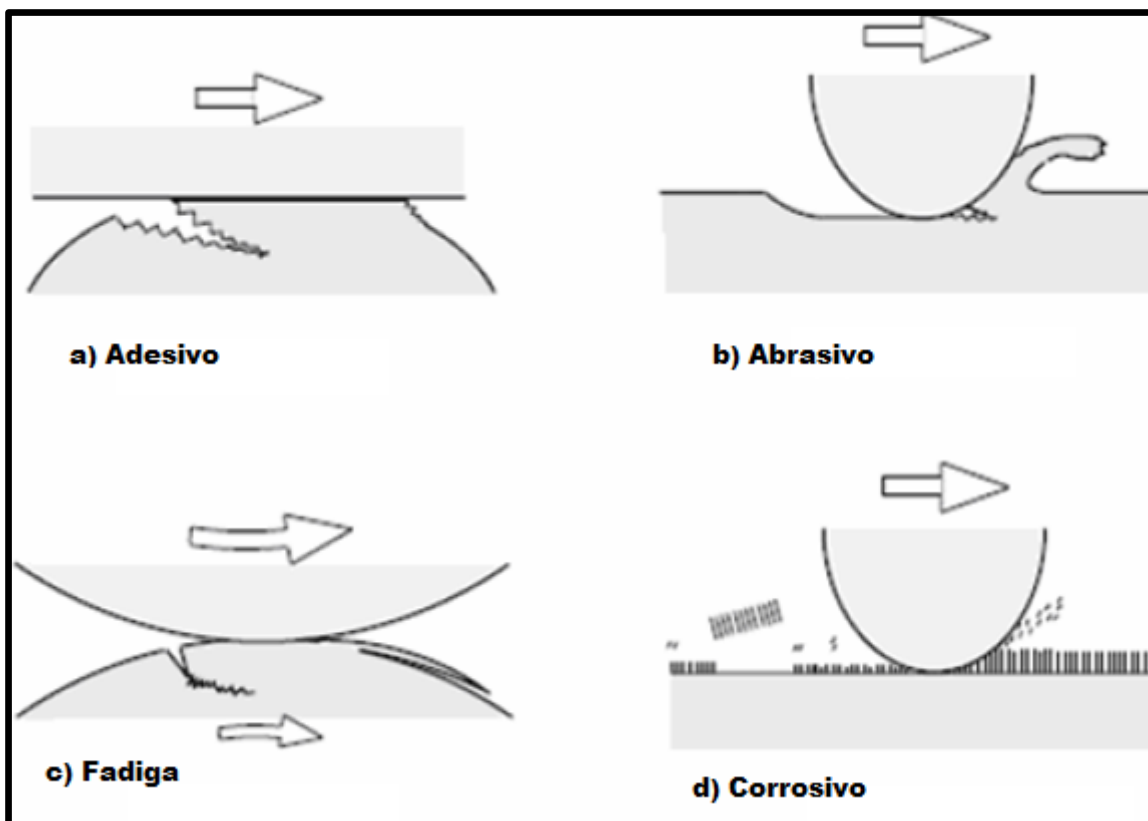


Figura 4 – Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste
Fonte: RADl et al., 2007.

O desgaste adesivo ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar levando a geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material.

No desgaste abrasivo ocorre remoção de material da superfície. Esse desgaste ocorre em função do formato e da dureza dos dois materiais em contato. Quando o desgaste é ocasionado pelo alto número de repetições do movimento ele é chamado por fadiga.

O desgaste corrosivo ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos. Neste tipo de desgaste são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida.

Estima-se que na grande maioria, os problemas industriais de desgaste estão associados ao desgaste por abrasão. Entre os fatores que interferem no desgaste por abrasão podemos citar: tamanho da partícula abrasivas (grossas, finas,

médias); formato da partícula (angulares, redondas); dureza da partícula; dureza do metal base; acabamento do metal base, velocidade e frequência do contato entre a partícula e o metal base; tamanho do grão da estrutura do metal base; ângulo de incidência da partícula do metal base (DETTOGNI, 2010).

O pesquisador deve sempre ter em mente o tipo de aplicação do material que ele deseja testar para que possa simular as mesmas condições de velocidade, de movimento e carga.

2.3 LUBRIFICAÇÃO

Lubrificar é interpor uma película de fluido adequado entre superfícies que mantenham entre si um movimento relativo, de modo que o mesmo se realize com um mínimo de aquecimento, ruído e desgaste.

Desde tempos remotos o homem já utilizava processos de diminuição de atrito, sem conhecer estes princípios, como hoje são conhecidos por lubrificação. Em uma tumba egípcia, encontrou-se o que parece ser o primeiro registro pictórico de um tribologista em ação (Figura 5). Os egípcios usavam trenós para transportar uma pesada estátua. Sobre o pé da estátua pode ser visto um homem jogando líquido no caminho para reduzir o atrito e possibilitar o transporte da estátua.

A lubrificação é aplicada em várias máquinas, mecanismos e sistemas, com o objetivo de reduzir o atrito, como por exemplo, mancais de deslizamento e de rolamento, engrenagens, redutores, motores e máquinas-ferramenta, todos processos onde existe o movimento relativo entre superfícies e, portanto, o atrito e desgaste.

O lubrificante pode ter outras funções além reduzir o atrito e desgaste. Entre elas pode-se citar: proteção contra corrosão; vedação; transferência de calor; transmissão de força; retirada de produtos indesejáveis e refrigeração. Quanto aos tipos os lubrificantes podem ser divididos em gasosos, líquidos, semissólidos e sólidos. Os óleos lubrificantes são classificados basicamente em quatro categorias: minerais, vegetais, animais e sintéticos.

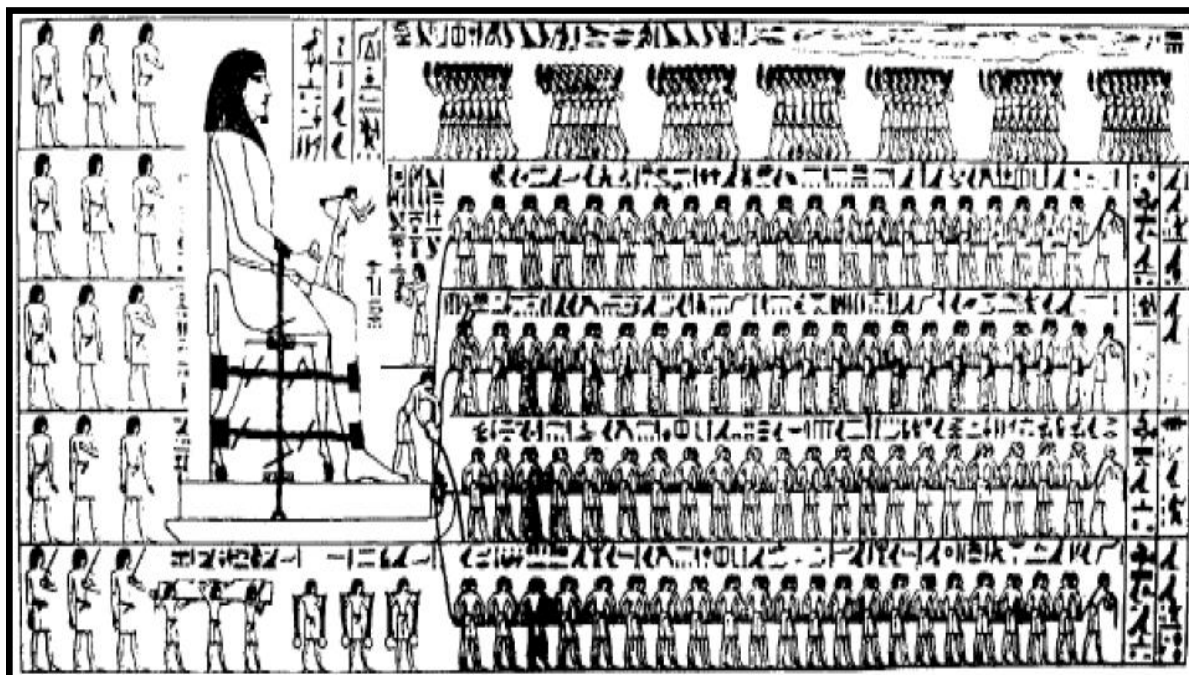


Figura 5 – Pintura rupestre demonstrando a aspersão de água para a redução de atrito no Egito 2400 AC
 Fonte: RADI et al., 2007.

Antes de serem colocados à venda pelos fabricantes, os óleos lubrificantes são submetidos a ensaios. Estes ensaios procuram estabelecer a característica dos óleos, buscar melhorias em suas propriedades e avaliar seu desempenho para determinada função. Entre esses ensaios, pode-se citar: viscosidade; índice de viscosidade, densidade relativa, ponto de fulgor, dentre outros.

Um dos processos mais utilizados na manufatura em geral é a usinagem. O uso de fluidos de corte neste processo é comum, devido à melhora nas condições tribológicas. O emprego de fluido de corte aumenta a vida da ferramenta, minimiza a geração de calor durante o processo, auxilia na remoção dos cavacos e geralmente melhora a eficiência do sistema produtivo. Em contrapartida, devido à multiplicidade de efeitos negativos pela utilização de fluidos de corte, tais como danos ao meio ambiente e à saúde do operador, especial atenção está sendo dada à seleção desses fluidos de corte, por garantir menores impactos ao meio ambiente. As restrições resultantes da legislação não conduzem apenas às limitações e dificuldades com processos de manufatura e a um acréscimo indesejável dos custos a eles associado, mas também força o desenvolvimento de novas tecnologias e de alternativas ao seu emprego. Isto representa um novo desafio tecnológico aos

cientistas e engenheiros e aumenta a importância da manufatura ecológica como fator competitivo (OLIVEIRA e SALES, 2007).

Em se tratando de sistemas de manufatura, qualquer tentativa de aumentar a produtividade e/ou reduzir custos deve ser considerada. Na usinagem, o uso de fluidos de corte é uma opção, e quando ele é escolhido e aplicado apropriadamente, traz benefícios. A escolha apropriada de um fluido de corte deve recair naquele que possui composição química e propriedades corretas, para atacar diversidades de um processo de corte específico. Nos últimos tempos, grandes avanços tecnológicos foram obtidos, tanto nos materiais, como nas máquinas-ferramentas. Isto fez com que a demanda dos fluidos de corte crescesse consideravelmente. Alta demanda causa competitividade, que por sua vez, causa aumento da qualidade dos produtos. Outro fator que também influi no aumento da qualidade dos fluidos de corte dos dias de hoje é a pressão exercida por Agência de Proteção Ambiental e Agência de Saúde, para que os produtos sejam comercializados com mais segurança e que causem menos danos ao meio ambiente. O sucesso dos fluidos de corte nos dias atuais deve-se também a avanços conseguidos no processo de fabricação dos fluidos, mas muito mais pelo desenvolvimento de novos aditivos. Com isto, os fluidos de corte atuais apresentam melhores propriedades refrigerantes, melhores propriedades lubrificantes, apresentam menos perigo ao operador e duram consideravelmente mais, com menos problemas de armazenagem do que os fluidos de corte de gerações passadas (MACHADO e DA SILVA, 2004).

Os ensaios tribológicos são alternativas iniciais no processo de teste, seleção e desenvolvimento de fluidos de corte. Os fluidos de corte são exemplos típicos de sistemas tribomecânicos (GONÇALVES, 2013). Para os sistemas tribomecânicos a lubrificação é dividida em cinco áreas de estudo, que são:

- Hidrodinâmica - quando a força de sustentação, no filme lubrificante, é gerada pelo movimento relativo entre as superfícies;
- Elastohidrodinâmica - a lubrificação ocorre na presença de contato de rolamento entre as partes;
- Limite - quando a espessura do filme lubrificante é na ordem molecular
- Sólida - ocorre comumente em casos onde não há um filme lubrificante fluido separando as superfícies, promovendo um coeficiente de atrito constante;

- Hidrostática.

A lubrificação correta afeta diretamente no consumo de energia e na preservação de recursos naturais. A lubrificação está associada a fatores como custos, segurança, produtividade e qualidade. Portanto uma lubrificação correta na indústria significa competitividade (Figura 6).

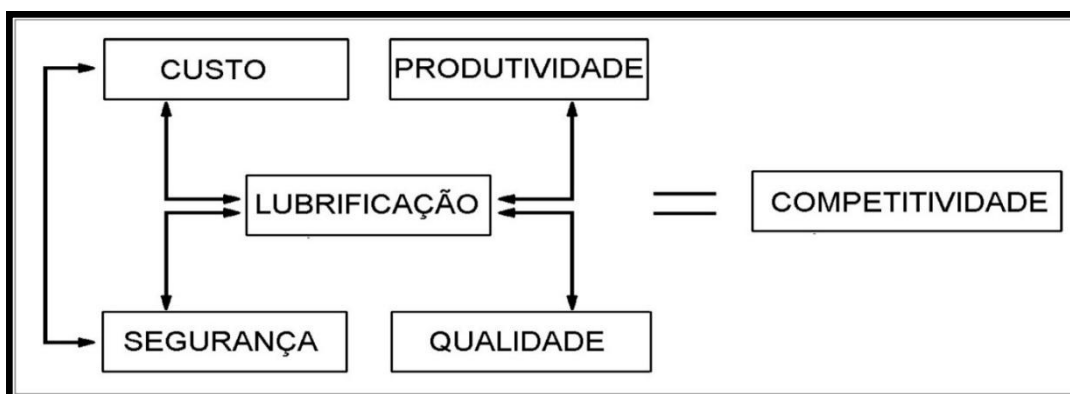


Figura 6 – Lubrificação e competitividade

Fonte: <http://pessoal.utfpr.edu.br/mariano/arquivos/32%20lubrifica2.pdf>

2.4 TRIBOLOGIA

O atrito e desgaste são causadas por conjuntos complicados de interações microscópicas entre as superfícies que estão em contato mecânico e em movimento relativo. Estas interações são o resultado dos materiais, das características geométricas e topográficas das superfícies, e as condições gerais em que as superfícies são feitas para deslizar uma contra a outra, por exemplo, carga, temperatura, atmosfera, do tipo de contato. Toda mecânica, física, aspectos geométricos da superfície de contato e química da atmosfera circundante afetam as interações de superfície e, assim, também as características tribológicas do sistema. Portanto, o atrito e o desgaste não são simplesmente os parâmetros dos materiais disponíveis nos manuais; eles são características únicas do sistema tribológico em que são medidos (BHUSHAN, 2001).

Para a maioria das superfícies em deslizamento relativo ou contato de rolamento, a área de contato real é muito menor do que a área nominal de contato. A carga aplicada é realizada por uma série de pequenas asperezas locais que compõem a área de contato real, e o comportamento do atrito e desgaste resulta das interações entre estas asperezas de contato locais. Nas regiões desses contatos locais, as condições são caracterizadas por altas pressões e tensões de cisalhamento, muitas vezes bem acima do limite de elasticidade dos materiais, altas temperaturas locais e talvez também altos graus de deformação e de alta taxas de cisalhamento. Sob tais condições, as propriedades mecânicas locais dos materiais pode ser muito diferente do que é encontrado, por exemplo, em testes de tensão normal. A importância das camadas de óxido, de pequenas quantidades de contaminantes e as transformações de fase locais são também muito maiores do que no teste mecânico de grande escala (tradicional). As propriedades de um material nas áreas de contato reais podem ser medidas a partir daqueles medidos em procedimentos normais de teste mecânico. Mas a relação entre o desgaste e fricção, e propriedades mecânicas tradicionais, tais como o módulo de elasticidade e tensão de escoamento, é fraca (ZUM GAHR, 1987 e HUTCHINGS 1992).

Decorre também que aspectos do sistema de atrito e desgaste, dada a complexidade do contato superficial que consiste em interagir asperezas locais, são de difícil modelagem. Infelizmente, há muito poucos modelos confiáveis e abrangentes sobre o fenômeno do atrito e do desgaste. Esta falta de modelos adequados complica fortemente a interpretação entre desgaste medido e atrito. Não existe também nenhuma correlação simples entre desgaste e atrito, por exemplo, baixo atrito não implica automaticamente baixas taxas de desgaste (BHUSHAN, 2001). Ainda assim, o efeito dos parâmetros do sistema sobre as propriedades tribológicas não deve ser exagerada. Muitos materiais apresentam baixo atrito e alta resistência ao desgaste em situações práticas, e podem ser definidos como materiais de baixo atrito ou materiais resistentes ao desgaste. Diamante e Teflon (PTFE) produzem baixo atrito na maioria dos sistemas, mas exceções podem ser encontradas. Carbonetos cimentados são materiais resistentes ao desgaste, mas eles podem se desgastar rapidamente em ambientes corrosivos. Portanto, por causa da natureza do sistema de parâmetros tribológicos, os valores de atrito e desgaste para quaisquer materiais só tem sentido se as condições de teste forem rigorosamente controladas e medidas. Por conclusão, como as propriedades

tribológicas não são diretamente relacionáveis às propriedades dos materiais, mas sim parâmetros do sistema, o teste tribológico deve ser parte integrante no desenvolvimento de materiais e na seleção de materiais para aplicações que envolvam atrito e desgaste.

Para determinada condição de operação o atrito pode ser classificado quando aos tipos principais (adesivo, abrasivo, fadiga superficial ou, triboquímico). No entanto, nem todos os tipos de falhas tribológicas são devido ao desgaste no sentido de uma remoção contínua de material, e as propriedades tribológicas dos materiais em um componente não são sempre melhor descritas por sua resistência ao desgaste ou propriedades de atrito. Um estudo amplo dos vários tipos de danos superficiais que ocorrem pode ser mais significativo.

Se por exemplo, a lubrificação de um sistema de êmbolo e cilindro falhar, o resultado será, em geral, um aumento da temperatura que conduz ao amolecimento ou fusão do material, mesmo nas asperezas de superfície, seguido de um aumento da aderência, transferência de material entre o pistão e a superfície do cilindro, fazendo o motor travar. Como outro exemplo, o desempenho de uma ferramenta de corte pode não ter relação com o desgaste contínuo das arestas de corte. Mas pode ser resultado de eventos repentinos tais como a expulsão dos grãos abrasivos de um rebolo, fraturas de ponta, ou súbito superaquecimento causando deformação plástica local, que podem levar a mudança da geometria da aresta de corte, seguido por perda de tolerâncias, aumento das forças de corte e acabamento superficial inaceitável. Em ambos os exemplos, a taxa de desgaste real pode ser muito baixa e, talvez, de nenhuma importância para ocorrência da falha. Mas ainda assim o efeito dos eventos sobre o desempenho do tribosistema é dramático (BHUSHAN, 2001).

Muitas vezes o processo de desgaste passará por várias etapas, como produto do movimento relativo. O desgaste começa com o que pode ser chamado de acomodação ao sistema tribológico envolvido e pode ser associado ao regime transiente, havendo inicialmente desgaste acelerado, passando então a apresentar uma taxa de desgaste cada vez menor com o tempo. Essa etapa de desgaste acelerado no entanto é curta quando comparada a todo o tempo de vida do componente. Ao final deste estágio, uma inflexão é observada na curva do gráfico da Figura 7 que apresenta as três fases do desgaste.

O estágio dois se caracteriza por uma taxa de desgaste constante ao longo do tempo (a reta tangente à curva apresenta ângulo de inclinação constante), e pode

ser associado à etapa de regime permanente ou estado estacionário. Durante esta fase, as superfícies em contato estão em conformidade, de tal maneira que a carga é distribuída de modo mais favorável sobre as superfícies. O estado estacionário com baixas taxas de desgaste e valores de atrito estável acabará por alterar as folgas ou as propriedades da superfície levando as primeiras falhas. Por final, o estágio catastrófico em que as taxas de desgaste são elevadas e graves danos de superfície ocorrem.

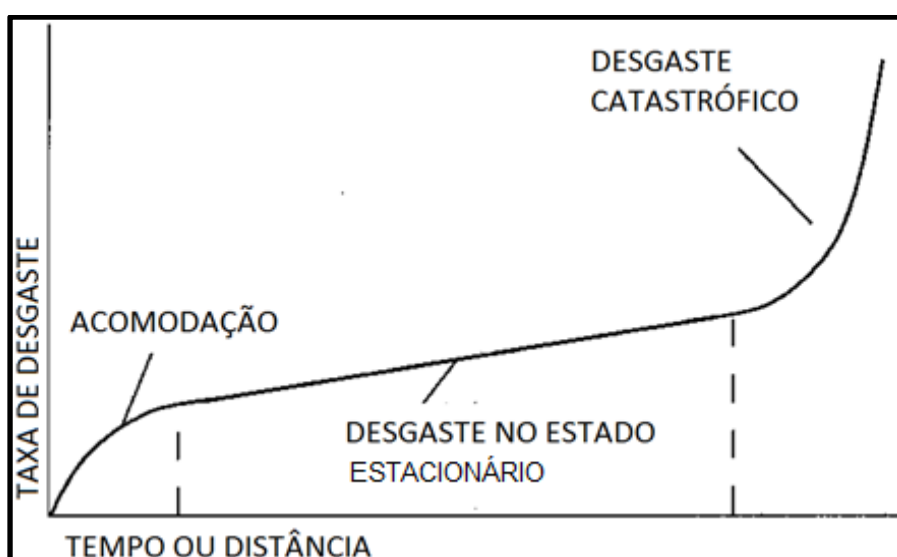


Figura 7 – Estágios de desgaste típicos que aparecem ao longo do tempo de serviço em contatos deslizantes
 Fonte: Adaptado de BHUSHAN, 2001.

Somente as taxas de desgaste ou forças de atrito medidos durante as condições de estágio estacionário estáveis são úteis na caracterização das propriedades de longo prazo do sistema. Danos a um componente com defeito que ocorreram apenas um pouco antes da falha, não são características do desgaste contínuo dos materiais e, portanto, não pode explicar a série de eventos que levaram ao fracasso. Identificar as fases no qual os danos superficiais de um componente apareceram, e qual sua importância para o desempenho global do componente, é uma das partes mais difíceis de analisar na falha de componentes tribológicos, e provavelmente o ponto onde muitas análises dão errado. Prever o aparecimento de regimes de desgaste graves é um desafio (BHUSHAN, 2001). Uma

tentativa de organizar todos os tipos de danos superficiais é descrita por BHUSHAN, 2001, e mostrado na Figura 8.

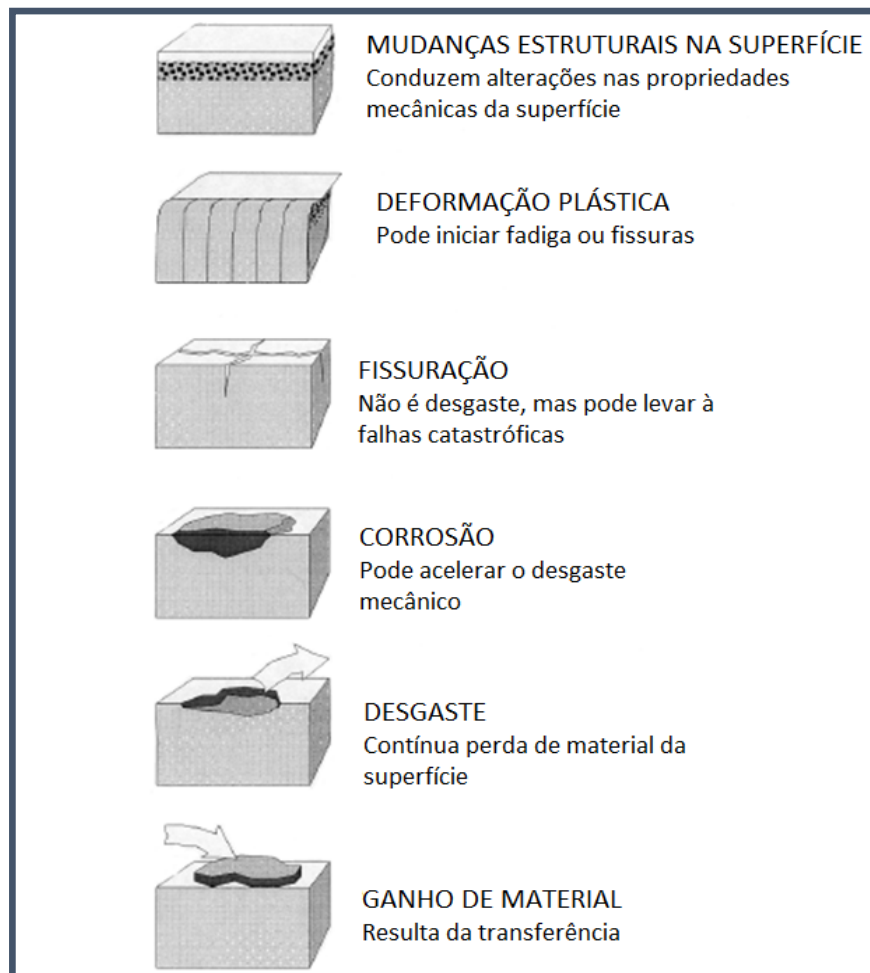


Figura 8 – Classificação dos danos superficiais e desgaste
Fonte: Adaptado de BHUSHAN, 2001.

- Mudanças estruturais na superfície são, por exemplo, transformações de fase, formação de zonas de difusão ou recristalização. Estas alterações da superfície podem ocorrer apenas por causa da deformação mecânica da superfície, ou seja, resultando na geração de calor, provocando a difusão ou reações químicas. Alterações da estrutura da superfície não implica necessariamente no desgaste, mas podem alterar as propriedades mecânicas das camadas superficiais

exteriores, e podem constituir as fases iniciais de desgaste ou outros tipos de falhas.

- A deformação plástica, causada por esforços mecânicos ou por gradientes térmicos na superfície. A deformação plástica de asperezas da superfície, ou de uma zona de superfície inteira, não precisa necessariamente ser associada ao desgaste gradual, mas é de extrema importância para a criação de quaisquer danos na superfície que podem, eventualmente, levar a falhas catastróficas.
- Fissuração na zona de superfície podem ser geradas por tensões exageradas, deformações cíclicas de fadiga, ou alterações térmicas repetidas. A fissuração pode também ser um mecanismo inicial que eventualmente conduz a danos em grande escala, sem causar qualquer dano progressivo durante a fase de serviço.
- Corrosão ou outros ataques químicos podem representar o mecanismo de desgaste principal, mais é mais frequente que apenas ajudem nos processos de desgaste mecânico. Frequentemente, ataques químicos são a causa de acabamento superficial perdido e propagação de trincas de forma acelerada.
- Desgaste ou danos na superfície que envolvem a perda de material contínuo devido a vários mecanismos de remoção de materiais microscópicos, deixando o material na forma de detritos. Os mecanismos de desgaste podem ser mecânicos ou químicos.
- Ganhos de materiais da superfície resultando de um aquecimento excessivo das superfícies e da aglomeração de detritos. As camadas resultantes do terceiro corpo são típicas de deslizamento em contatos conformes.

Muito comumente, o dano observado em uma superfície tribologicamente carregada é resultado de dois ou mais tipos de danos superficiais. A interação de tipos de danos pode levar a altas taxas de desgaste, como por exemplo a oxidação superficial em rachaduras. No entanto, o desgaste adesivo pode também ser suprimido pela oxidação (BHUSHAN, 2001).

Na seleção e concepção de sistemas de testes tribológicos e escolha dos parâmetros de teste, deve-se tomar grande cuidado na consideração se as taxas de desgaste medidos, ou forças de atrito, são os melhores parâmetros de caracterização do sistema. Talvez o estudo deve incidir sobre os tipos de danos na superfície. Geralmente uma combinação das duas é mais compensadora. Da mesma forma, é importante considerar que fases do ciclo de vida de uma superfície tribológica um teste deve avaliar - as taxas de desgaste ou mecanismos de desgaste durante as condições de estado estacionário ou danos superficiais responsáveis pela falha. Em muitos casos microscopia ou outras técnicas de caracterização de superfícies podem ser mais importantes do que as taxas de desgaste e o atrito medidos. Um teste tribológico selecionado sempre tem que produzir o tipo específico de mecanismos de desgaste ou danos superficiais que aparecem na aplicação pretendida (BHUSHAN, 2001).

2.5 CONTATOS MECÂNICOS

Existem distintas maneiras de contato entre dois corpos sólidos. Segundo CAMPANHA (2008), os contatos podem ser conformes ou não conformes. Um contato é dito conforme quando as superfícies dos dois corpos encaixam-se perfeitamente com pouca ou nenhuma deformação. Mancais de deslizamento e guias lineares são exemplos de contatos conformes. Corpos que apresentam perfis de superfícies diferenciados são ditos não conformes. Quando tais superfícies são colocadas em contato, num primeiro instante, não tendo deformação das superfícies, tem-se um contato pontual ou linear. Como exemplo pode-se citar um rolamento fixo de carreiras de esferas que apresentam contato pontual quando as esferas tocam as pistas de rolagem. Contatos lineares são obtidos quando o perfil das superfícies é conforme em uma direção e não-conforme na direção perpendicular à anterior. A área de contato entre corpos não-conformes é normalmente pequena se comparada com as dimensões dos corpos envolvidos. As tensões envolvidas são fortemente concentradas na região próxima à zona de contato. A Figura 9 representa os tipos de contatos conformes e não-conformes.

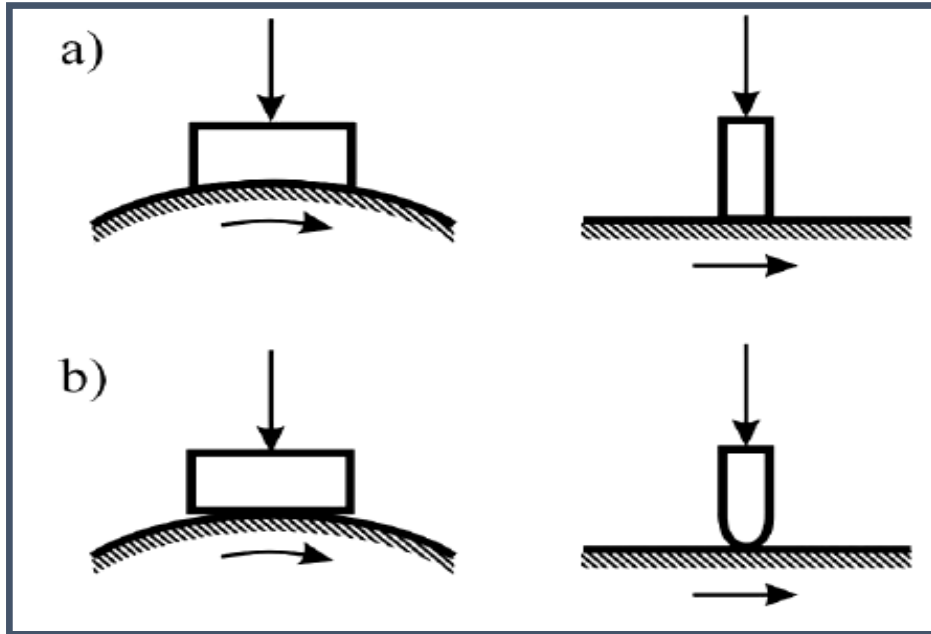


Figura 9 – Contatos conformes (a) e contatos não conformes (b)
Fonte: CAMPANHA (2008).

Portanto, em um contato conforme as superfícies se encaixam de tal forma que existe uma área de contato aparente facilmente mensurável. Diferentemente, em um contato não-conforme as superfícies tocam-se em apenas um ponto ou linha. Em ensaios de desgaste a área nominal de pelo menos uma das superfícies aumenta, devido ao efeito da deformação. Havendo desgaste, o contato não conforme pode passar a ser conforme.

2.6 O PARÂMETRO PRESSÃO x VELOCIDADE ($P \times V$)

BALOTIM (2010) cita que três variáveis principais influenciam no desempenho de materiais de atrito, sendo elas: pressão de contato, velocidade de escorregamento e temperatura.

A temperatura é a variável resultante da aplicação das outras duas variáveis de desempenho, mas sua relação com o atrito não é totalmente conhecida. Ela exerce no entanto papel fundamental, pois todos os fenômenos tribológicos que ocorrem na região de contato são principalmente guiados por essa variável.

O parâmetro Pressão x Velocidade ($P \times V$), representa o grau de severidade dos esforços na região de contato. Essa condição limita a utilização dos materiais, de acordo com a condição $P \times V$ limite de um dado material em um sistema específico, como, por exemplo, mancais de deslizamento. É interessante simular uma ampla faixa de condições $P \times V$.

Segundo BALOTIN (2010), a velocidade de escorregamento do tribômetro, considerando a rotação de entrada previamente determinada, pode ser calculada através da equação 3.

$$V = \frac{2\pi N r_e}{60} \quad (3)$$

Em que V representa a velocidade de escorregamento (m/s), r_e representa o raio efetivo (m) e N representa a rotação fornecida pelo tribômetro (rpm).

2.7 CLASSIFICAÇÃO DE TRIBÔMETROS

Testes tribológicos podem ser realizados em um número quase infinito de maneiras. Como o resultado de um teste tribológico não está relacionado só com as características do par de materiais testados, mas também de todo o sistema mecânico e do seu ambiente, o processo de seleção do teste mais apropriado para uma finalidade específica é fundamental para fazer interpretações significativas. É crucial planejar o teste tribológico detalhadamente, como será descrito a seguir.

Uma classificação dos testes tribológicos facilita o planejamento do teste tribológico. É conveniente classificar os métodos de ensaios tribológicos de acordo com o seu grau de realismo, ou seja, o quão próximo eles imitam as condições de uma aplicação real. Geralmente um grande grau de realismo é interessante, entretanto há muitas razões para avaliar materiais em testes que não estão associados diretamente a qualquer aplicação. Considere, por exemplo, fatores como custo, tempo de teste, controle preciso das condições de teste, desejo de realizar um estudo científico e mecanismos de desgaste individuais. Para tais avaliações, claramente a simulação de uma aplicação não tem a prioridade mais alta.

Uma das maneiras mais aceitas de classificação de testes tribológicos são encontradas na norma DIN 50 322 (padrões industriais alemães), ou ZUM GAHR (1987). São identificados cinco níveis de testes simples, além de testes de campo de todo o sistema (Figura 10). Se por exemplo as características de desgaste do sistema de êmbolo e cilindro de um motor de carro estão sendo investigadas, um teste de campo irá incluir todo o veículo, e este teste será conduzido em condições de serviço realistas. No entanto, todo o veículo pode também ser avaliado em um teste de bancada. E para melhorar o grau de controle das condições do ensaio, ser realizado em um laboratório ou ambiente controlado. Servindo o propósito de reduzir o custo, apenas o subsistema importante (que é ainda um sistema real e não um modelo), o motor, neste exemplo, pode ser testado sob condições controladas de laboratório. Para simplificar ainda mais, apenas os componentes importantes da máquina podem ser avaliados em um teste de componente. Embora um teste de componente bem planejado pode parecer à primeira vista semelhante a qualquer teste de bancada ou de campo, as alterações em diferentes ambientes podem afetar de forma significativa as condições de teste. A dissipação de calor, vibrações, condições de lubrificação, dentre outros, não serão totalmente idênticos no teste de bancada ou de campo. Para aumentar ainda mais a eficiência e o grau de controle sobre as condições de ensaio, um ensaio do componente simplificado ou um teste modelo completo pode ser explorado. Com um teste modelo simples, pode ser fácil, rápido e barato de avaliar uma série de materiais em condições de teste bem controladas. No entanto, o grau de realismo como características de danos superficiais, e também a possibilidade de fazer conclusões confiáveis sobre o desempenho ou usabilidade de um aplicativo, diminui quando se migra do teste de campo para o teste de modelo mais simples.

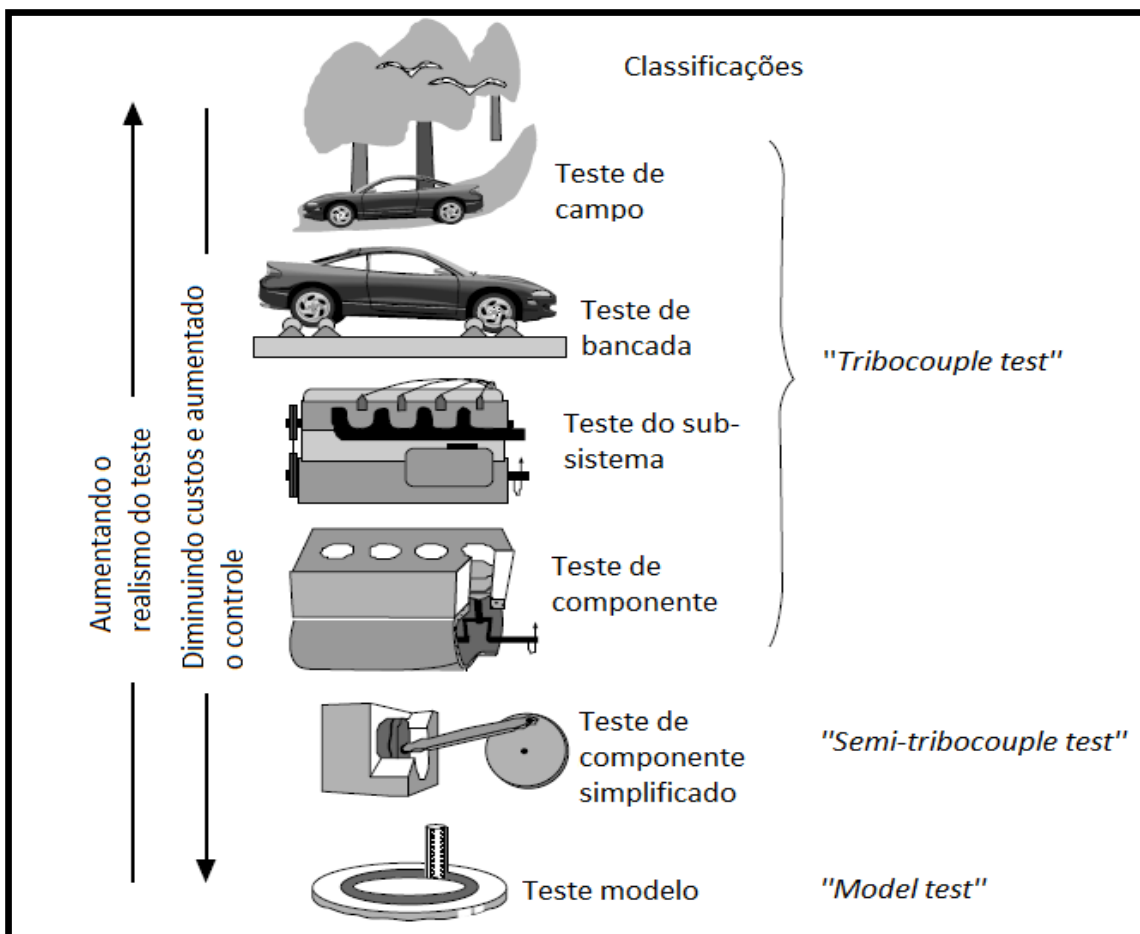


Figura 10 – Classificação de tribômetros de acordo com o grau de realismo
 Fonte: Adaptado de BHUSHAN, 2001.

Qualquer teste de modelo pode ser classificado de acordo com as características do tribosistema, como ilustrado na Figura 10. Esta classificação se origina do desejo frequente para avaliar novos materiais ou novos projetos para um ou dois componentes em máquinas já existentes. Devido a fatores como custo e tempo, as avaliações devem ser realizadas em algum tipo de equipamento de teste simplista. Os componentes são reais, mas o resto do tribosistema tem que ser simulado. Em tais situações, podem-se distinguir entre os testes com “tribocouples” completos, envolvendo assim os componentes reais em ambas as superfícies de deslizamento, ou ensaios “semi-tribocouple”, em que apenas uma das superfícies representa um componente real. Em um teste de modelo puro, ambas as superfícies são substituídas por componentes simulados. Se uma superfície segue continuamente a mesma faixa do contra corpo, o sistema é fechado, enquanto que a pista de superfície é continuamente renovada em um sistema aberto (aberto ou

fechado pode também referir-se a sistemas com partículas de óleo frescas ou recicladas). Pode também distinguir-se entre testes envolvendo deslizamento unidirecional ou recíproco, ou especificar se o contato envolve impactos. Às vezes pode-se fazer distinção entre contatos conformes ou não conformes. Para geometrias de contato não conformes as mudanças na área de contato devido ao desgaste (normalmente ocorre aumento da área), levam a condições de contato variados, como por exemplo, quando uma esfera é usada contra uma superfície plana.

2.8 PLANEJAMENTO DO TESTE TRIBOLÓGICO

A partir de aspectos do sistema de atrito e desgaste, segue-se que a percepção de que as propriedades tribológicas dependerão de todo o tribosistema e não apenas dos materiais, e que o ensaio tribológico deve ser precedido por uma avaliação cuidadosa das características do sistema a ser avaliado, e também os devidos efeitos de determinado teste. Um teste tribológico deve sempre ser projetado para atender a uma necessidade definida (ver Figura 11). Uma necessidade de realizar um teste tribológico poderá ser a classificação de um conjunto de materiais em termos de propriedades de atrito e desgaste em um determinado sistema, bem definidos, por exemplo com a finalidade de selecionar o material de uma peça de máquina existente, que o teste tribológico deve imitar. Ou então para selecionar um material tribológico para uma construção em fase de desenvolvimento, onde os testes de campo ou testes de componentes são impossíveis.

RAZÕES PARA REALIZAR UM TESTE TRIBOLÓGICO

- **Classificação de materiais para equipamento existentes**
- **Seleção de materiais para novas aplicações**
- **Geral, independente da aplicação, caracterização das propriedades de desgaste e atrito dos materiais**
- **Estudo dos mecanismos de desgaste que aparecem nas aplicações tribológicas selecionadas**

Figura 11 - Razões para realizar um tribômetro
Fonte: Adaptado de BHUSHAN, 2001.

Alternativamente, o objetivo do teste tribológico pode ser aumentar a compreensão geral de como um material comporta-se em aplicações tribológicas. Para esse efeito a resposta do material para cada tipo particular de mecanismo de desgaste tem de ser estudado. Isto inclui a exposição do material a uma variedade de testes de modelo de simulações de diferentes mecanismos, sob condições de carga sistematicamente variadas. Para cada mecanismo os materiais são caracterizados em termos de resistência ao desgaste, atrito medido e tipos típicos de danos superficiais, o que pode ser chamado de perfil tribológico do material. Este é o procedimento científico para avaliar as propriedades tribológicas de novos materiais, e assim este novo material pode ser recomendado para determinadas aplicações tribológicas.

Na avaliação de materiais para aplicações específicas, o processo de seleção do teste tribológico torna-se crítico. Deve-se sempre escolher o mais alto nível de realismo nos testes, considerando os aspectos de tempo, custo e controle das condições de teste. À medida que o grau de realismo do teste aumenta, a interpretação dos resultados dos testes torna-se mais confiável e pode ser aplicado de forma mais segura para a aplicação em vista. Uma de teste de nível inferior (menos realista) significa que tem que ser feita com mais cuidado para assegurar que o atrito e o desgaste dos mecanismos do componente de serviço sejam realmente simulados nos testes. A análise de danos superficiais torna-se assim uma

parte importante do processo do teste tribológico. Também em termos de parâmetros de teste, o mais próximo possível de semelhança com a aplicação deve ser usado. Imitar as situações de carga, as pressões de contato, velocidades de deslizamento, as frequências de contato, a temperatura ambiente, atmosfera, lubrificantes, dentre outros (BHUSHAN, 2001).

Conseqüentemente, o primeiro passo no processo de planejamento do teste tribológico é estudar a aplicação cuidadosamente, a fim de simular as condições de carga tanto quanto possível. Em segundo lugar, os mecanismos de desgaste que aparecem, específicos para as condições de serviço, tem que ser identificados, e numa terceira etapa, um teste tribológico pode ser selecionado, eventualmente após um processo iterativo de controle dos mecanismos de desgaste (ver Figura 12).

O critério mais básico e importante para garantir a relevância de um teste modelo é a reprodução dos mecanismos de desgaste que ocorrem durante a condição de serviço. A imitação do mecanismo de desgaste real é decisiva para o atrito e o comportamento do desgaste nos materiais testados. O mecanismo de desgaste, ou conjuntos de mecanismos de desgaste que o material é exposto, são determinados pelas propriedades do material juntamente com todos os parâmetros de teste. A temperatura em particular pode influenciar grandemente o comportamento do desgaste, mesmo se o próprio mecanismo estiver sob controle. Entretanto, obter a temperatura correta pode ser muito difícil, mesmo se todas as outras condições são satisfeitas. Por exemplo, as peças de teste podem ser menores do que os componentes reais, proporcionando uma capacidade de aquecimento menor, ou porque a dissipação de calor a partir do contato ou as taxas de arrefecimento através da atmosfera ou lubrificante podem ser diferentes.

RECOMENDAÇÕES PARA PLANEJAMENTO DE TESTES TRIBOLÓGICOS

- **Especificar cuidadosamente a razão para realizar o teste tribológico**
- **Selecionar testes que proporcionam semelhança com as aplicações em mente**
- **Certificar que os devidos mecanismos de desgaste e danos superficiais são imitados no teste**
- **Selecione um teste que é razoavelmente rápido, controlável e de baixo custo**
- **Use materiais de referência apropriados**

Figura 12 – Recomendações para planejamento do teste tribológico
Fonte: Adaptado de BHUSHAN, 2001.

Muito frequentemente testes modelo de laboratório são deliberadamente concebidos para aumentar ou acelerar a taxa de desgaste do teste, afim de acelerar a avaliação. Isso geralmente é conseguido aumentando-se a pressão de contato e a velocidade de escorregamento. Porém, infelizmente o aumento nos parâmetros de pressão e velocidade muitas vezes altera o tipo de desgaste, principalmente devido a alterações de temperatura. Estes testes acelerados que não reproduzem os mecanismos de desgaste verdadeiros são de valor limitado. Para os tipos de desgaste que resultam a partir de um grande número de micro eventos, como por exemplo, a erosão por partículas sólidas, o método de ensaio pode ser acelerado aumentando-se a velocidade que os eventos podem aparecer. Por exemplo, aumentando-se a taxa de desgaste erosivo, ou a densidade do grão em um tipo de desgaste abrasivo. Para a simulação de tribosistemas com contato intermitente, uma redução na duração da fase sem contato pode ser uma boa maneira de acelerar o teste.

Um outro fator, muitas vezes negligenciado no teste tribológico, também aparece a partir do aspecto do sistema de propriedades tribológicas. Este fator é a importância do uso de materiais de referência. Rigorosamente falando, propriedades tribológicas são apenas parâmetros comparativos. Mesmo em um tribosistema bem caracterizado, de maneira real, uma taxa de desgaste ou valor do atrito medido em

um único material deve ser visto com desconfiança. A seleção de materiais de referência pode ser feita de diferentes maneiras. No procedimento de classificação de materiais para máquinas existentes, materiais comumente utilizados na aplicação são referências adequadas. Mas em uma avaliação geral de um material descaracterizado, materiais de referência bem conhecidos por determinadas propriedades específicas como a ductilidade, resistência a fadiga superficial, baixo atrito, dentre outras, é interessante que estes materiais sejam selecionados para fins de comparação. Para obter conhecimento sobre os mecanismos de desgaste e para facilitar a classificação global de materiais pode-se até incluir materiais que são conhecidos por se comportarem mal em determinada aplicação.

2.9 EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE DESGASTE

As técnicas comumente usadas para avaliar o desgaste se concentram nas medições de alterações das dimensões. Isto muitas vezes pode ser difícil se os volumes desgastados são pequenos em relação ao peso do componente.

O desgaste também pode ser distribuído de modo desigual ao longo de uma superfície, fazendo com que uma medição do desgaste em danos locais seja mais relevante do que a perda de massa total. Testes modelo de laboratório podem permitir uma gravação contínua do desgaste, e isto pode ser problemático na avaliação dos componentes reais. Portanto, estimativas das dimensões dos micros desgastes são mais válidas.

A identificação dos mecanismos de desgaste e danos na superfície é uma parte importante em qualquer análise de teste tribológico, e deve acompanhar a medição do atrito e do desgaste. Portanto, o estudo das superfícies desgastadas, por exemplo com microscopia de superfície ou técnicas de topografia, torna-se integrante do processo de avaliação. Ao examinar uma superfície gasta, é importante estar atento para o tipo de dano de superfície que define o tempo de vida de um componente. Para grandes componentes o uso de técnicas de réplica pode ser útil. Este procedimento de identificação dos mecanismos de desgaste pode ser muito difícil e não existem procedimentos universais a serem seguidos (Figura 13).

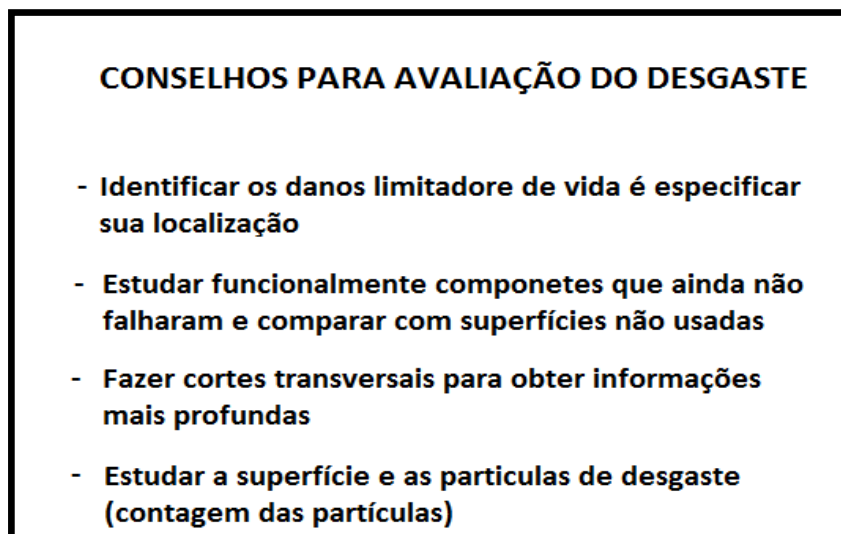


Figura 13 – Conselhos para avaliação do desgaste.
Fonte: Adaptado de BHUSHAN, 2001.

Recomenda-se atenção na causa da falha e a localização dos danos superficiais. Considere se a falha é resultado de desgaste contínuo, ou se os danos aparecem de repente. Também deve-se notar que um desgaste em serviço nem sempre pode dar informações sobre os respectivos mecanismos de desgaste, uma vez que estes podem ser escondidos por danos ocorridos durante a fase final da falha. Pode-se comparar para estudo, componentes que ainda não falharam, com componentes desgastados ou novos. Isso ajuda a diferenciar entre as características da superfície que aparecem durante a fabricação, e aquelas que aparecem pelas condições de serviço.

Recomenda-se estudar a superfície gasta em seção transversal. Isso fornece informações sobre a profundidade dos danos, as mudanças cristalográficas causadas pela temperatura, e a ausência de zonas de superfície pode indicar o desgaste químico.

O estudo da superfície pode fornecer mais pistas sobre o processo de desgaste, como camadas de material transferido ou partículas duras incorporadas. A coleta de partículas de desgaste, para avaliar seu tamanho, forma e conteúdo químico pode fornecer estimativas ou ideias sobre os mecanismos de desgaste e temperaturas da superfície.

Devido ao grande número de parâmetros que influenciam o atrito e o desgaste, suas variações potenciais e sua dependência do tempo, a dispersão dos dados é um dos problemas principais do teste tribológico. A influência dos desvios

sistemáticos e aleatórios deve ser levada em conta. As causas da dispersão não estão apenas nos materiais e no próprio tribômetro. Podem ser devidas a preparações de superfície, tratamentos térmicos, variações entre lotes, variações de umidade, dentre outros, que podem afetar fortemente os valores medidos de atrito e de desgaste. Portanto, o número de testes necessários para alcançar um resultado confiável é questão de debate entre os tribologistas. Não é exagero considerar que o resultado de uma única medida deve ser tomado com prudência. Para minimizar a influência dos parâmetros é geralmente favorável que todos os testes em um procedimento de avaliação sejam executados pelo mesmo operador durante um período de tempo limitado.

2.10 EXEMPLOS DE TESTES TRIBOLÓGICOS

Grandes quantidades de equipamentos de teste para avaliação das propriedades do desgaste e do atrito, muitas vezes referidos como tribômetros, foram concebidas ao longo dos anos para uma variedade de propósitos. Neste contexto apenas um pequeno número de testes padrão serão apresentados. Estes testes merecem atenção particular pois são usados com frequência, ou então representam desenvolvimentos interessantes no campo dos testes tribológicos. Além de testes modelo, grande número de testes orientados para aplicações específicas está em uso no setor industrial. Como parte do desenvolvimento de materiais para ferramentas, rolamentos, vedações, corte e moagem, dentre outros, testes experimentais de aplicação acelerados são frequentemente usados. Outros exemplos de teste tribológicos também são descritos na literatura segundo BHUSHAN, 2001. Os testes tribológicos que serão apresentados no decorrer deste trabalho estão organizados de acordo com o mecanismo de desgaste principal para o qual eles foram projetados. A Figura 14 exemplifica alguns possíveis esquemas para ensaios tribológicos.

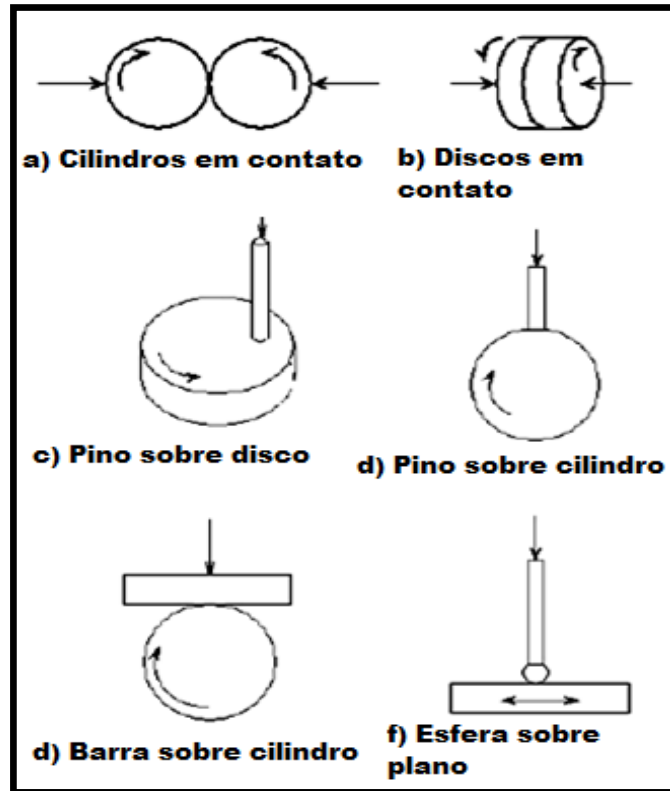


Figura 14 - Configurações normalmente empregadas para ensaios tribológicos
 Fonte: SANTOS (2005).

2.10.1 Desgaste abrasivo

Entre os mecanismos de desgaste básicos, a abrasão, que é provocada por partículas duras ou asperezas duras de uma superfície, é provavelmente o mecanismo de desgaste mais estudado. Em comparação com outros tipos de desgaste, os modelos analíticos desenvolvidos para descrever a abrasão são muito mais confiáveis e abrangentes, o que facilita fortemente a interpretação dos resultados dos testes. Para materiais bem caracterizados, escalas de materiais ásperos são muitas vezes possíveis sem nenhum teste. Na abrasão pura existe uma linearidade entre volume desgastado e distância de deslizamento, e isso de certa forma é diferente de várias situações de contato de deslizamento. Para os materiais relativamente dúcteis, incluindo a maioria dos metais, uma proporcionalidade entre a resistência ao desgaste abrasivo e a dureza é geralmente observada. Há também

modelos analíticos funcionais para o efeito da forma e tamanhos do grão sobre a abrasão dos materiais que consistem em várias fases (ZUM GAHR, 1987).

Uma vez que a taxa de abrasão depende muito da forma, tamanho, dureza da partícula abrasiva (dentre outros), a granulometria é particularmente importante no processo de abrasão. Uma forte redução na taxa de desgaste ocorre quando a dureza da amostra for superior à dureza do grão (HUTCHINGS, 1992). Além disso, a abrasão por partículas soltas, chamada abrasão à três corpos, produz fundamentalmente diferentes tipos de desgaste, em comparação com os testes abrasivos fixos, denominados abrasão à dois corpos. A abrasão à três corpos torna-se sensível às propriedades, particularmente ao endurecimento do contra-corpo.

Testes mais comuns para avaliar a resistência dos materiais ao desgaste abrasivo exploram tanto superfícies de desgaste com abrasivos fixos, quanto com abrasivos soltos. Os detalhes para testes de abrasão variam muito (Figura 15).

Os testes pino sobre disco (Figura 15.a) e pino sobre rolo (Figura 15.c) são configurações muito comuns. Este último constitui a base de um tribômetro definido na norma industrial alemã DIN 53516, sendo utilizada para polímeros. O movimento retilíneo pino contra placa (Figura 15.b) também está sendo utilizado. A Figura 15.d ilustra um teste comumente utilizado para testes de abrasão em rodas de borracha, definido pela norma ASTM G65 EUA. O espécime, na forma de um bloco, é pressionado com uma carga constante contra uma roda em rotação, a borda da qual está coberta com uma camada espessa de borracha substituível.

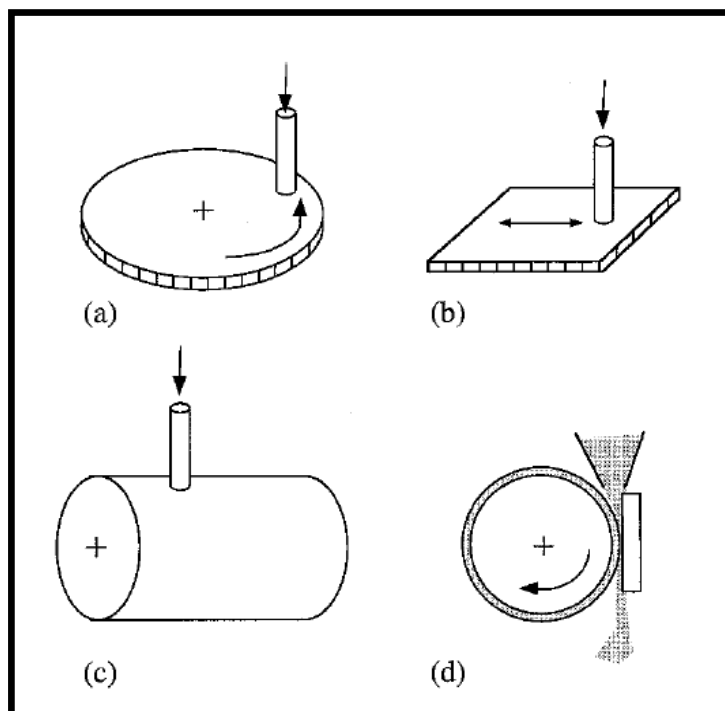


Figura 15 – Configurações comuns para testes de desgaste abrasivo.
Fonte: Adaptado de BHUSHAN, 2001.

2.11 MEDIÇÃO DO DESGASTE

Segundo SILVA (2013), para uma correta quantificação do desgaste ocorrido numa superfície recorre-se ao coeficiente de desgaste, visto que medir este parâmetro apenas pelo volume de matéria perdida não leva em conta as diferentes condições em que ocorrem os ensaios de desgaste. Assim, a equação para calcular o coeficiente de desgaste é:

$$K = \frac{\text{Vol}}{W \cdot S} \quad (4)$$

Onde k é o coeficiente de desgaste ($\text{m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), Vol . é o volume perdido (m^3), w é a força normal aplicada (N) e S a distância percorrida durante o ensaio (m).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados o tribômetro proposto assim como os equipamentos que irão constituí-lo.

3.1 O TRIBÔMETRO PROPOSTO

O tribômetro é um equipamento usado para medição do atrito e desgaste de diferentes materiais, com ou sem a presença de lubrificantes, sob condições específicas de carga, velocidade, temperatura e atmosfera. Para fazer a caracterização tribológica é necessário conhecer o tipo de esforço real do elemento que se deseja simular, assim como determinar atrito (forças e coeficiente), taxa de desgaste, durabilidade do filme de lubrificante, temperatura da região, entre outros. Essa caracterização é de grande importância para muitas áreas de aplicação onde existe o movimento relativo entre corpos.

A operação de um tribômetro pino sobre disco consiste em atritar um pino fixo contra um disco rotativo, simulando o ambiente tribológico existente entre o conjunto ferramenta de corte-peça-fluido de corte de um processo de usinagem. A Figura 16 exemplifica como é o tribômetro do tipo pino sobre disco.

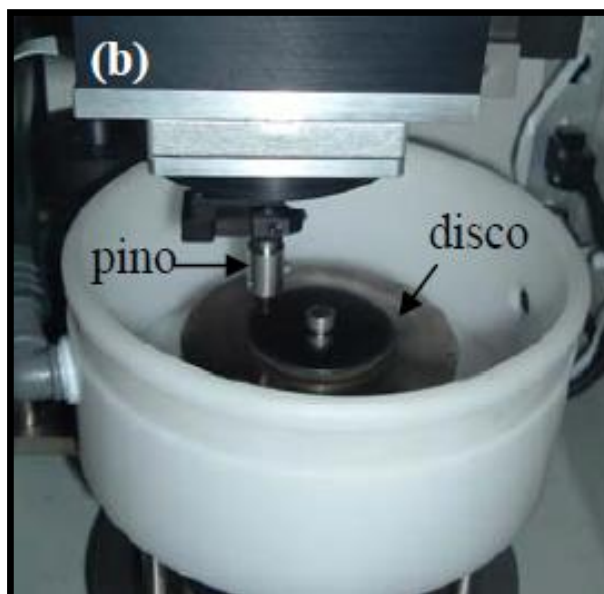


Figura 16 – Tribômetro modelo pino sobre disco
Fonte: Adaptado de RADI et al., (2006).

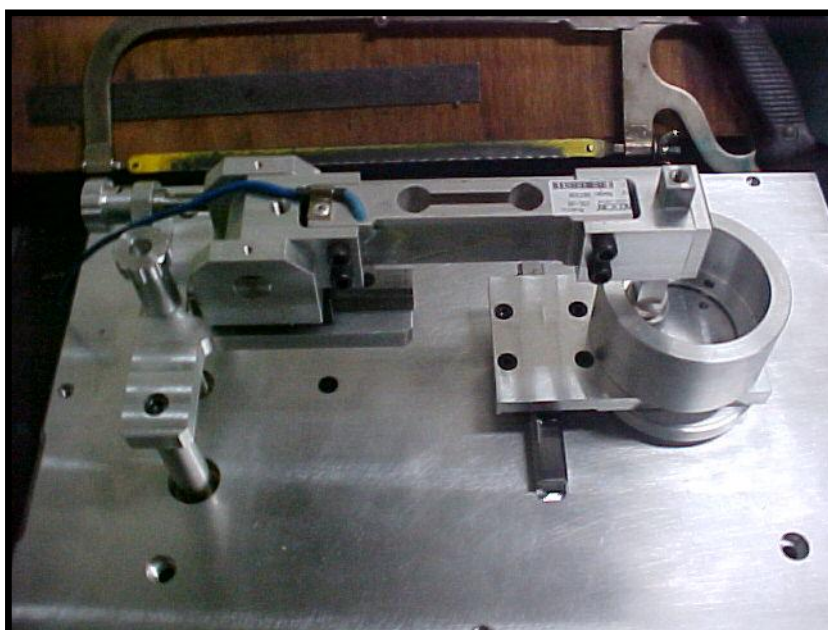


Figura 17 – Tribômetro construído no Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Fonte: GONÇALVES (2013).

No Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) foi projetado e construído um tribômetro do tipo pino sobre disco, apresentado na Figura 17. O projeto deste tribômetro foi cedido gratuitamente, para fins didáticos e de pesquisa científica, pelos seus projetistas, Janaina Fracaro de Souza e André Zanatta, para servir de modelo para a proposta de construção do tribômetro pino sobre disco presente neste

trabalho. A Figura 18 apresenta uma ilustração do tribômetro obtida à partir do projeto cedido, realizada no software gráfico Solidworks.

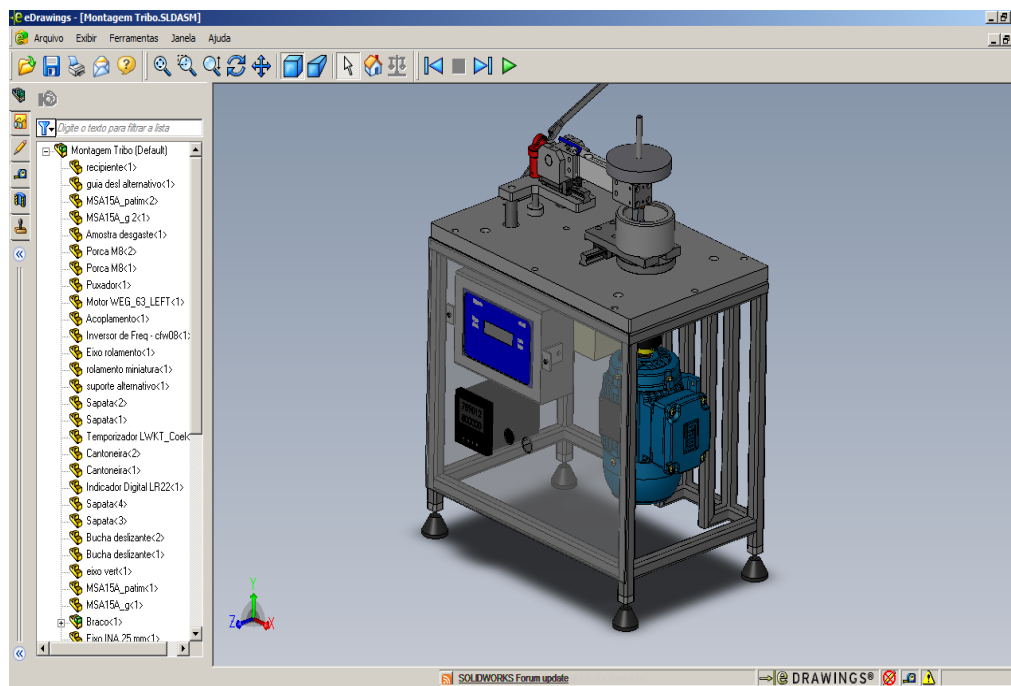


Figura 18 - Projeto do tribômetro em Solidworks
Fonte: Autoria própria.

O pino a ser empregado no tribômetro proposto será do tipo esfera, como mostrado na Figura 19.



Figura 19 - Pinos tipo esfera com seus respectivos porta-pinos
Fonte: Adaptado de RIVEROS (2006).

3.2 MOTOR ELÉTRICO

Um motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica de rotação. Trata-se do mais usado de todos os tipos de motores, pois combina vantagens da energia elétrica como baixo custo, facilidade de transporte, limpeza, versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos.

Os motores elétricos podem ser de corrente contínua ou alternada. Os motores de corrente alternada são os mais utilizados por que a distribuição de energia é feita normalmente em correntes alternadas. Existem dois tipos de motores de corrente alternada, os síncronos e os assíncronos. Os motores assíncronos (ou de indução) são os mais comuns, devido ao seu baixo custo, simplicidade e robustez. Ele funciona com velocidade estável que varia ligeiramente com a carga aplicada ao eixo do motor. É o mais adequado para quase todos os tipos de máquinas encontradas na prática. É possível controlar a rotação dos motores de indução com o auxílio de inversores de frequência. O motor elétrico de corrente alternada de indução pode ser monofásico ou polifásico. Os motores trifásicos não necessitam de circuito auxiliar de partida como os monofásicos. Portanto, são mais simples, menores, e mais leves em comparação com os motores monofásicos de mesma potência, por isso apresentam menor custo.

Conforme o projeto, foi adotado para o tribômetro proposto neste trabalho o motor elétrico WEG Trifásico 0,5 cv, 3800rpm, 220/380V, carcaça 63, como mostra a Figura 20. Este motor irá fornecer a rotação para o disco do tribômetro. Todas as características técnicas (elétricas, mecânicas, noções fundamentais sobre motores, características da rede de alimentação, características de aceleração, regulagem da velocidade de motores assíncronos de indução, características em regime, características de ambiente, ambientes perigosos, características construtivas, seleção e aplicação de motores elétricos trifásicos, ensaios, anexos, instalação, manutenção, armazenagem, informações ambientais, falhas em motores elétricos, assistência técnica e garantia) estão no Catálogo de motores WEG disponível em <http://docente.ifrn.edu.br/giancarlosbarbosa/disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos/WEGmotoreseltricosbaixatensaomercadobrasil050catalogoportuguesbr.pdf>.



Figura 20 – Motor elétrico WEG trifásico 0,5cv 3800rpm 220/380V carcaça 63
Fonte: Catálogo de motores WEG.

3.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Um inversor de frequência é um dispositivo capaz de gerar uma tensão e frequência trifásicas ajustáveis, com a finalidade de controlar a velocidade de um motor de indução trifásico. Para controlar a rotação do motor e assim permitir ensaios com diferentes velocidades, foi escolhido o inversor de frequência WEG CFW 08. Este inversor é apresentado na Figura 21. Todas as informações técnicas sobre o inversor e seu painel como procedimentos de montagem, dimensões, instalação elétrica, ajuste de fábrica, funções do painel e parâmetros, visor e mensagens e suporte técnico estão disponíveis no manual do inversor WEG CFW 08.



Figura 21 – Inversor de frequência WEG CFW 08
Fonte: Manual do inversor WEG CFW 08.

3.4 CÉLULA DE CARGA

Células de carga são transdutores de força piezo-elétricos que transformam uma grandeza física (uma força) em um sinal elétrico, abrangendo uma vasta gama de aplicações. O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro ou “*strain gage*”, quando este é submetido a uma deformação (Figura 22).

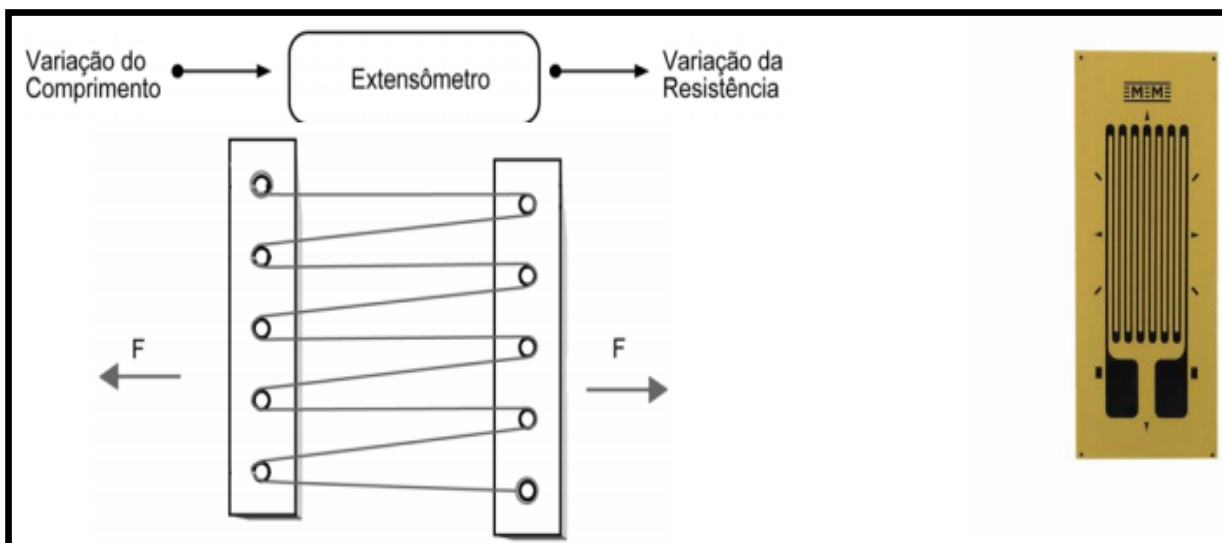


Figura 22 – Extensômetro

Fonte: <http://www.celuladecarga.com.br/info/definicao.htm>

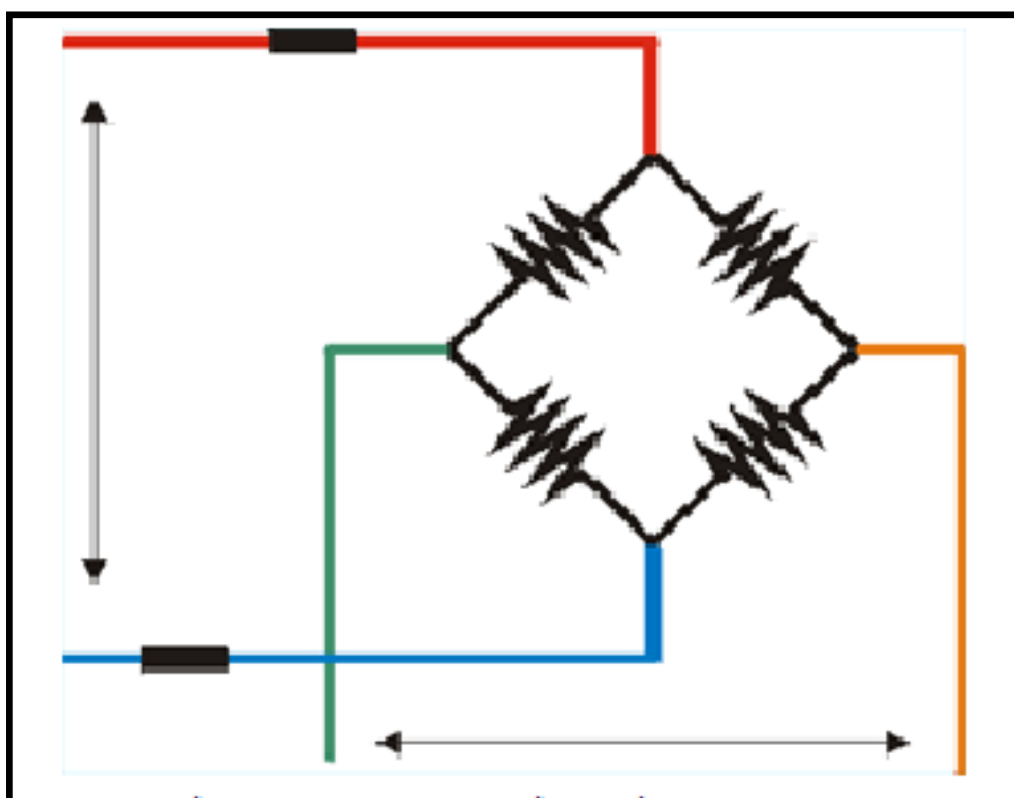


Figura 23 – Ponte de Wheatstone

Fonte: <http://www.celuladecarga.com.br/info/definicao.htm>

Utiliza-se comumente em células de carga quatro extensômetros ligados entre si segundo a ponte de Wheatstone (Figura 23) e o desbalanceamento da

mesma, em virtude da deformação dos extensômetros, é proporcional à força que a provoca. É através da medição deste desbalanceamento que se obtém o valor da força aplicada.

Os extensômetros são colados a uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), denominada corpo da célula de carga e são sensíveis à sua deformação. A força atua portanto sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é transmitida aos extensômetros, que por sua vez medirão sua intensidade. Obviamente que a forma e as características do corpo da célula de carga devem ser objeto de um meticoloso cuidado, tanto no seu projeto quanto na sua execução, visando assegurar que a relação de proporcionalidade entre a intensidade da força atuante e a consequente deformação dos extensômetros seja preservada tanto no ciclo inicial de pesagem quanto nos ciclos subsequentes, independentemente das condições ambientais. A forma geométrica, portanto, deve conduzir a uma linearidade dos resultados (Figura 24).

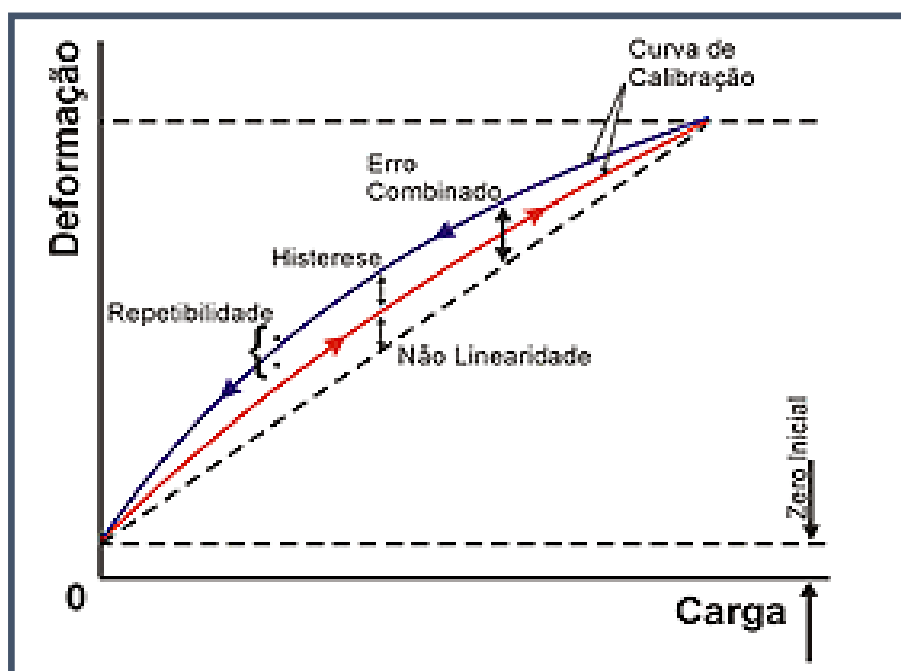


Figura 24 – Gráfico de deformação x carga, mostrando histerese, repetibilidade e não linearidade.

Fonte: <http://www.celuladecarga.com.br/info/definicao.htm>

Considerando-se que a temperatura gera deformações em corpos sólidos e que estas poderiam ser confundidas com a provocada pela ação da força a ser

medida, há necessidade de se "compensar" os efeitos de temperatura através da introdução no circuito de Wheatstone de resistências especiais que variem com o calor de forma inversa à dos extensômetros.

Um efeito normalmente presente ao ciclo de pesagem e que deve ser controlado com a escolha conveniente da liga da matéria-prima da célula de carga é o da "histerese" decorrente de trocas térmicas com o ambiente da energia elástica gerada pela deformação, o que acarreta que as medições de cargas sucessivas não coincidam com as descargas respectivas (Figura 24).

Outro efeito que também deve ser controlado é a repetibilidade ou seja, a indicação da mesma deformação decorrente da aplicação sucessiva da mesma carga. A repetibilidade deve ser verificada e controlada através do uso de materiais isotrópicos e da correta aplicação da força sobre a célula de carga. Finalmente, deve-se considerar o fenômeno da fluência ou "*creep*", que consiste na variação da deformação ao longo do tempo após a aplicação da carga. Este efeito decorre de escorregamentos entre as faces da estrutura cristalina do material e apresenta-se como variações aparentes na intensidade da força sem que haja incrementos na mesma.

Conforme o projeto adotado neste trabalho, foi adotada a célula de carga BSPL 5 kg tipo single-point, fabricada em alumínio anodizado, insensível a momentos de torções e flexões. Circuito interno totalmente vedado com resina a base de silicone, garantindo grau de proteção IP-65, conforme norma internacional IEC 529/1976. A função da célula de carga será aferir as cargas aplicadas no tribômetro.

3.5 TEMPORIZADOR

Um temporizador é um dispositivo capaz de medir o tempo sendo um tipo de relógio especializado. Ele pode ser usado para controlar a sequência de um evento ou processo ou uma operação que é executada.

Conforme o projeto foi adotado o temporizador LWKT COEL. O LWKT é um instrumento versátil e de fácil programação. Possui um display em LCD retroiluminado nas cores vermelha e verde com duas linhas e seis dígitos. Através

dele é possível observar as variáveis do processo, como por exemplo, contagem, temporização, totalização, entre outros. Dispõem de 3 entradas digitais para trabalhar de acordo com a aplicação desejada, sendo que em duas delas é possível configurar suas características através de DIPs internos (NPN OU PNP). Possui duas saídas a relé SPDT e os parâmetros de configuração são bloqueados através de uma senha configurável. A Figura 25 apresenta uma foto do temporizador LWKT.



Figura 25– Temporizador LWKT COE
Fonte: <http://www.coel.com.br/produto/lwkt/>

Todas as informações técnicas do temporizador LWKT como características principais, descrição, aplicações, funções do frontal, esquema elétrico, programação, mapa de configuração, descrição dos parâmetros, modos de funcionamento, dados técnicos e dimensões estão disponíveis no Manual de instruções do temporizador LWKT. O temporizador terá como função principal controlar rigorosamente os tempos dos ensaios.

3.6 PAINEL DIGITAL

Indicadores digitais são instrumentos utilizados para indicação de determinadas grandezas ou variáveis do processo. Podem ser utilizados por exemplo para: indicar a tensão ou corrente de um determinado sistema; indicar a temperatura de determinado ambiente (temperatura proveniente de um sensor externo); indicar determinada variável do processo, como por exemplo “peças por minuto” (informação proveniente de um sensor externo). Possuem a vantagem, em relação aos indicadores analógicos, de permitirem uma leitura direta, sem possíveis erros de interpretação da leitura por parte do operador. Os indicadores digitais permitem visualizar parâmetros tais como temperatura, umidade do ar, vibração, sinais normalizados, etc. Além da medição e da indicação de sinais normalizados, também pode medir outras magnitudes físicas mediante sensores conectados diretamente ao indicador, como por exemplo, temperatura ou força. Conforme projeto o indicador digital adotado será o Indicador digital WT21 LCD, e todas as informações técnicas desse equipamento estão presentes em seu manual de instruções disponível em <http://www.weightech.com.br/arquivos/indicador-wt21lcd-manual.pdf>. A Figura 26 apresenta como é o Indicador digital WT21 LCD.



Figura 26 – Indicador digital WT21 LCD
Fonte: www.weigtech.com.br

3.7 ORÇAMENTOS

Após uma análise do projeto, foram identificados os seguintes equipamentos no tribômetro modelo: motor elétrico, inversor de frequência, botão de comando duplo, célula de carga, temporizador, sensor indutivo e indicador digital. Foram necessários três orçamentos de cada equipamento como requisito para conseguir financiamento do projeto. Após diversas contatos com revendedores, processo muito trabalhoso, obteve-se a uma lista com o valor dos equipamentos, presente na Figura 27.

Orçamento do Projeto	
Item	Custo total (R\$)
Motor elétrico	312,29
Inversor de frequência	592,74
Botão de comando duplo	25,43
Temporizador LWKT	400,29
Sensor indutivo 18mm	75,54
Célula de carga CRGL 5kg	78,30
Indicador Digital WT21 LCD	1301,00
Total	2785,59

Figura 27 - Orçamento do projeto
Fonte: Autoria própria.

3.8 COMPRA DOS EQUIPAMENTOS

Após a obtenção dos orçamentos, conseguiu-se o financiamento do projeto, através de recursos da Fundação de Apoio à Educação, Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico da UTFPR (FUNTEF-PR). Assim, foi possível realizar a compra de todos os equipamentos do tribômetro. As Figuras 28 a 34 a seguir apresentam os equipamentos adquiridos e que já encontram-se na UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio.



Figura 28 – Motor elétrico WEG
Fonte: Autoria própria.



Figura 29 - Inversor WEG CFW 08
Fonte: Autoria própria.



Figura 30 - Botão de comando duplo
Fonte: Autoria própria.



Figura 31 - Célula de carga BSPL 5 Kg
Fonte: Autoria própria.



Figura 32 – Temporizador LWKT COEL
Fonte: Autoria própria.



Figura 33 – Sensor indutivo
Fonte: Autoria própria.



Figura 34 – Indicador digital WT21 LCD
Fonte: Aatoria própria.

3.9 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS

As peças vistas nas Figuras 35 a 71 foram fabricadas na oficina mecânica da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio e também em outros lugares especializados em serviços de usinagem (tornearia e fresamento).

Alguns elementos disponíveis no comércio foram adquiridos já prontos com recursos oriundos da bolsa TCC, uma vez que o autor deste trabalho se inscreveu no Edital 031/2013 – PROGRAD (Apoio à execução de Trabalhos de Conclusão de Cursos – TCC), foi aprovado e contemplado com uma bolsa TCC pelo período de seis meses. Procurou-se seguir com rigor o projeto original.

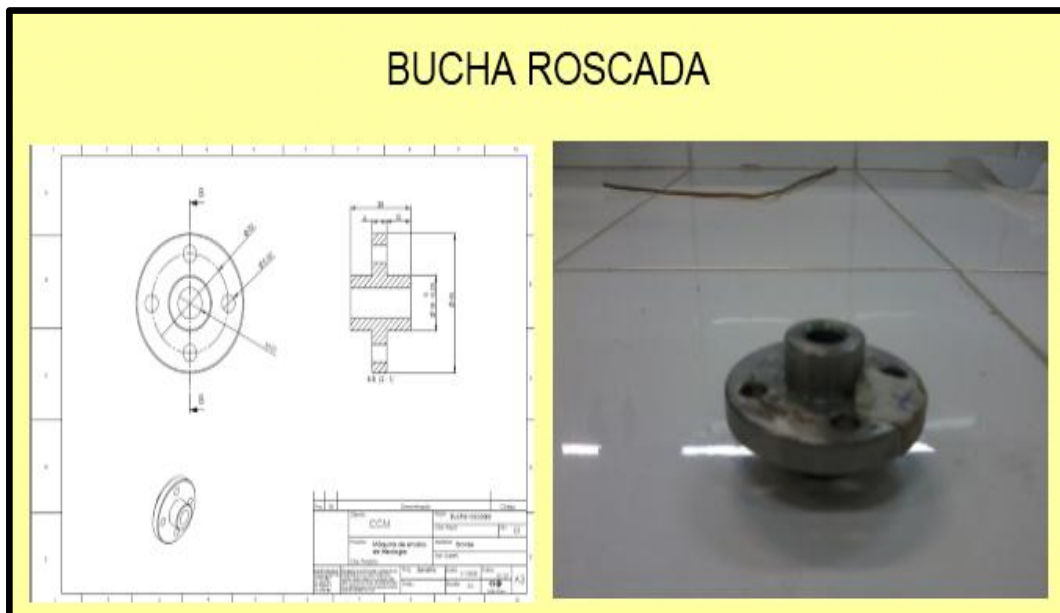


Figura 35 – Bucha roscada
Fonte: Autoria própria.

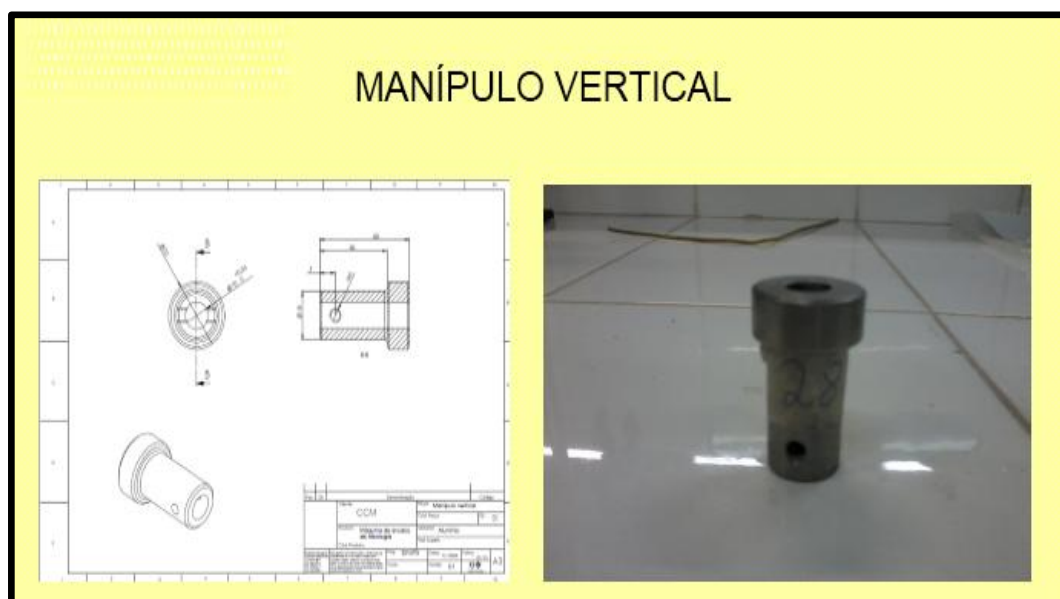


Figura 36 – Manípulo vertical
Fonte: Autoria própria.

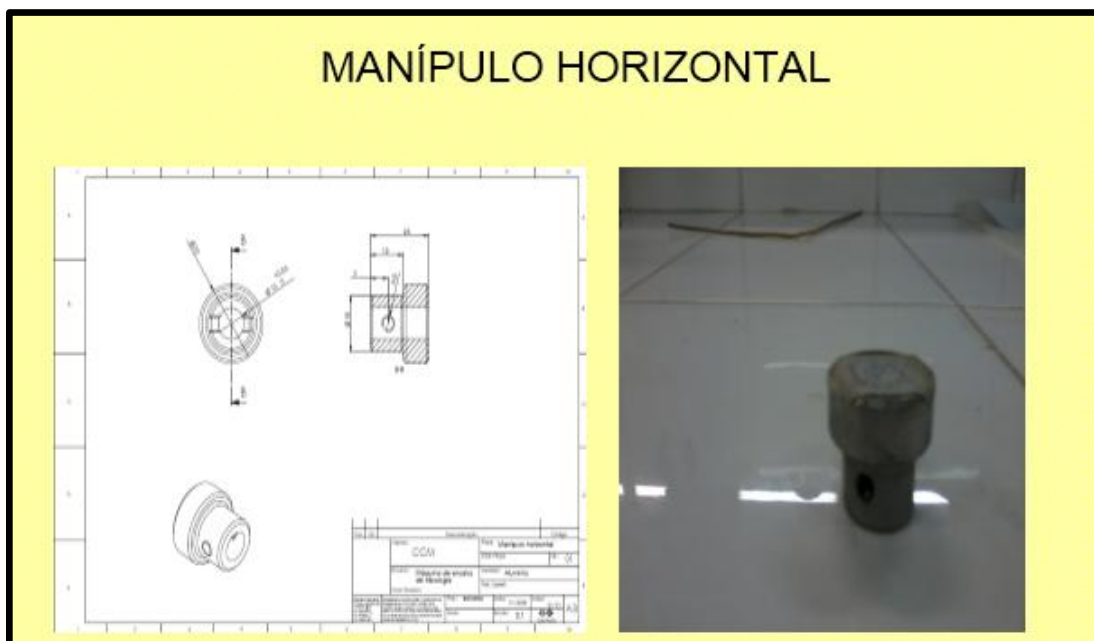


Figura 37 – Manípulo horizontal
Fonte: Autoria própria.



Figura 38 – Eixo da célula de carga
Fonte: Autoria própria.

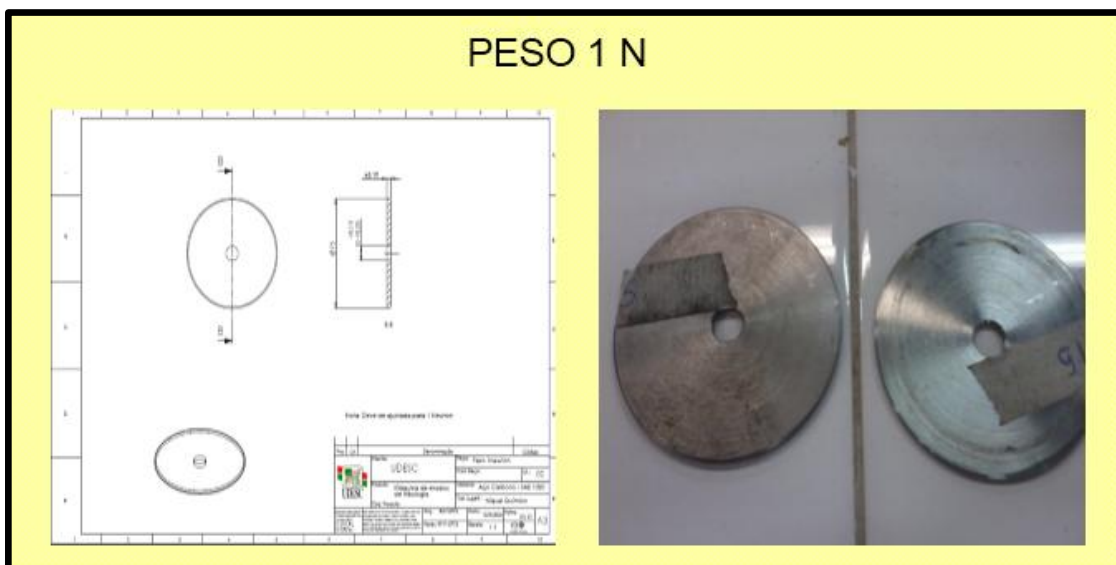


Figura 39 – Peso 1 Newton
 Fonte: Autoria própria.

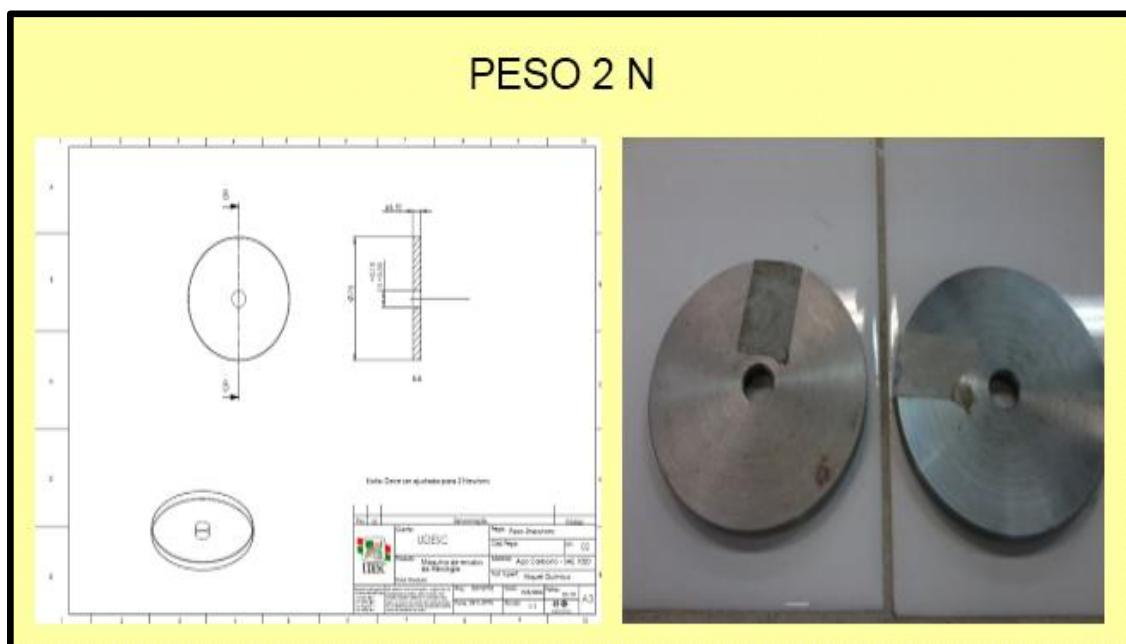


Figura 40 – Peso 2 Newtons
 Fonte: Autoria própria.

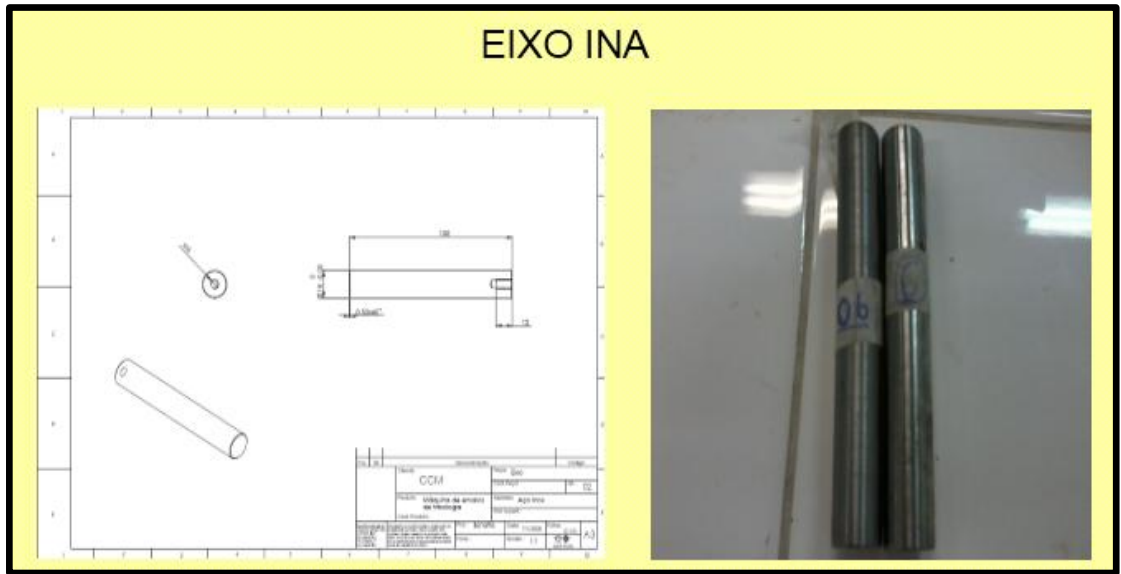


Figura 43 – Eixo INA
 Fonte: Autoria própria.

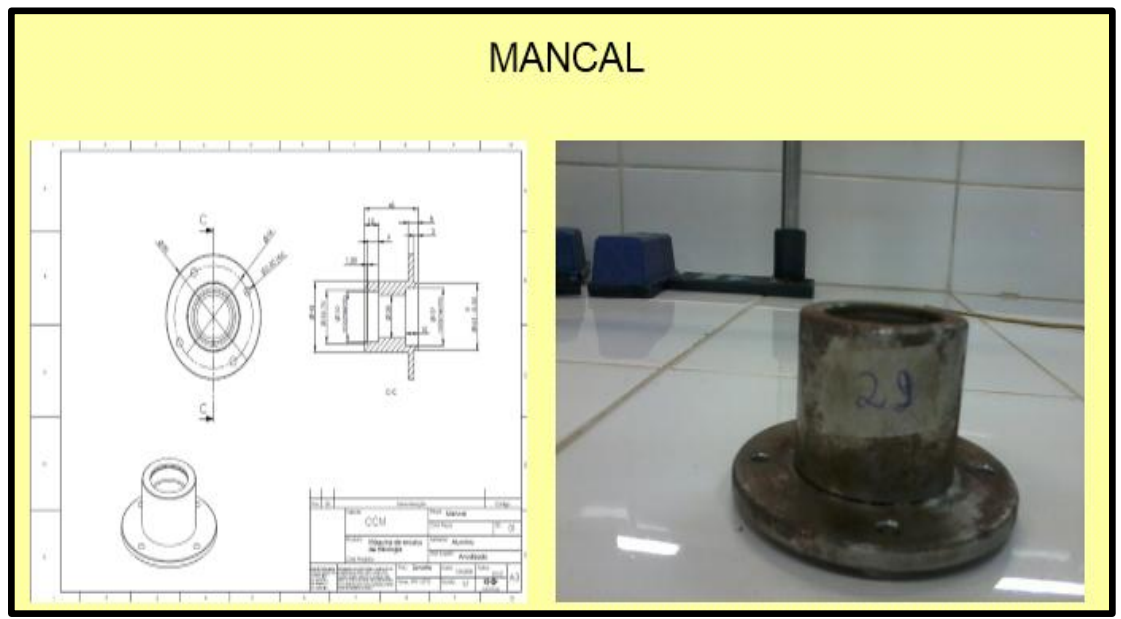


Figura 44 – Mancal
 Fonte: Autoria própria.

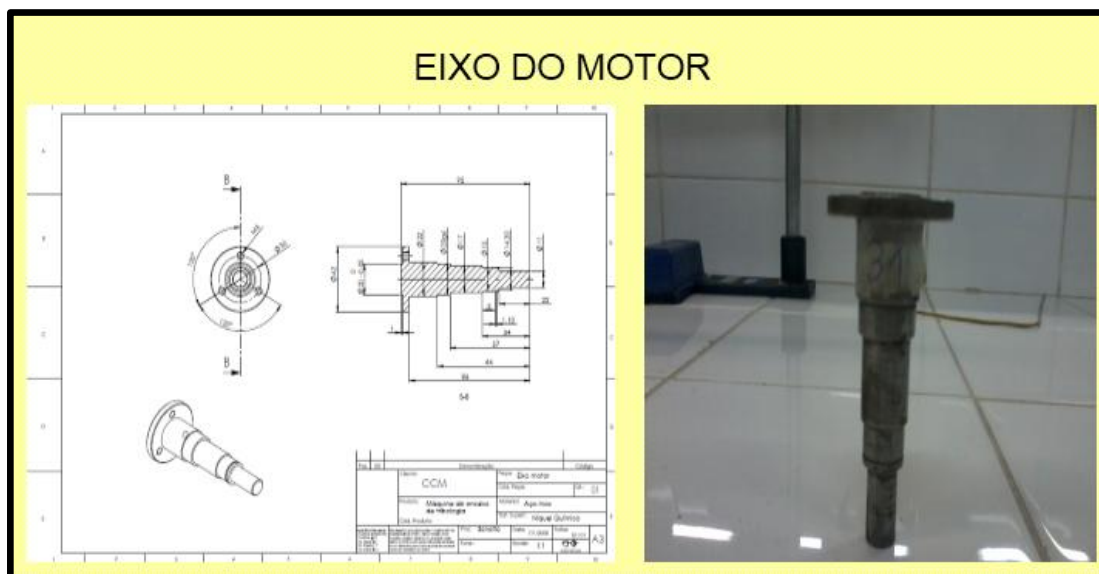


Figura 45 – Eixo do motor
Fonte: Autoria própria.

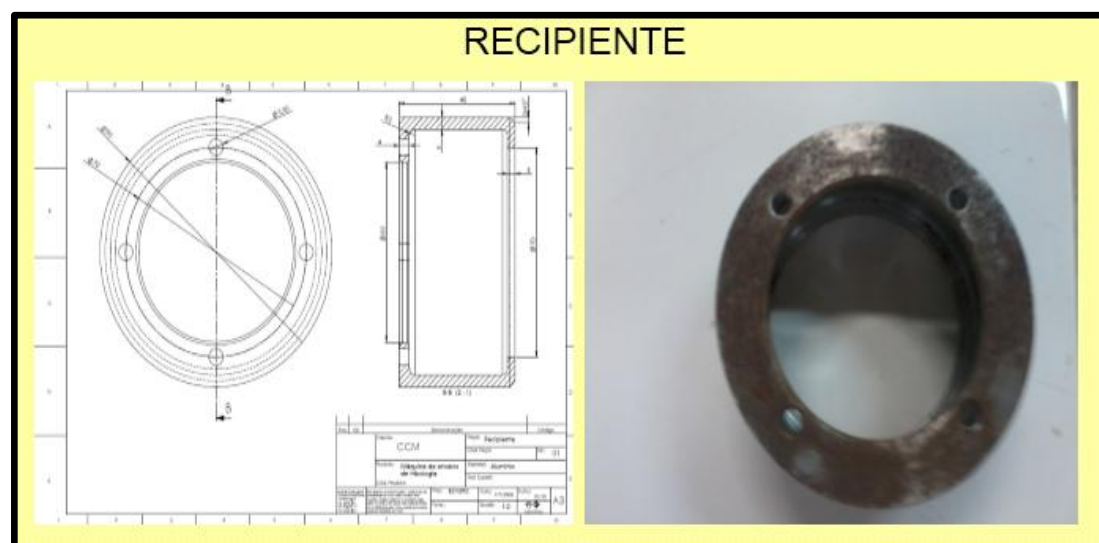


Figura 46 – Recipiente
Fonte: Autoria própria.

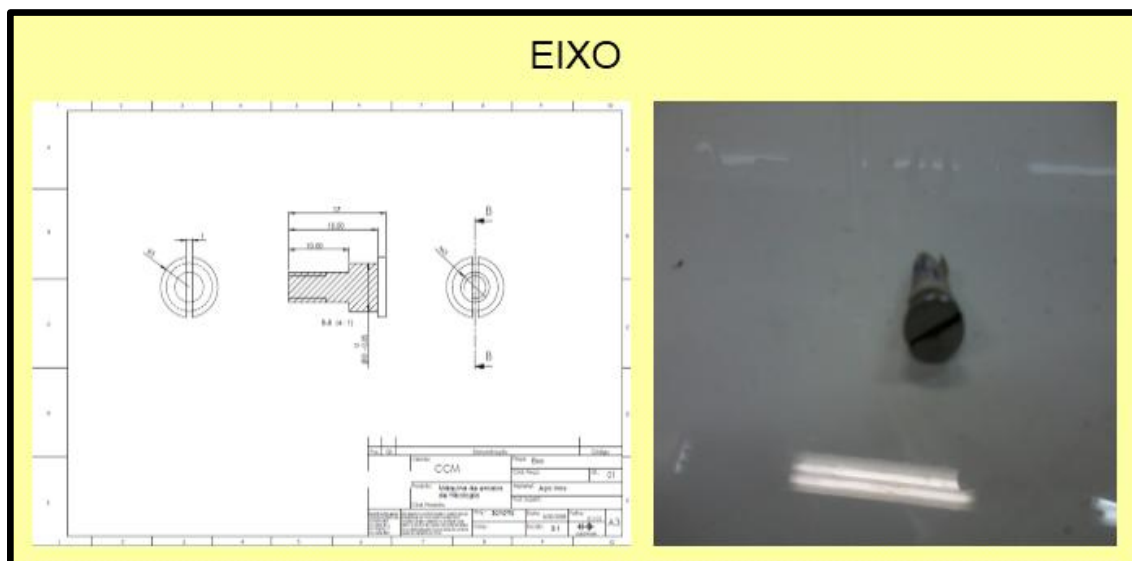


Figura 47 – Eixo
Fonte: Autoria própria.



Figura 48 – Bucha deslizante
Fonte: Autoria própria.



Figura 49 – Eixo fuso vertical
Fonte: Autoria própria.



Figura 50 – Eixo fuso horizontal
Fonte: Autoria própria.

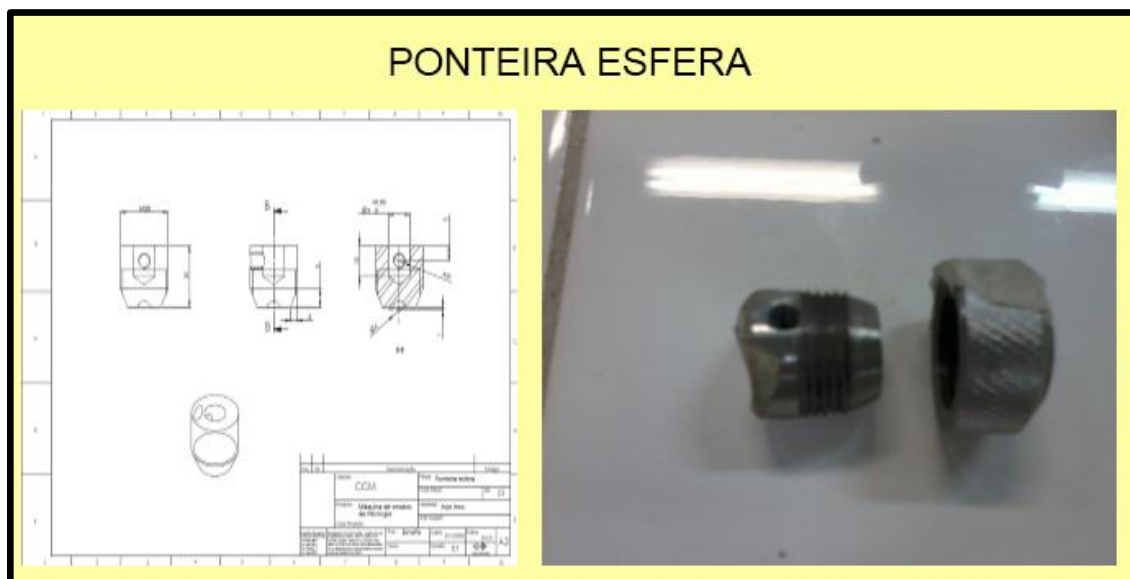


Figura 51 – Ponteira esfera
Fonte: Autoria própria.

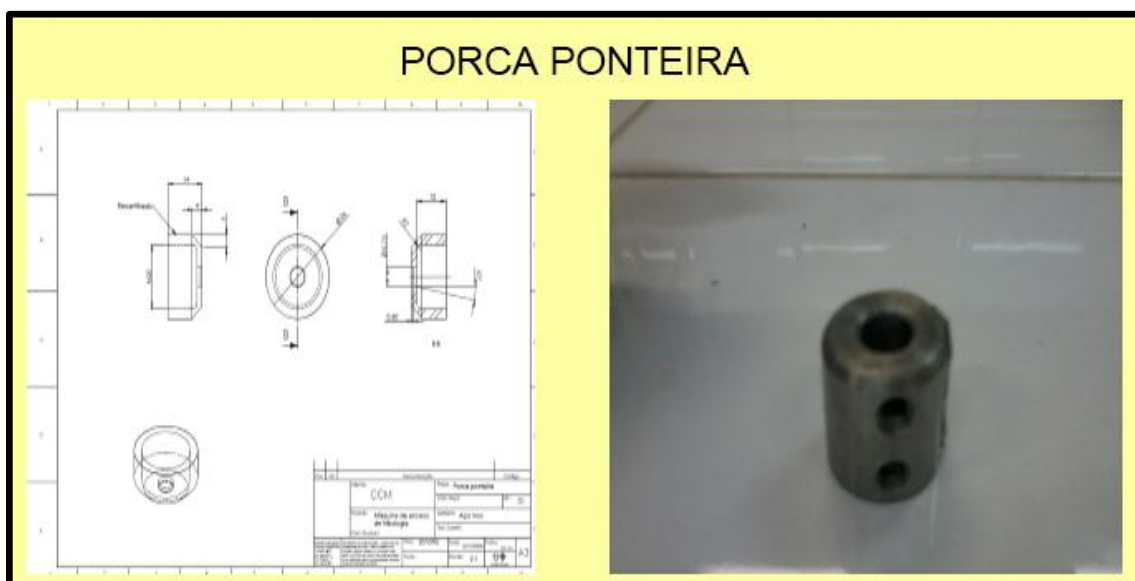


Figura 52 – Porca ponteira
Fonte: Autoria própria.

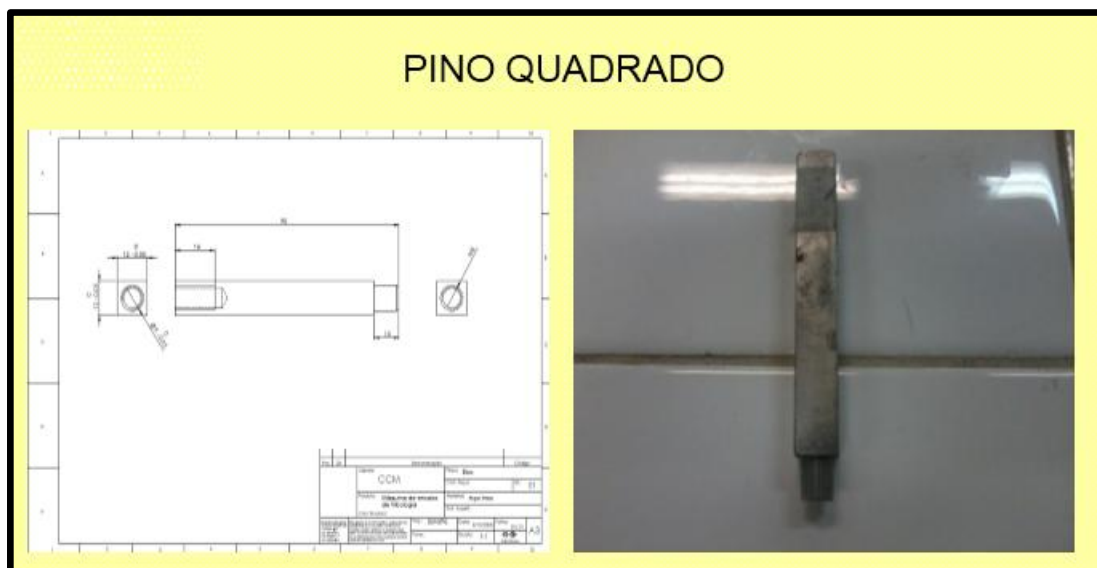


Figura 53 – Pino quadrado
Fonte: Autoria própria.



Figura 54 – Porca M8
Fonte: Autoria própria.

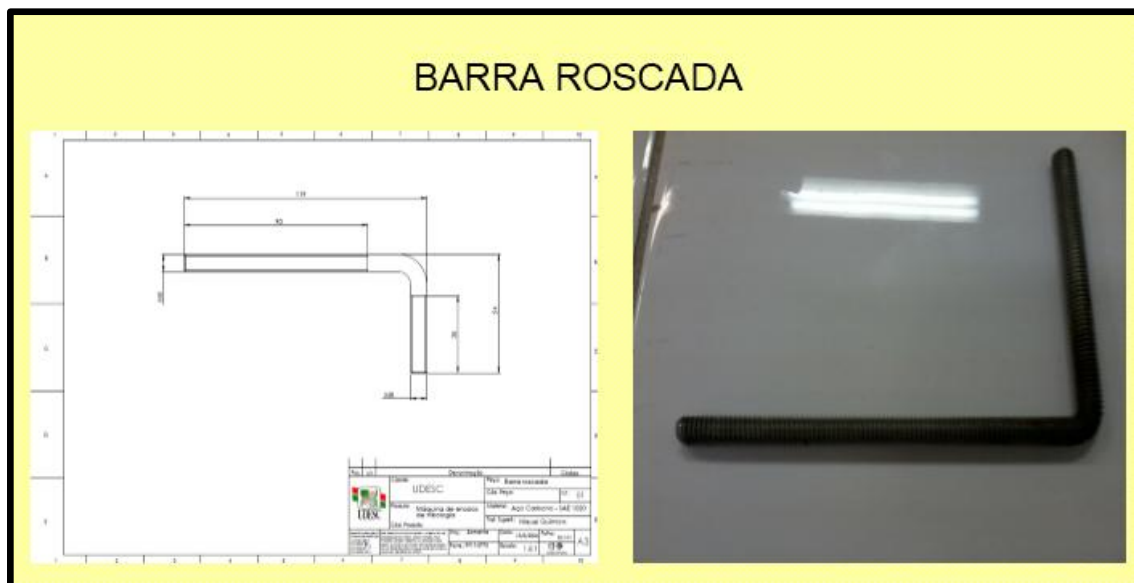


Figura 55 – Barra roscada
Fonte: Autoria própria.



Figura 56 – Mesa soldada
Fonte: Autoria própria.

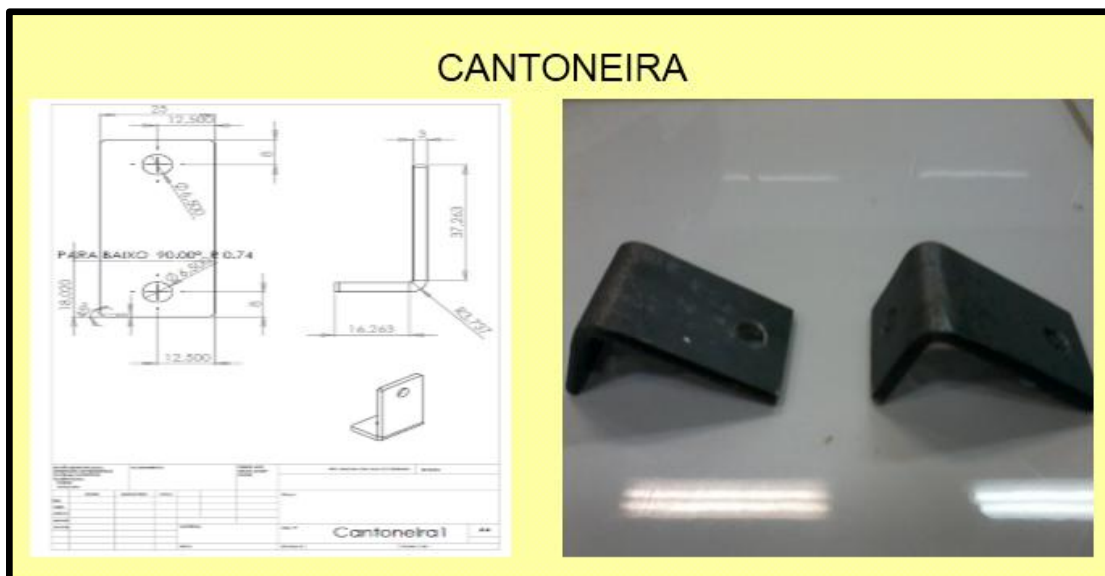


Figura 57 – Cantoneira
 Fonte: Autoria própria.

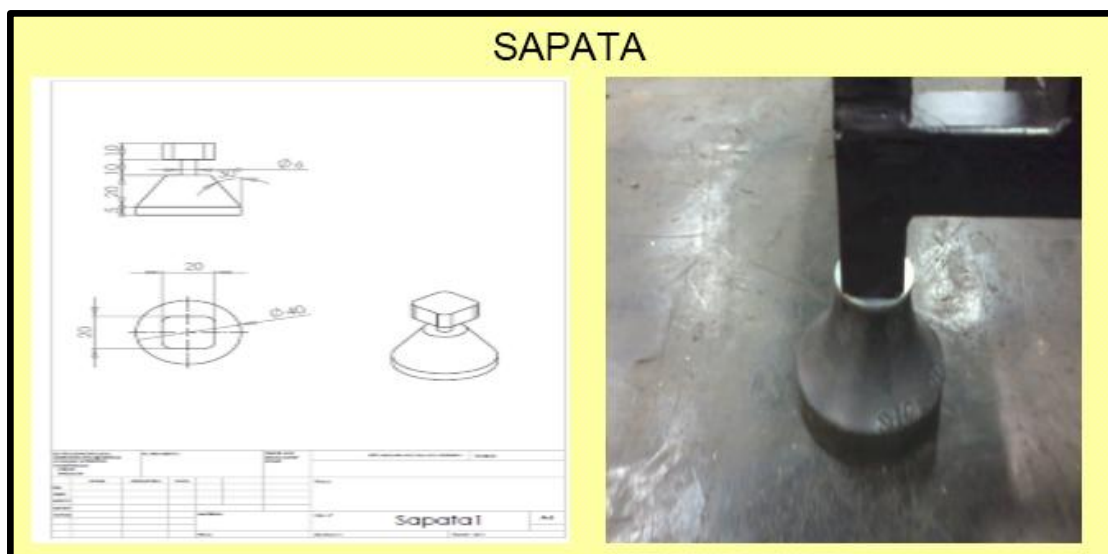


Figura 58 – Sapata
 Fonte: Autoria própria.

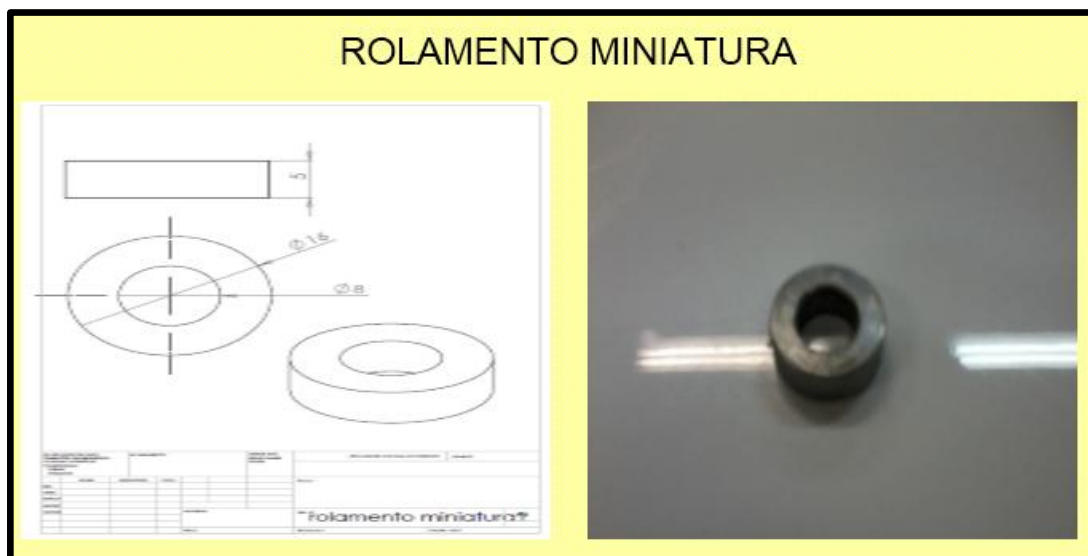


Figura 59 – Rolamento miniatura
Fonte: Autoria própria.



Figura 60 – Amostra de desgaste
Fonte: Autoria própria.



Figura 61 – Amostra de desgaste pino
Fonte: Autoria própria.

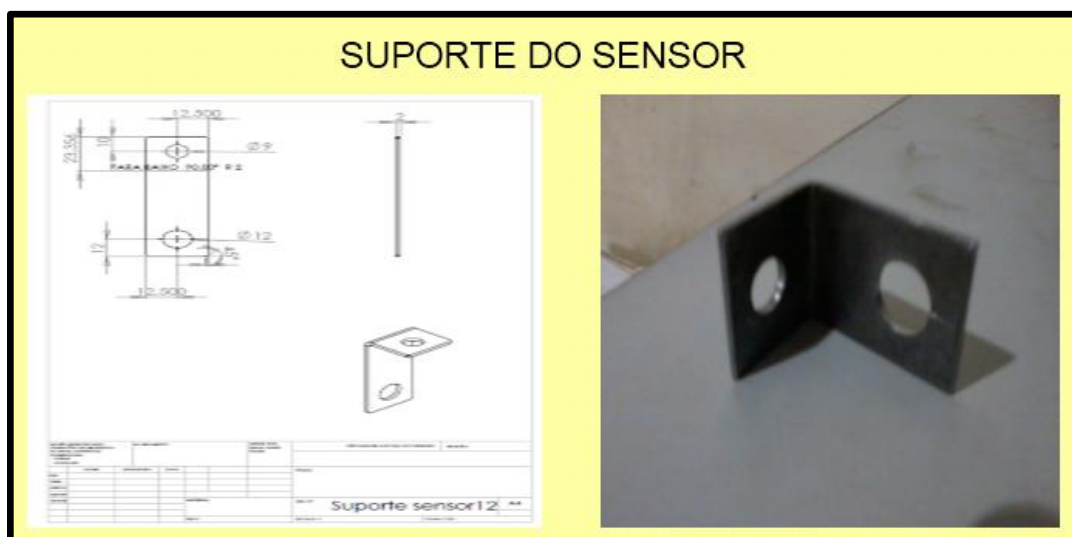


Figura 62 – Suporte do Sensor
Fonte: Autoria própria.

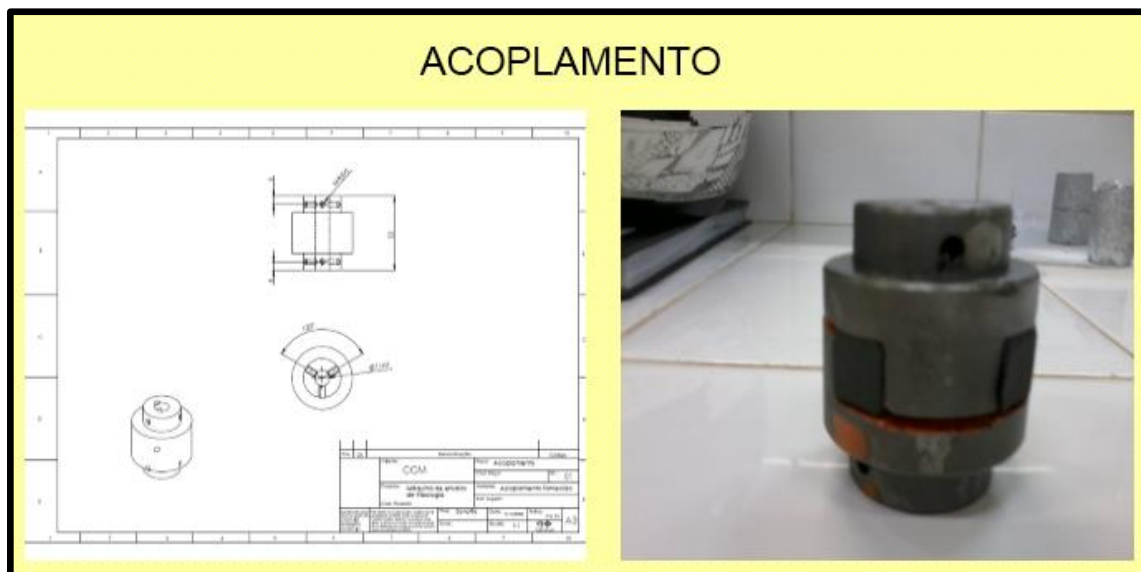


Figura 63 – Acoplamento
Fonte: Autoria própria.



Figura 64 – Rolamento referência 6904
Fonte: Autoria própria.



Figura 65 – Rolamento referência 6002
Fonte: Autoria própria.



Figura 66 – Suporte massa
Fonte: Autoria própria.



Figura 67 – Contra peso
 Fonte: Aatoria própria.

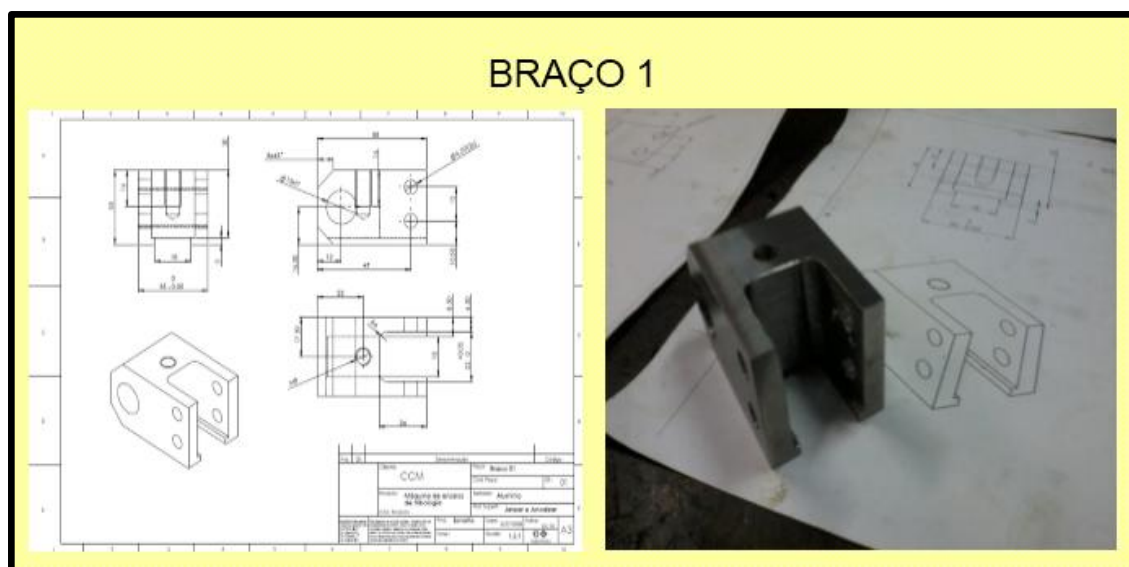


Figura 68 – Braço 1
 Fonte: Aatoria própria.

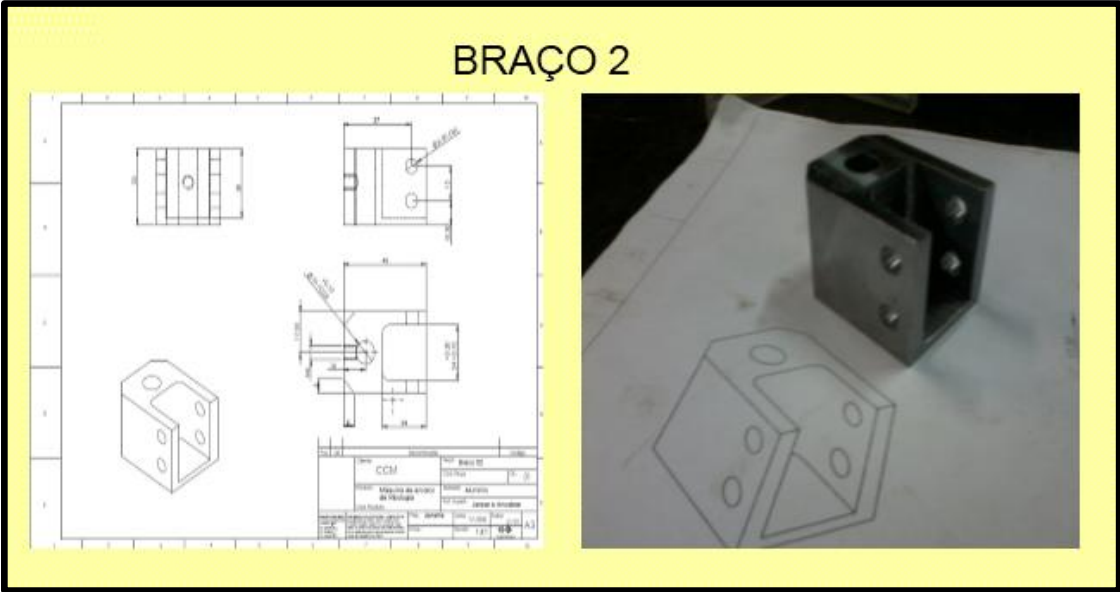


Figura 69 – Braço 2
Fonte: Autoria própria.

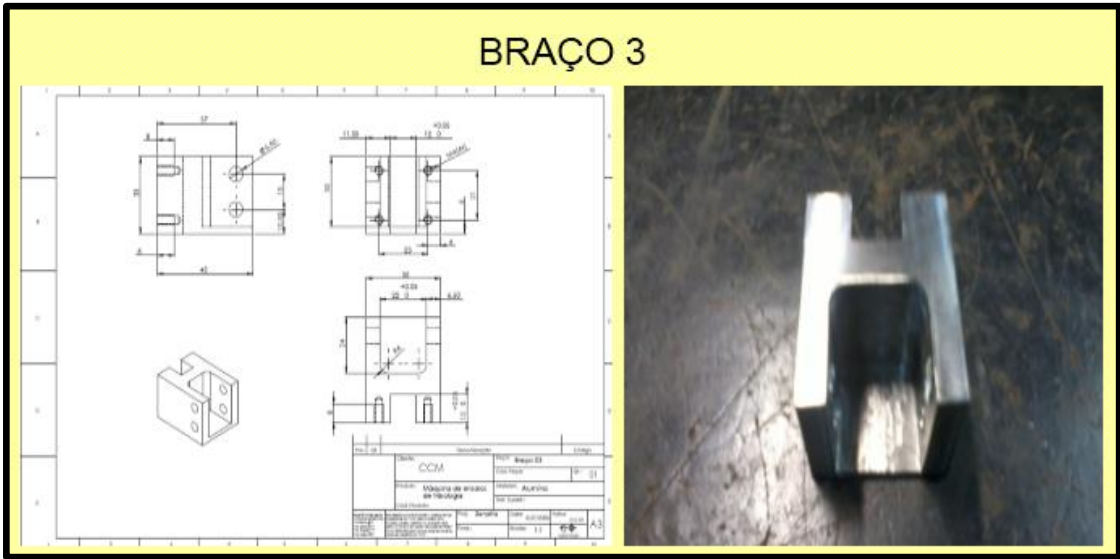


Figura 70 – Braço 3
Fonte: Autoria própria.

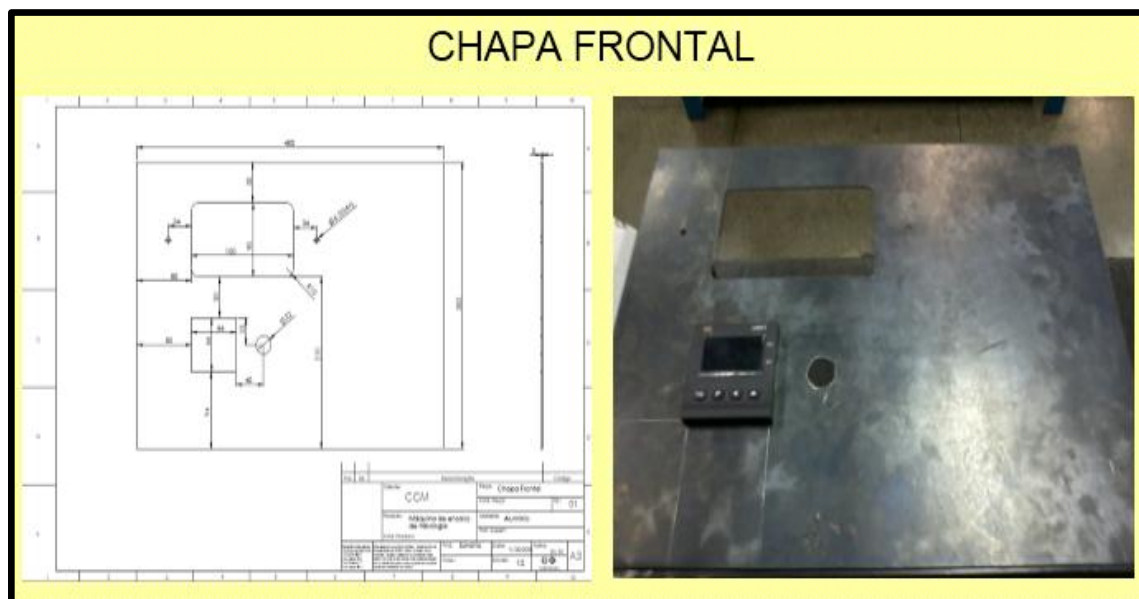


Figura 71 – Chapa frontal
Fonte: Autoria própria.

Um total de 60 peças constituintes do tribômetro já estão prontas. Ainda estão em processo final de fabricação na oficina da UTFPR - câmpus Cornélio Procópio, sete peças de geometria complexa, que necessitam de operações de fresamento e de furação para a sua fabricação. Duas guias lineares de deslizamento formam um conjunto de mais quatro peças. Essas guias lineares estão disponíveis no mercado, e o processo necessário para compra está sendo feito. Apenas uma peça, relativamente grande e de geometria complexa, deverá ser fabricada em um local especializado, devido a impossibilidade da sua fabricação na oficina com relação a disponibilidade de material, máquinas e ferramentas. O processo necessário para viabilizar a fabricação dessa peça está em andamento. Assim como o orçamento dos diversos parafusos do tribômetro. Portanto, o tribômetro encontra-se em fase final de fabricação e montagem.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho procurou mostrar a importância da tribologia em qualquer estudo de interações entre superfícies. Os testes tribológicos são parte integrante do processo de desenvolvimento, teste e seleção de materiais. Os resultados deste estudo sugerem o tribômetro modelo pino sobre disco como uma alternativa consagrada para testes modelo. Provavelmente devido a sua simplicidade e flexibilidade em termos de condição de ensaio e formato da amostra, o equipamento da configuração assimétrica pino sobre disco tornou-se um dos testes modelo mais populares para avaliação do desgaste por deslizamento, desgaste abrasivo, testes com lubrificantes, dentre outros. Após a conclusão da avaliação teórica do tribômetro pino sobre disco, avaliação do projeto e sua viabilidade, orçamento e compra dos equipamentos, compra e fabricação das peças, o equipamento está em fase final de montagem. Entretanto, estudos adicionais serão necessários para garantir o perfeito funcionamento do equipamento para os primeiros testes, assim como propor novos equipamentos para o tribômetro que possam aumentar a quantidade de dados e aumentar o controle do processo, como por exemplo equipamentos ou métodos de medição de temperatura local ou da zona de contato, equipamentos para medição da temperatura ambiente, umidade relativa do ar e também vibração.

REFERÊNCIAS

BALOTIN, J. G. **Procedimento para avaliação de materiais de atrito utilizando um tribômetro**. 2010. 83f. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

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

CAMPANHA, Marcos V. **Estudo sobre a vida útil de rolamentos fixos de uma carreira de esferas**. 2007. 138f. Dissertação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DETTOGNI, M. A. **Principais mecanismos de desgaste e avaliação de diferentes ligas para corpos moedores**. Monografia. – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

GONÇALVES, Janaina F. S. **Proposição de método de desenvolvimento de fluido de corte de base vegetal**. 2013. 223f. Tese de doutorado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

HUTCHINGS, I. M., **Tribology: friction and wear of engineering materials**, Metallurgy and material science series, Ed. Edward Arnold, 1992.

HWANG, Henry Fong; FERREIRA, Fernando Martins; PAES, Marcelo Torres Piza; TEODORO, Elias Bittencourt; FRANCO, Vera Lúcia D. S.; FRANCO, Sinésio Rodrigues. **Desenvolvimento de um tribômetro para ensaios em escala real de revestimentos de linhas flexíveis (“risers”)**. Uberlândia. 16º Simpósio de pós graduação em Engenharia Mecânica.

JOST, H. P. **Tribology - origin and future**. Wear, v. 136, 1990.

KAPP, M; BUTT, H. J. **Surface and Interfacial Forces**. Wiley – VCH, 2010

LARSEN-BASSE, J. Basic theory of solid friction. In: **ASM Handbook, 18: Friction, lubrication, and wear technology**. Ohio, 1992, pag. 27-38.

MARJANOVIC, N. Design of modern concept tribometer with circular and reciprocating Movement. **Tribology in industry**, v. 28. No. 3&4, 2006.

MORAN, MICHAEL J; SHAPIRO, HOWARD N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. LTC. 2009.

OLIVEIRA, J. F. G; ALVES, S. M. Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. **Produção**, v. 17, n. 1, 2007.

RADI, Polyana Alves; SANTOS, Lúcia Vieira; BONETTI, Luiz Francisco; AIROLDI, Vladimir J. Trava. **Estudo do coeficiente de atrito e do desgaste de titânio e de filme de dlc**. São Jose dos Campos, Anais do 12º encontro de iniciação científica do ITA, 2006.

RADI, Polyana Alves; SANTOS, Lúcia Vieira; BONETTI, Luiz Francisco; RODRIGUES, Gil Capote; AIROLDI, Vladimir J. Trava. **Tribologia conceitos e aplicações**. São José dos Campos, Anais do 13º encontro de iniciação científica e pós graduação do ITA, 2007.

RIVEROS, Zulima Vivas. **Estudio de la resistencia al desgaste de películas delgadas de Ti**. 2006. 60f. Tcc – Universidade Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2006.

SANTOS, Marcelo Braga dos. **Identificação da força de atrito através de sinais não lineares em ensaios tribológicos**. 2005. 242f. Tese de doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artiliber, 2007.

SILVA, Helder Miguel Serdoura. **Caracterização Morfológica, Mecânica e Tribológica de filmes Diamond-like Carbon**. 2013. 51f. Dissertação – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.

MACHADO, A. R; SILVA, M. B. **Usinagem dos metais**. 8ª. Versão. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

ZUM GAHR, K. H. **Microstruture and wear of materials**. Tribology Series. v. 13. Elsevier: Amsterdam, 1987.