

LUCAS FERREIRA BALDO

**ESTUDO SOBRE MECÂNICA DO CONTATO NO
DESGASTE POR DESLIZAMENTO ALTERNADO EM
UM CONTATO CILINDRO PLANO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

LUCAS FERREIRA BALDO

**ESTUDO SOBRE MECÂNICA DO CONTATO NO DESGASTE POR
DESLIZAMENTO ALTERNADO EM UM CONTATO CILINDRO PLANO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito para o título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva
Júnior

UBERLÂNDIA - MG

2019

LUCAS FERREIRA BALDO

**ESTUDO SOBRE MECÂNICA DO CONTATO NO DESGASTE POR
DESLIZAMENTO ALTERNADO EM UM CONTATO CILINDRO PLANO**

Trabalho de conclusão de curso **APROVADO**
pelo Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Jr. – UFU - Orientador

Profa. Dra. Regina Paula Garcia Santos - UFU

Prof. MSc. Vinícius Carvalho Teles - UFU

UBERLÂNDIA - MG

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por me apoiar e estar sempre ao meu lado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Washington Martins da Silva Júnior, por ter me guiado e incentivado na execução deste trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos, com os quais eu compartilhei essa trajetória.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade de realizar este curso.

Agradeço aos alunos e técnicos do Laboratório de Tribologia e Materiais que também me ajudaram na realização deste trabalho.

BALDO, L. F. **Estudo sobre Mecânica do Contato no Desgaste por Deslizamento Alternado em um Contato Cilindro Plano**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Diferentes tipos de testes de desgaste são utilizados para avaliar e melhorar o desempenho tribológico de equipamentos. Conhecer o comportamento de alguns parâmetros nesses testes é importante pra avaliar a aplicação e representatividade dos mesmos. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da pressão de contato e taxa de desgaste no teste de desgaste por deslizamento alternado utilizando o contato cilindro-plano. Essa configuração de teste é pouco utilizada quando comparada com a esfera-plano, entretanto possui algumas vantagens como: 1 - variação mais suave da pressão de contato, 2 - maior largura de contato. Essas características são benéficas no teste de revestimentos e outras modificações superficiais. A maior dificuldade na sua execução consiste em promover o alinhamento transversal entre o cilindro e a mostra. Diante disso foi desenvolvido um sistema de alinhamento. Foram realizados testes de diferentes durações para obtenção do desgaste e pressão de contato. Também foram analisados mapas triboscópicos de coeficiente de atrito e potencial de contato dos testes. Foi possível então obter as curvas de pressão de contato e taxa de desgaste ao longo dos testes, entretanto não se observou relação entre essas duas variáveis. A variação da taxa de desgaste pôde ser atribuída a outros fatores atuantes nos ensaios.

Palavras Chave: Teste de desgaste por deslizamento alternado. Contato cilindro-plano. Mecânica do contato. Triboscopia.

BALDO, L. F., **Contact Mechanics Study of a Reciprocating Cylinder on Flat Wear Test.** 2019. 46 f. Graduation Course Work, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

Different types of wear tests are used to evaluate and improve the tribological performance of equipment. Knowing the behavior of some parameters in these tests is important to evaluate their application and representativeness. The purpose of this work is to analyze the behavior of contact pressure and wear rate in the reciprocating sliding wear test using a cylinder-on-flat contact. This test configuration is little used when compared to the ball-on-flat one, however it has some advantages such as: 1 - softer variation of the contact pressure, 2 - greater contact width. These characteristics are beneficial in the testing of coatings and other surface modifications. The greatest difficulty in its execution is to promote the transversal alignment between the cylinder and the sample. An alignment system was developed. Tests of different durations were carried out to obtain wear and contact pressure. Triboscopic maps of friction coefficient and contact potential of the tests were also analyzed. It was then possible to obtain the contact pressure curves and wear rate throughout the tests; however, no relationship was found between these two variables. The variation of the wear rate could be attributed to other factors acting on the tests.

Keywords: Reciprocating sliding wear test. Cylinder-on-flat contact. Contact mechanics. Triboscopy.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a : semilargura de contato.
- β : raio de curvatura das asperidades.
- E : módulo de elasticidade.
- E^* , E' : módulo do contato.
- ψ : Índice de Plasticidade.
- H : dureza da superfície analisada.
- K : coeficiente de desgaste.
- L : comprimento do contracorpo cilíndrico.
- ν : coeficiente de Poisson.
- p_m : pressão de contato média.
- Q : volume desgastado por unidade distância deslizada.
- r : coeficiente de correlação da amostra.
- R : raio do cilindro ou da esfera.
- R^2 : coeficiente de determinação.
- ρ : coeficiente de correlação da população.
- σ : desvio padrão da distribuição de alturas da superfície.
- V : volume desgastado.
- W : carga normal.
- X , d : distância deslizada.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Contato cilindro-plano: (a) Região de contato vai de $x = -a$ até $x = a$. (b). Distribuição de pressão semi-elíptica (WILLIAMS, 1993).....5
- Figura 2.2 - Evolução do Índice de plasticidade ao longo do desgaste. Amostra de aço de baixo carbono deslizando contra uma malha de aço inoxidável. Amostras com diferentes Índices de Plasticidade iniciais (ψ) e Cargas normais (W) (GREENWOOD e WILLIAMSON, 1996 – adaptado).....8
- Figura 2.3 - Geometrias utilizadas em testes de desgaste por deslizamento. A e B: arranjos simétricos; C, D, E e F: arranjos assimétricos (HUTCHINGS, 1992 -adaptado).....10
- Figura 2.4 - Geometria do contato. a) contato conforme; b) contato não conforme (HUTCHINGS, 1992 - adaptado).....11
- Figura 2.5 - Comportamento da pressão de contato com a distância deslizada para diversos pares de materiais. Pino com raio de curvatura de 127mm contra plano. Movimento alternado com frequência de 1Hz e 25mm de curso. (AJAYI e ERCK, 2001^a - adaptado)....12
- Figura 2.6 - Taxa de desgaste em função da pressão de contato. Esfera de diâmetro 3,18mm contra disco de diâmetro 101,6 mm, ambos de aço M10. Velocidade de deslizamento:1,57 m/s. Carga: 2,2N. (AJAYI e ERCK, 2001b – adaptado).....13
- Figura 2.7 - Dureza relativa do aço M10 em função da temperatura. (AJAYI e ERCK, 2001b - adaptado).....14
- Figura 2.8 - Pressão de contato em função da distância deslizada para o contato esfera-plano e cilindro plano. Carga normal: esfera = 2 N, cilindro =545 N. Pressão de contato inicial: 820MPa para ambos. (Phoenix Tribology Ltd - adaptado).....15
- Figura 2.9 - Representação do contracorpo cilíndrico deslizando contra a amostra com insertos lubrificantes (SANTOS; COSTA; MELLO, 2015 - adaptado).....16

Figura 2.10 - Mapa triboscópico de coeficiente de atrito. Amostra com insertos de grafite. (SANTOS; COSTA; MELLO, 2015 - adaptado).....	17
Figura 3.1 - Representação esquemática do sistema de alinhamento do contracorpo cilíndrico.....	19
Figura 3.2 – Fixação da amostra no tribômetro. Parafuso de fixação da amostra ao centro. Foto feita após o ensaio.....	20
Figura 3.3 - Captura e medição da marca de desgaste do contracorpo utilizando o software do microscópio.....	21
Figura 3.4 – Mapa triboscópico de potencial de contato de um dos ensaios realizados. Potencial de contato representado em escala de cores de acordo com a posição sobre a amostra e número de ciclos.....	22
Figura 4.1 - Comportamento da pressão de contato com a distância deslizada.....	24
Figura 4.2 - Mapa triboscópico de potencial de contato: a - Teste 1, b - Teste 2, c - Teste 3. Distância deslizada de 36m.....	26
Figura 4.3 – Macrografias das amostras nos testes: a - Teste 1; b - Teste 2; c - Teste 3. Distância deslizada de 36m. Setas vermelhas indicando possível formação de tribocamada.....	26
Figura 4.4 - Volume desgastado da amostra com a distância deslizada.....	27
Figura 4.5 - Comportamento da taxa de desgaste instantânea da amostra com a pressão de contato média.....	28
Figura 4.6 - Volume desgastado do contracorpo com a distância deslizada.....	29
Figura 4.7 – Macrografias dos contracorpos nos testes: a - Teste 1; b - Teste 2; c - Teste 3. Distância deslizada de 36m.....	30

Figura 4.8 - Comportamento da Taxa de desgaste do contracorpo com a Pressão de contato média.....31

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constantes empíricas para variação da pressão de contato obtidas para diferentes pares de materiais (Ajayi e Erck, 2001 ^a – adaptado).....	13
Tabela 2.2 - Tensão de contato de Hertz para contra corpo esférico (diâmetro=10mm) e cilíndrico (diâmetro 9 mm e comprimento 9 mm) (GONÇALVES JR, J. L., 2016).....	16
Tabela 3.1 - Materiais utilizados nos testes de desgaste.....	18
Tabela 3.2 - Esquema dos ensaios realizados.....	20
Tabela 4.1 - Pressão de contato média.....	23
Tabela 4.2 - Desgaste da amostra.....	24
Tabela 4.3 – Taxa de desgaste instantânea em função da pressão de contato.....	27
Tabela 4.4 - Desgaste do contracorpo.....	29

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - Introdução	1
CAPÍTULO 2 - Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Contato entre superfícies.....	3
2.1.1. Contato cilindro-plano	4
2.1.2. Contato esfera-plano	6
2.1.3. Contato a nível microscópico	6
2.2. Desgaste por deslizamento	8
2.2.1. Avaliação da pressão de contato ao longo do desgaste.....	11
2.2.2. Testes de desgaste utilizando contato cilindro-plano	14
CAPÍTULO 3 - Metodologia	18
3.1. Materiais.....	18
3.2. Sistema de alinhamento do contracorpo cilíndrico.....	19
3.3. Testes de desgaste	19
3.4 Avaliação dos resultados.....	21
CAPÍTULO 4 - Resultados	23
4.1. Pressão de contato.....	23
4.2. Desgaste da amostra.....	24
4.3. Desgaste do contracorpo.....	28
CAPÍTULO 5 - Conclusões	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O entendimento do desgaste é extremamente importante no desenvolvimento de produtos de engenharia, já que o mesmo é o principal responsável pelos custos de manutenção e substituição de equipamentos, assim como redução da disponibilidade e eficiência dos mesmos. Em 1966, um relatório feito pelo governo do Reino Unido, estimou que 1% do produto nacional bruto poderia ser salvo com um pequeno investimento em pesquisas sobre atrito, desgaste e lubrificação. Nesse relatório a palavra “tribologia” foi cunhada como a ciência que estuda essas três áreas em conjunto (HUTCHINGS, 1992). Jost (1990) menciona que novos estudos apontam para ganhos entre 1,3% e 1,6%.

Durante o desgaste de mancais e outras superfícies de engenharia, podem ocorrer grandes alterações topográficas, mudando a natureza do contato, levando por exemplo à alteração da proporção de deformação plástica e elástica, como descrito por Greenwood e Williamson (1996). Além disso, podem ocorrer mudanças no tipo de desgaste que ocorrerá, seja ele adesivo, abrasivo, oxidativo ou a combinação deles. Tais alterações modificam o coeficiente de atrito e a própria evolução do desgaste, sendo, portanto, objeto de estudo da tribologia e engenharia de superfícies.

Testes de laboratório são frequentemente utilizados no desenvolvimento de superfícies de engenharia, e muitas vezes incluem o teste de modificações topográficas como o brunimento ou texturização. Por exemplo, vários trabalhos apontam para o desempenho de superfícies funcionais em motores de combustão interna que operam com movimento alternado (SILVA; COSTA, 2017). Outro ponto importante é a geometria do contato que pode interferir na tensão de contato e, conseqüentemente, no desgaste (quando seco) e/ou regime de lubrificação (WILLIAMS, 2005).

A utilização de contracorpo cilíndrico apresenta vantagens em relação ao esférico, o mais utilizado atualmente, tais como: 1 - a menor pressão de contato inicial, evitando a

destruição da modificação superficial logo no início do teste; 2 - o contato linear ao invés do pontual, permitindo a avaliação do comportamento global de alterações superficiais, principalmente aquelas de grande dimensão, como a texturização ou insertos de lubrificantes sólidos, entre outras (SANTOS; COSTA; MELLO, 2015).

Durante esse tipo de teste, ocorre uma redução da pressão de contato média devido ao desgaste que altera a geometria do contato de não conforme para conforme, gerando uma superfície de desgaste crescente no contra corpo. Essa superfície de desgaste será medida ao longo do teste, permitindo a construção de uma curva da pressão de contato ao longo do teste. A partir dessa curva será possível analisar como a pressão de contato influencia na taxa de desgaste. Também serão analisadas mudanças no potencial de contato.

O objetivo deste trabalho é melhorar o desempenho tribológico de superfícies. Para tanto será feita uma análise de como a pressão de contato interfere no desgaste. Os resultados obtidos poderão ser aplicados no teste e desenvolvimento de novas modificações superficiais com a finalidade de melhorar o desempenho desses sistemas. O tipo de teste estudado é adequado para modificações superficiais como brunimento e texturização.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são apresentados conceitos sobre contato entre superfícies, seja ele macroscópico ou microscópico. A nível macroscópico, analisa-se o contato cilindro-plano, objeto desse trabalho, e o esfera-plano, o qual é frequentemente utilizado em testes de desgaste. Essas duas configurações são comparadas através de dados na literatura. A principal comparação é quanto a mudança da área e a pressão de contato que ocorre ao decorrer dos testes de desgaste.

2.1. Contato entre superfícies

Quando duas superfícies estão em contato e são submetidas a um carregamento, ocorrem interações entre as mesmas, gerando deformações elasto-plásticas em ambas e, conseqüentemente, ao aparecimento de tensões na interface. Essas distorções são geradas pela não conformidade das superfícies e podem ser analisadas em duas escalas. A primeira é macroscópica e compreende a forma, como por exemplo o contato cilindro-plano, o qual será analisado posteriormente. Já a segunda é microscópica, compreendendo ondulação e rugosidade, e pode ser representada pelo contato entre duas asperidades (WILLIAMS, 1993). É importante lembrar que essas escalas são arbitrárias e que todas as superfícies possuem um espectro de topografia contínuo, embora na maioria dos casos, alguns comprimentos de onda sejam predominantes.

Para superfícies com o mesmo raio e centro de curvatura, como por exemplo duas superfícies planas, o contato entre ambas é denominado conforme. Nesse caso a área de contato aparente se estende por toda extensão da menor superfície e a pressão de contato nominal é constante. Entretanto, mesmo no contato conforme (do ponto de vista

macroscópico), o carregamento é suportado apenas pelos picos de algumas asperidades, fazendo com que a área de contato aparente seja bem menor que a real.

Já no contato entre superfícies com diferentes raios de curvatura (esfera e plano por exemplo) ou centros de curvatura não coincidentes (contato entre duas esferas), a área de contato aparente é bem menor que a área da menor superfície, levando a pressões nominais de contato bem maiores que no contato conforme. O principal modelo que descreve o contato entre superfícies não conformes foi proposto por Hertz, considerando uma distribuição de pressão semi-elíptica na interface de contato efetivo (WILLIAMS, 1993). Existem vários tipos de padrões de contato não conforme, dentre eles: esfera-esfera, cilindros paralelos, cilindros perpendiculares, cilindro-plano e esfera-plano. Esses dois últimos serão descritos nesse trabalho devido a aplicação nos testes de desgaste que serão estudados.

2.1.1. Contato cilindro-plano

No sistema cilindro-plano o contato se dá inicialmente através de uma linha cujo comprimento L é igual ao do cilindro. Com a aplicação de carga normal a deformação de ambas superfícies dá origem a um retângulo de semilargura a (Fig. 2.1a). A distribuição de pressão é dada pela Eq. (2.1), que descreve a pressão variando de zero nas bordas do contato ($x = \pm a$) até um valor máximo p_0 no centro ($x = 0$), conforme mostrado na Fig. 2.1b.

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - x^2/a^2} \quad (2.1)$$

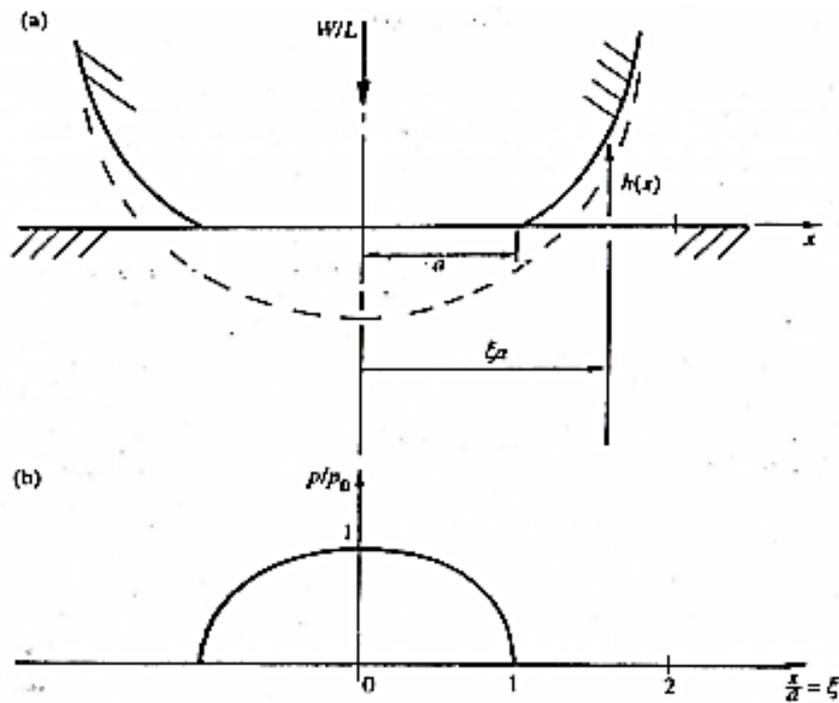


Figura 2.1 - Contato cilindro-plano: (a) Região de contato vai de $x = -a$ até $x = a$. (b). Distribuição de pressão semi-elíptica (WILLIAMS, 1993).

A semilargura a é dada pela Eq. (2.2):

$$a^2 = \frac{4WR}{L\pi E^*} \quad (2.2)$$

onde W é a carga normal, R o raio do cilindro, L o comprimento e E^* o módulo do contato dado pela relação:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2.3)$$

onde E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade e ν_1 e ν_2 os coeficientes de Poisson de cada um dos corpos em contato.

A pressão média do contato é:

$$p_m = \frac{W}{2aL} \quad (2.4)$$

2.1.2. Contato esfera-plano

No caso do contato esfera-plano o contato acontece inicialmente em um ponto e com a aplicação de carga normal este se transforma em uma circunferência de raio a . A distribuição de pressão também é semi-elíptica, sendo o centro da circunferência o ponto de pressão máxima.

A semilargura a é dada por:

$$a^3 = \frac{3WR}{4E^*} \quad (2.5)$$

sendo que W é a carga normal, R o raio da esfera e E^* o módulo do contato, dado pela Eq. (2.3).

A pressão média do contato é:

$$p_m = \frac{W}{\pi a^2} \quad (2.6)$$

2.1.3. Contato a nível microscópico

Devido à rugosidade inerente à todas as superfícies, a área real de contato é bem menor do que a aparente, sendo os picos das asperidades mais altas responsáveis por suportar a carga (GREENWOOD e WILLIAMSON, 1996). Os primeiros modelos de contato se baseavam na teoria de Hertz aplicada à microescala, entretanto esse modelo se mostrou incorreto pois não levava em consideração a deformação plástica das asperidades. O modelo proposto a seguir por Holm considerava que a tensão local no pico das asperidades era muito alta, fazendo com que as mesmas sofressem exclusivamente deformação plástica, sendo, portanto, a pressão de contato sempre igual ao limite de escoamento do material. De acordo com esse modelo a área real de contato sempre é a razão entre carga e limite de escoamento, independentemente da rugosidade ou área aparente de contato. Tais implicações também são desacreditadas pelo fato de que superfícies mais rugosas tendem a sofrer uma maior quantidade de deformação plástica, resultando em uma maior taxa de desgaste.

Como considerar a deformação das asperidades exclusivamente elástica ou exclusivamente plástica se mostrou inadequado, Greenwood e Williamson (1996) propuseram um modelo que levou em consideração a distribuição de altura das asperidades para estimar a proporção de deformação plástica e elástica que ocorre no contato entre duas superfícies.

Esse modelo, considera a distribuição de alturas da superfície gaussiana e o raio de curvatura das asperidades constante. O índice que determina a proporção de deformação plástica que ocorre no contato é denominado Índice de Plasticidade (ψ), dado pela Eq. (2.7):

$$\psi = \frac{E'}{H} \sqrt{\frac{\sigma}{\beta}} \quad (2.7)$$

Onde:

E' : módulo do contato, definido anteriormente

H : dureza da superfície analisada

σ : desvio padrão da distribuição de alturas da superfície

β : raio de curvatura das asperidades.

Para $\psi < 0,6$ o contato é predominantemente elástico e para $\psi > 1$, predominantemente plástico. Valores intermediários indicam que parte das asperidades se deformam plasticamente e parte elasticamente.

Analisando a Eq. (2.7) percebe-se que o Índice de Plasticidade depende apenas das propriedades dos materiais e características da superfície, não tendo relação com a carga ou área de contato aparente. Assim, para a maioria dos casos, o aumento da carga não provoca transição do regime elástico para o plástico.

A área de contato real continua sendo proporcional à carga, entretanto a constante de proporcionalidade deixa de ser a dureza e passa a ser a “dureza elástica”, que nada mais é que o produto da dureza pelo Índice de Plasticidade.

A relação entre Índice de Plasticidade e rugosidade da superfície permite explicar porque superfícies rugosas apresentam uma redução da taxa de desgaste com o tempo no desgaste por deslizamento. No início do desgaste a rugosidade elevada faz com que o contato seja predominantemente plástico. A medida que o desgaste ocorre, o achatamento dos picos leva à redução do desvio padrão da distribuição de alturas σ e aumento do raio de curvatura β , fazendo com que o Índice de Plasticidade diminua (Fig. 2.2). Assim, torna-se importante no estudo do desgaste, a avaliação não só da topografia inicial, mas também como ela varia durante o processo de desgaste.

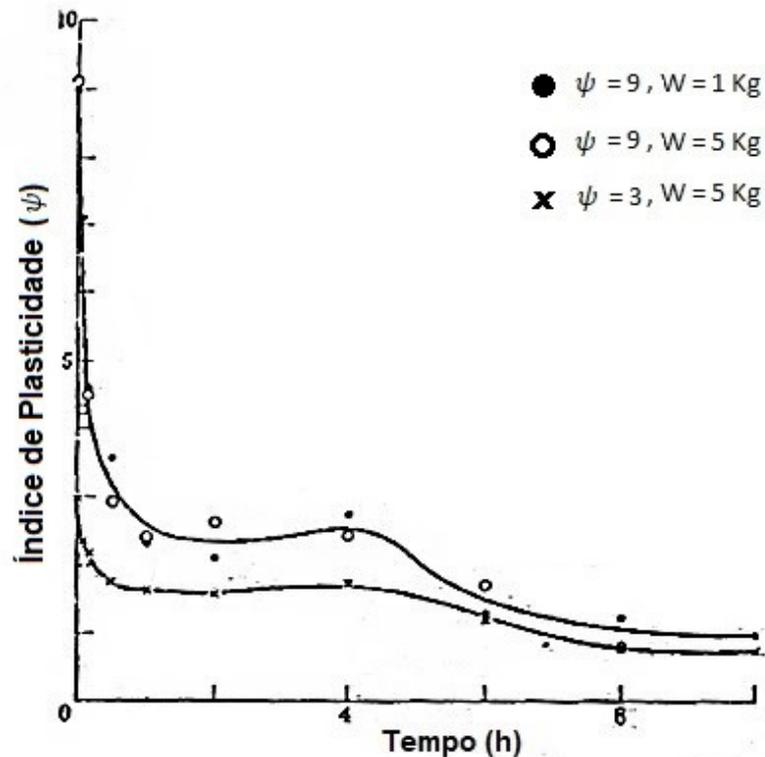


Figura 2.2 - Evolução do Índice de Plasticidade ao longo do desgaste. Amostra de aço de baixo carbono deslizando contra uma malha de aço inoxidável. Amostras com diferentes Índices de Plasticidade iniciais (ψ) e Cargas normais (W) (GREENWOOD e WILLIAMSON, 1996 – adaptado).

2.2. Desgaste por deslizamento

Desgaste por deslizamento é aquele que ocorre quando duas superfícies deslizam uma contra a outra. Pode ou não haver a presença de um elemento interfacial (lubrificante), cuja função é reduzir o atrito e desgaste entre as superfícies. Não está incluso nessa classificação o desgaste decorrente da presença de partículas duras entre as superfícies. Esse outro tipo é denominado desgaste abrasivo (HUTCHINGS, 1992).

O desgaste por deslizamento ocorre devido à combinação de três mecanismos de desgaste: adesão, fadiga superficial e reação triboquímica. A participação de cada um desses mecanismos depende do tribo-sistema em questão, resultando assim numa determinada taxa de desgaste. A medida que o desgaste ocorre, o tribo-sistema é alterada, podendo levar a grandes variações da taxa de desgaste e coeficiente de atrito com o tempo (ZUM GAHR, 1987).

Para descrever o desgaste por deslizamento, Holm e Archard propuseram uma teoria que considera que as asperidades das superfícies em contato são esféricas e que apenas uma determinada proporção delas suporta o carregamento e se desgasta por deformação plástica. O desenvolvimento dessa teoria resulta na equação de Archard - Eq. (2.8):

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (2.8)$$

na qual Q é o volume desgastado por unidade distância deslizada, W o carregamento normal, H a dureza da superfície mais mole e K o coeficiente de desgaste (adimensional). (HUTCHINGS, 1992).

O coeficiente K indica a severidade do processo de desgaste. Embora ele represente a proporção de asperidades em contato que sofrem deformação plástica, também pode-se interpretá-lo como o número de ciclos necessários para que parte de uma asperidade seja removida por fadiga, mostrando assim a flexibilidade da equação em incluir outros mecanismos de desgaste. O coeficiente K também pode ser interpretado como constante de proporcionalidade entre a área aparente de contato e a área real de contato que sofre deformação plástica (W/H) (HUTCHINGS, 1992).

Diferentes tipos de testes em laboratório são utilizados para estudar o desgaste por deslizamento. O equipamento utilizado nesses testes é denominado tribômetro e tem como objetivo promover as variáveis de entrada do processo, como movimento relativo e carga normal, e também medir as variáveis de saída, como força de atrito. A primeira classificação que pode ser feita dos tipos de testes é quanto ao arranjo das superfícies de deslizamento: elas podem ser simétricas, promovendo uma taxa de desgaste igual em ambas, caso elas sejam de um mesmo material, ou o arranjo pode ser assimétrico, levando quase sempre a taxas de desgaste diferentes entre o corpo e contracorpo. Na Fig. 2.3, A e B representam arranjos simétricos e os outros são assimétricos (HUTCHINGS, 1992).

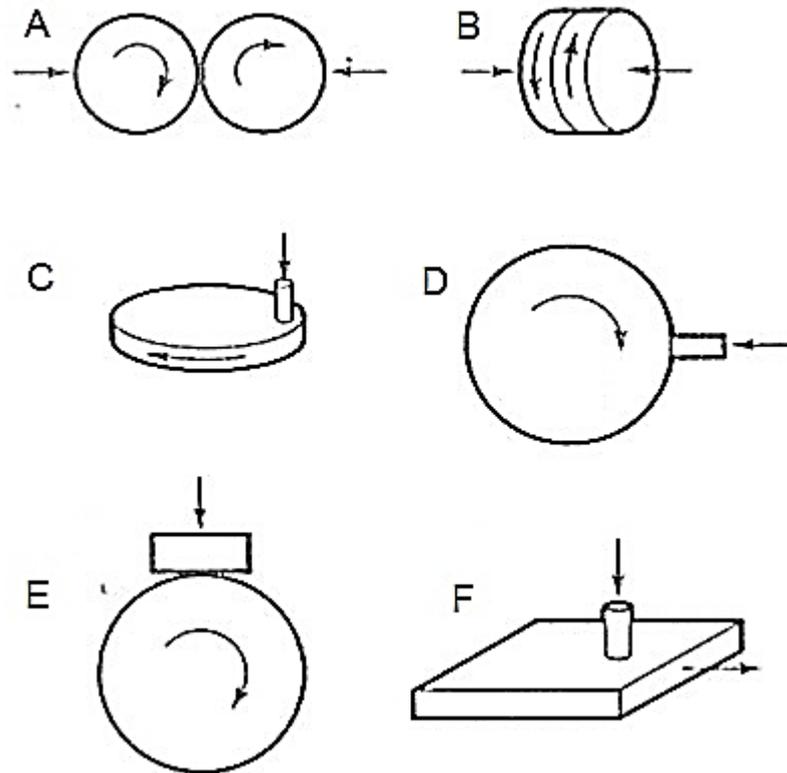


Figura 2.3 - Geometrias utilizadas em testes de desgaste por deslizamento. A e B: arranjos simétricos; C, D, E e F: arranjos assimétricos (HUTCHINGS, 1992 - adaptado).

Os testes também podem ser classificados quanto ao movimento, sendo contínuo ou alternado. No primeiro a velocidade de deslizamento é usualmente constante durante o ensaio, podendo ser variada mediante alteração da rotação no tribômetro. Já nos testes de deslizamento alternado, a velocidade varia de zero (nas extremidades da trilha de desgaste), até a máxima (no centro), a cada ciclo. Esse tipo de teste promove grandes variações das condições tribológicas e sua análise é muito beneficiada pelo uso da técnica de triboscopia.

Por fim, outra importante forma de classificação dos testes de desgaste é quanto à geometria do contato, que pode ser conforme ou não conforme. A Fig. 2.4 (a) representa contatos conformes e a Fig. 2.4 (b) contatos não conformes.

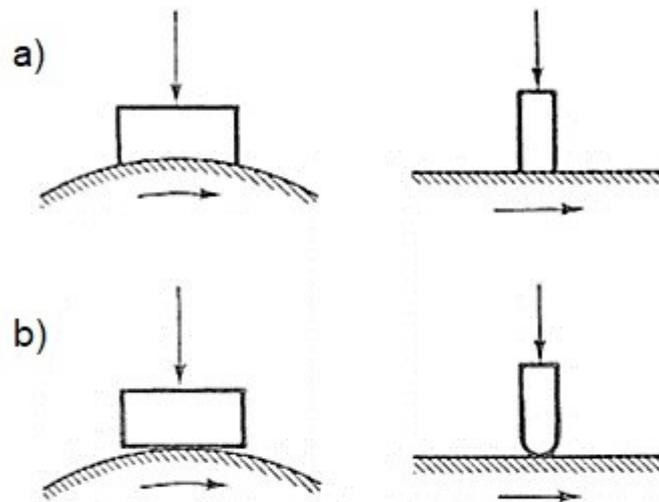


Figura 2.4 - Geometria do contato. a) contato conforme; b) contato não conforme (HUTCHINGS, 1992 - adaptado).

Para o contato conforme a pressão nominal de contato é constante no decorrer teste, já que a área de contato aparente não é alterada. Por outro lado, em testes utilizando contato não conforme, há uma grande variação da pressão nominal de contato. No início do teste, quando corpo e contra corpo ainda não sofreram desgaste, o contato pode ser descrito pelos modelos de Hertz, resultando em uma pequena área de contato, e, conseqüentemente, elevada pressão média de contato. A medida que o desgaste ocorre o contato se transforma em conforme, com diminuição abrupta da pressão média de contato.

O estudo do desgaste por deslizamento utilizando geometria não conforme permite observar mudanças no contato que passa de conforme para não conforme, alterando assim a área e pressão de contato. Avaliar o desgaste sob estas condições pode permitir correlacionar o desgaste e atrito com a pressão de contato.

2.2.1. Avaliação da pressão de contato ao longo do desgaste

No desgaste por deslizamento com contato não-conforme, há uma diminuição da pressão de contato com o tempo à medida que o desgaste ocorre. Conhecer como essa variação ocorre é essencial para o melhor entendimento dos mecanismos de desgaste que estão atuando, assim como a influência dos mesmos na taxa de desgaste. A Fig. (2.5) mostra como ocorre essa variação para o contato esfera plano e diversos pares de materiais (AJAYI e ERCK, 2001a).

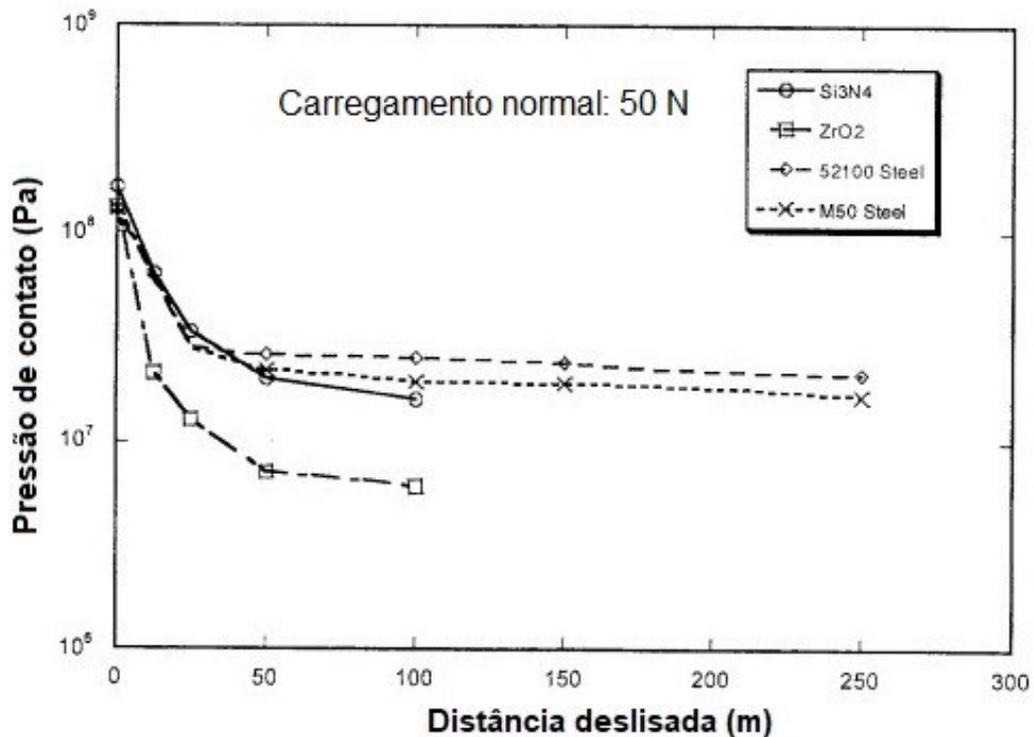


Figura 2.5 - Comportamento da pressão de contato com a distância deslizada para diversos pares de materiais. Pino com raio de curvatura de 127mm contra plano. Movimento alternado com frequência de 1Hz e 25mm de curso. (AJAYI e ERCK, 2001^a - adaptado)

A relação empírica para a variação da pressão de contato com a distância deslizada tem a seguinte forma:

$$P_n = \beta P_m d^{-k} \quad (2.9)$$

Onde P_n é a pressão de contato nominal, P_m é a pressão de contato de Hertz média no início do teste, d a distância deslizada, e β e k constantes empíricas obtidas para o experimento em questão.

A constante β depende da quantidade total de desgaste obtida durante o teste, sendo que valores maiores indicam uma taxa de desgaste média menor. Já a constante k está relacionada com a variação da taxa de desgaste. Para $k = 0.5$ a taxa de desgaste é constante. Quando $k < 0.5$ a taxa de desgaste diminui com o tempo e quando $k > 0.5$ a mesma aumenta com o tempo. A Tab. 2.1 mostra as constantes obtidas para diferentes pares de materiais.

Tabela 2.1 – Constantes empíricas para variação da pressão de contato obtidas para diferentes pares de materiais (Ajayi e Erck, 2001^a – adaptado).

Par de material	Seco		Lubrificante sólido		Óleo lubrificante	
	β	k	β	k	β	k
SiC	0.025	0.323	-	-	-	-
Si ₃ N ₄	0.066	0.429	0.08	0.446	0.288	0.346
ZrO ₂	0.171	1.466	-	-	0.161	1.207
Aço 52100	0.099	0.568	-	-	0.331	0.221
Aço M50	0.0386	0.331	-	-	0.294	0.236

Nota-se que para o aço 52100 a presença de lubrificante não só diminuiu a taxa de desgaste média, mas fez com que a mesma diminuísse com o tempo, comprovando que a eficiência da lubrificação depende da pressão de contato.

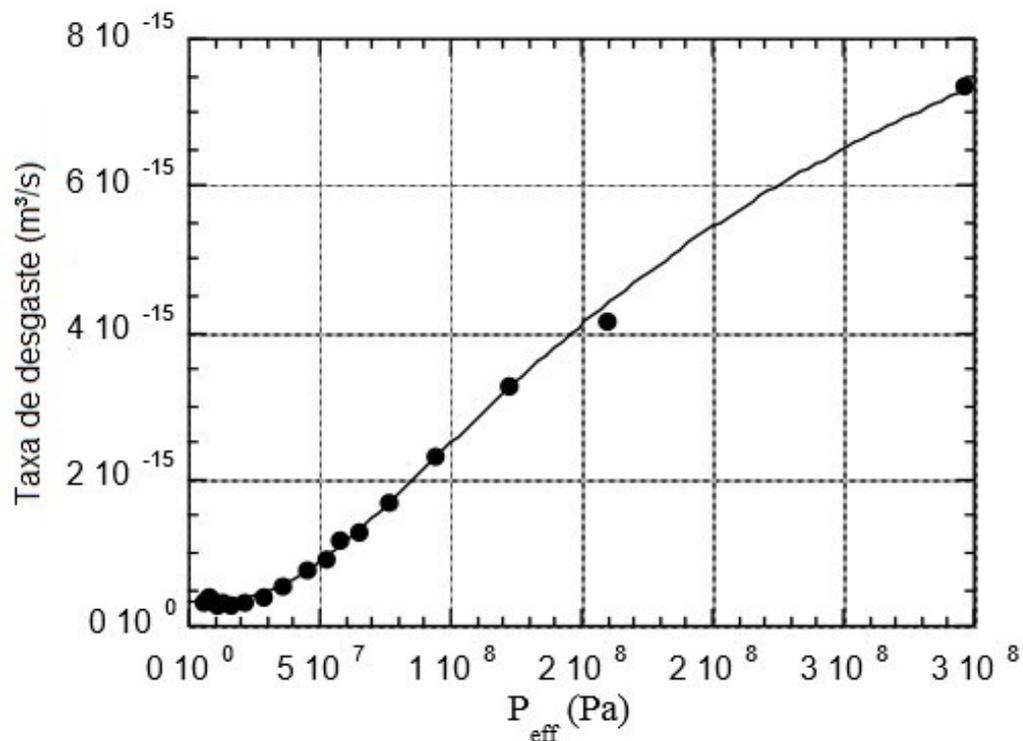


Figura 2.6 - Taxa de desgaste em função da pressão de contato. Esfera de diâmetro 3,18mm contra disco de diâmetro 101,6 mm, ambos de aço M10. Velocidade de deslizamento: 1,57 m/s. Carga: 2,2N. (AJAYI e ERCK, 2001b – adaptado).

A Fig. 2.6 apresenta o comportamento da taxa de desgaste em função da pressão de contato para o aço M-10 não lubrificado. Nesse caso o aumento da taxa de desgaste está associado com a redução da dureza com a temperatura (Fig. 2.7), já que uma pressão maior para uma mesma carga significa uma menor área para dissipação do calor.

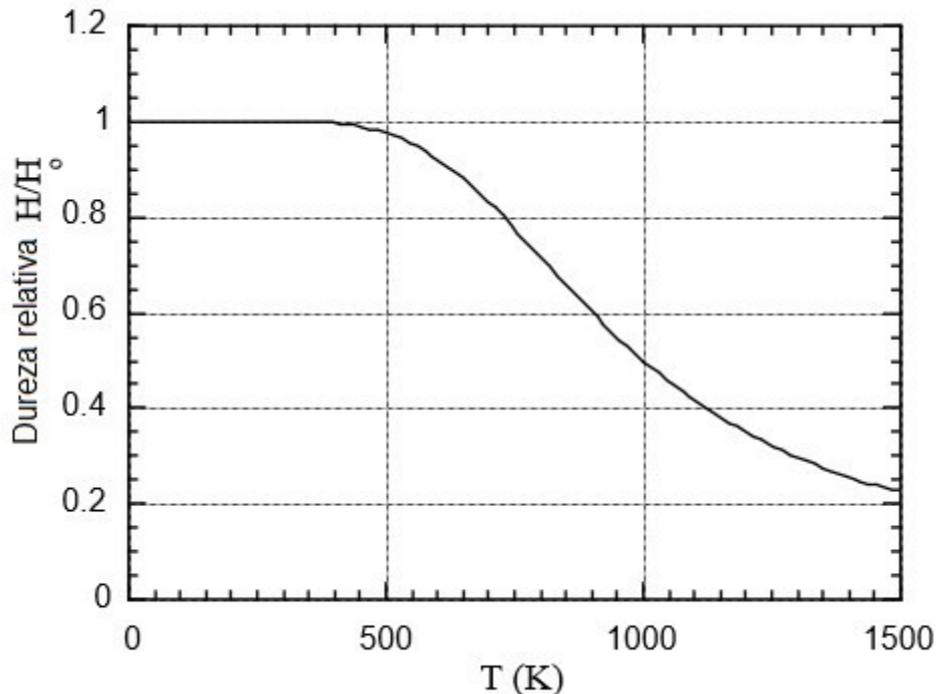


Figura 2.7 - Dureza relativa do aço M10 em função da temperatura. (AJAYI e ERCK, 2001b - adaptado).

2.2.2. Testes de desgaste utilizando contato cilindro-plano

Testes de desgaste do tipo esfera contra plano têm sido utilizados há um longo tempo (a norma ASTM G133 o padroniza desde 1995). Na verdade, eles foram criados antes mesmo de se tivesse conhecimento sobre mecânica do contato (Phoenix Tribology Ltd). Uma das principais vantagens desse tipo de teste é a dispensa de alinhamento entre o contra corpo e a amostra, que consiste um fator crítico em outros testes, como o pino contra disco.

A principal característica desse tipo de contato é a elevada pressão de contato inicial e queda abrupta da mesma à medida que o desgaste ocorre. O gráfico da Fig. 2.8 apresenta o comportamento da pressão de contato em função do volume desgastado para o contato esfera-plano e cilindro-plano.



Figura 2.8 - Pressão de contato em função da distância deslizada para o contato esfera-plano e cilindro plano. Carga normal: esfera = 2 N, cilindro = 545 N. Pressão de contato inicial: 820MPa para ambos. (Phoenix Tribology Ltd - adaptado).

Observa-se que, partindo de uma pressão inicial de 820 Mpa, o contato esfera plano tem a pressão média do contato reduzida para valores próximos de zero com um pequeno volume de desgaste. Assim, para que se possa obter uma pressão média de contato em regime seria necessária uma pressão inicial tão alta que geraria um sulco na amostra assim que o teste fosse iniciado. De fato, nos testes utilizando contato esfera-plano esse pequeno sulco é gerado. Os níveis de pressão gerados nesse tipo de teste não são encontrados em nenhuma aplicação de engenharia (Phoenix Tribology Ltd).

Por outro lado, o contato cilindro-plano apresenta uma redução da pressão mais gradual. Assim é possível utilizar cargas que irão gerar uma pressão de contato satisfatória ao longo do teste, e que ainda assim não levarão à falha da superfície logo no início do teste. Isso pode significar uma grande vantagem para esse tipo de teste, principalmente quando deseja-se observar o comportamento de uma camada bastante superficial, como no caso de alguns revestimentos.

GONÇALVES JR (2016) utilizou um contra corpo cilíndrico para testar revestimentos e texturizações para cilindros de laminação. A justificativa para escolha dessa configuração é a menor pressão de contato inicial quando comparado com o contra corpo esférico, permitindo assim a utilização de cargas normais maiores (Tab. 2.2).

Tabela 2.2 - Tensão de contato de Hertz para contra corpo esférico (diâmetro=10mm) e cilíndrico (diâmetro 9 mm e comprimento 9 mm) (GONÇALVES JR, J. L., 2016).

	Esférico			Cilíndrico
Carga Normal (N)	29,00	50,00	100,00	100,00
Pressão de Contato (GPa)	0,60	0,70	2,80	0,17

O uso de contra corpo cilíndrico também é adequado em testes de materiais com insertos de lubrificante sólido de grandes dimensões. Cilindros de bronze com insertos de compósito de polímero e grafite foram testados utilizando inicialmente contra corpo esférico. Devido ao contato pontual, a marca de desgaste gerada na direção perpendicular ao deslizamento era menor que os insertos, levando ao destacamento parcial dos mesmos. O problema pôde ser contornado com o uso de contra corpo cilíndrico (Fig. 2.9) com comprimento maior que o dos insertos (SANTOS; COSTA; MELLO, 2015).

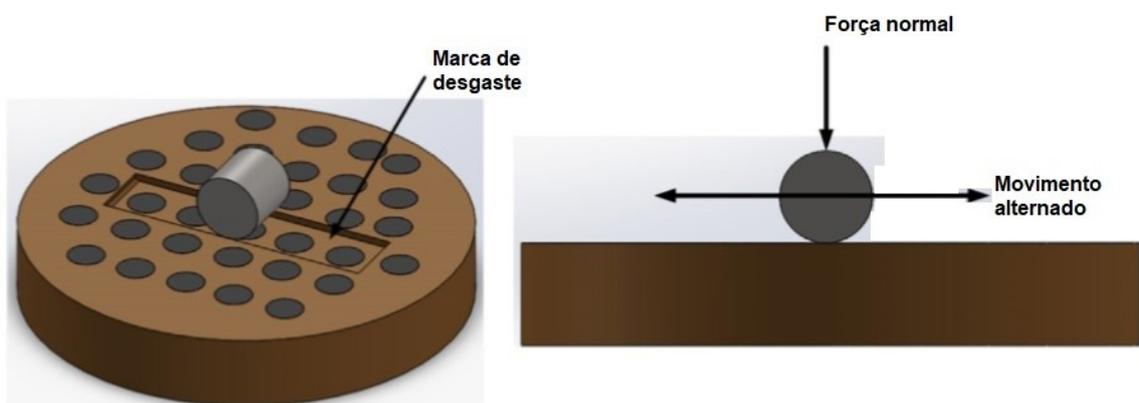


Figura 2.9 - Representação do contracorpo cilíndrico deslizando contra a amostra com insertos lubrificantes (SANTOS; COSTA; MELLO, 2015 - adaptado).

Uma importante técnica denominada triboscopia é frequentemente utilizada para analisar os resultados obtidos em testes tribológicos. Ela consiste na representação gráfica tridimensional da variável analisada. No caso dos testes de deslizamento alternado a variável de interesse é representada por cores no eixo Z, enquanto o eixo Y representa a posição do contra corpo e o eixo X, o número de ciclos ou distância deslizada.

A Figura 2.10 é o mapa triboscópico de um dos testes utilizando insertos de grafite acima descrito. Nele é possível perceber que o coeficiente de atrito varia tanto com a distância deslizada, sendo maior no início do teste, quanto com a posição do contracorpo, sendo menor nos locais que possuem os insertos.

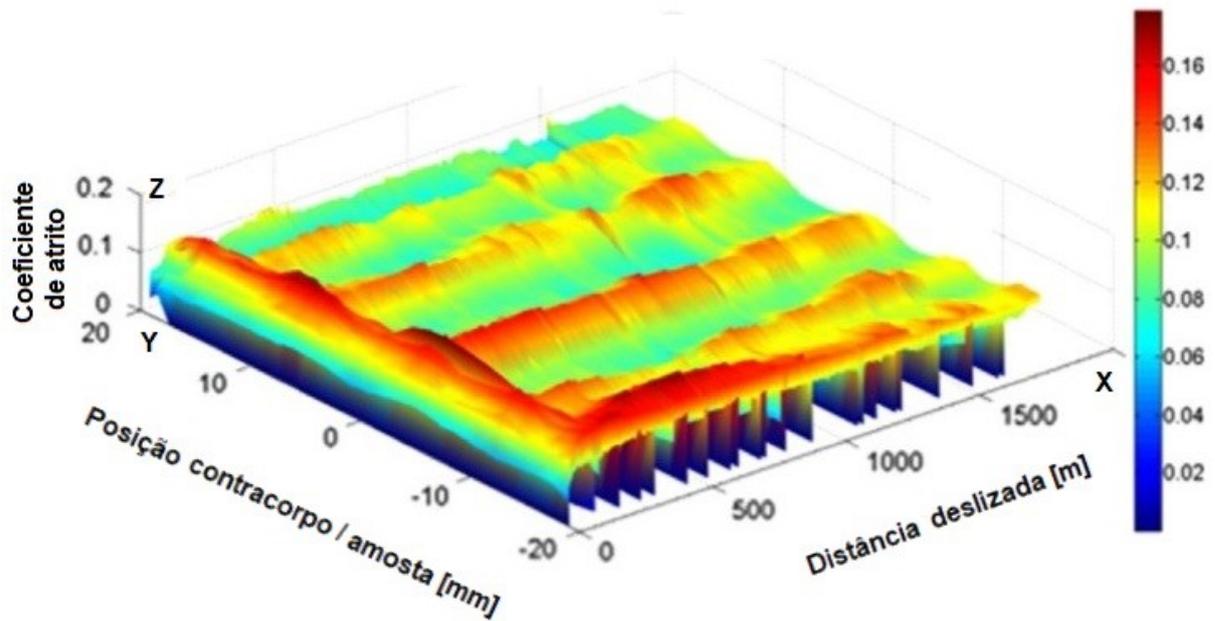


Figura 2.10 - Mapa triboscópico de coeficiente de atrito. Amostra com insertos de grafite. (SANTOS; COSTA; MELLO, 2015 - adaptado).

Os testes de desgaste de laboratório acima mencionados são uma forma simplificada de representar uma aplicação real. Devido à essa simplificação é necessário conhecer as características de operação dos mesmos, sendo possível assim entender seus limites de aplicação e representatividade. Uma das variáveis de influência estudadas é a pressão de contato entre corpo e contra corpo. Existem na literatura alguns estudos desse tipo (AJAYI e ERCK, 2001a) envolvendo contra corpo esférico, mas não com contra corpo cilíndrico.

O objetivo principal do presente trabalho é analisar a variação da pressão de contato em testes de desgaste com movimento alternado na configuração cilindro contra plano, e a influência da mesma na taxa de desgaste. Serão realizados testes com carga e frequência constantes, mas com duração variável. A pressão de contato para cada teste será calculada por meio da medição da superfície de desgaste formada no contracorpo. Os pares pressão de contato e distância deslizada serão plotados em um gráfico, permitindo a obtenção de equações empíricas para os mesmos. Análises complementares como mecanismos de desgaste também poderão ser realizadas.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais e equipamentos utilizados. Também é abordado o procedimento de preparo dos materiais, os parâmetros utilizados nos testes e a metodologia para medição e análise dos resultados.

3.1. Materiais

Os materiais utilizados são apresentados na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Materiais utilizados nos testes de desgaste.

	Amostra	Contracorpo
Material	ABNT 1020	ABNT 52100
Quantidade	4	12
Dimensões (mm)	Retangular, 30 X 80 X 6	Cilíndrico, 9 X 9 (comp. X diâm.)
Dureza (HV)	136	935
Acabamento	Lixado (grão 400)	Retificado

As amostras foram fabricadas de chapa de aço cortadas e fresadas, e o acabamento das superfícies de teste foi feito através do lixamento das mesmas. As duas maiores superfícies de cada amostra foram utilizadas nos testes e permitiram a realização de até quatro ensaios por amostra. Os contracorpos foram adquiridos em seu estado acabado e foi utilizado um por ensaio.

3.2. Sistema de alinhamento do contracorpo cilíndrico

Foi desenvolvido e fabricado um aparato com o objetivo de manter o alinhamento longitudinal entre o contra corpo cilíndrico e a amostra. O mesmo consiste em um compartimento móvel no qual é fixado o cilindro. Este compartimento é apoiado em dois semimancais de deslizamento, o que permite seu deslocamento angular, promovendo o alinhamento desejado entre o contracorpo e a amostra. O funcionamento pode ser melhor entendido através da Fig. 3.1.

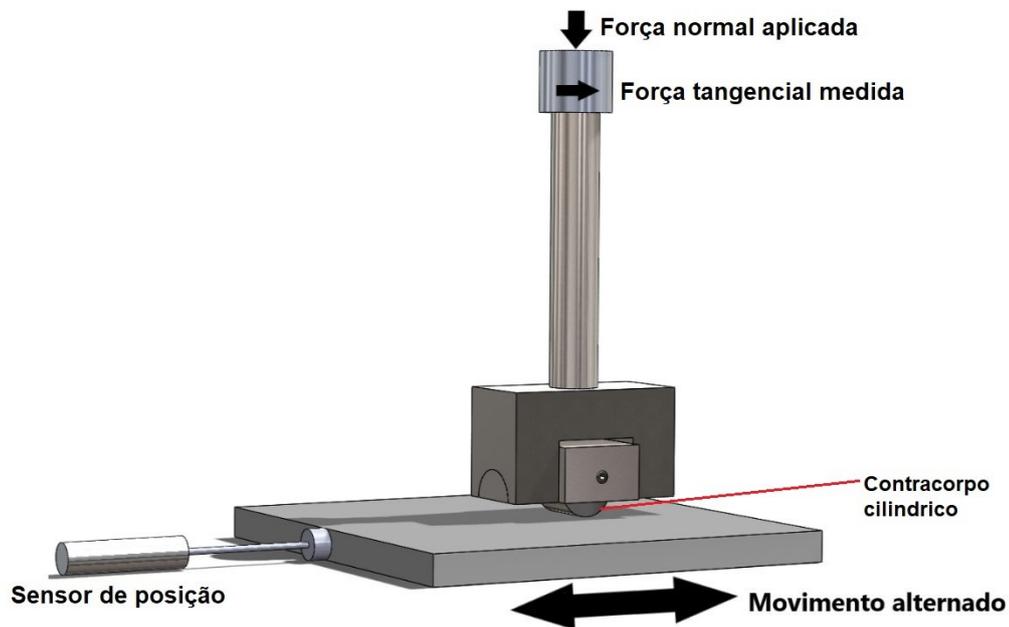


Figura 3.1 - Representação esquemática do sistema de alinhamento do contracorpo cilíndrico.

3.3. Testes de desgaste

Os testes de desgaste foram realizados no tribômetro PLINT TE67 utilizando a configuração de deslizamento alternado, com amplitude de 10 mm, frequência de 2 Hz e carga normal de 98,1 N. Tais parâmetros foram baseados em um trabalho anterior que utilizou essa mesma configuração (GONÇALVES JR, 2016).

Foi realizado um teste inicial com duração de 30min. A partir de então, a duração foi dobrada até se observar estabilização da taxa de desgaste da amostra, resultando em quatro testes com duração de: 30 min, 60 min, 120 min e 240 min. Cada ensaio foi repetido três vezes conforme a Tab. 3.2, sempre utilizando uma nova superfície da amostra e um novo contracorpo.

Tabela 3.2 - Esquema dos ensaios realizados.

Duração [h]	Distância deslizada [m]	Teste 1	Teste 2	Teste 3
0,5	36	12 ensaios		
1	72			
2	144			
4	288			

Após o tribômetro ser configurado a amostra foi fixada no mesmo utilizando um parafuso central conforme a Fig. 3.2. Foi então realizado o procedimento de calibração da célula de carga sem a utilização do contracorpo. Após esse procedimento o contracorpo foi montado no sistema de alinhamento (Fig. 3.1) e aplicada a carga normal utilizando um conjunto de anilhas com massa conhecida sobre o mesmo. Só então foi iniciado o ensaio de desgaste (ativação do tribômetro e do sistema de aquisição de dados). Finalizado o ensaio o movimento do tribômetro se interrompe automaticamente, sendo necessária a interrupção do sistema de aquisição. Após isso a amostra foi removida do tribômetro. Todo o procedimento foi repetido em cada ensaio.

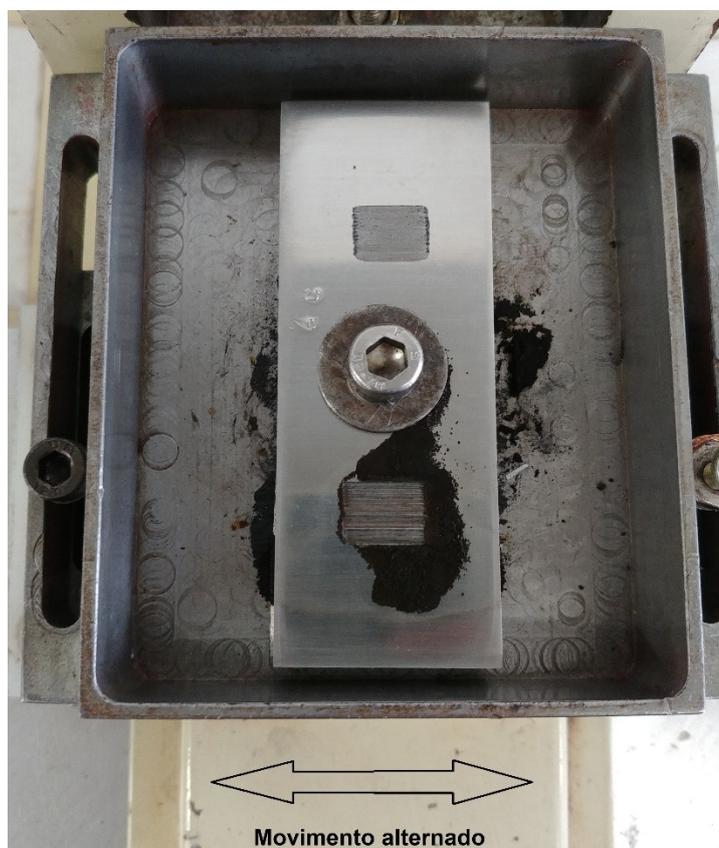


Figura 3.2 – Fixação da amostra no tribômetro. Parafuso de fixação da amostra ao centro. Foto feita após o ensaio.

3.4 Avaliação dos resultados

Os principais resultados avaliados foram pressão de contato e desgaste. Também foram obtidos mapas triboscópicos de potencial de contato e realizadas macrografias das superfícies de desgaste.

A área de contato foi obtida medindo a superfície de desgaste formada no contracorpo após cada teste. Para isso foi utilizado o microscópio OLYMPUS BX51M utilizando a ferramenta de medição de área do software desse microscópio (Fig. 3.3). A partir dessa área foi estimada a pressão média de contato (Carga normal/Área).

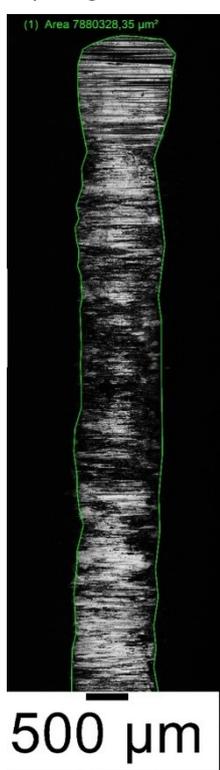


Figura 3.3 - Captura e medição da marca de desgaste do contracorpo utilizando o software do microscópio.

Para determinação do desgaste da amostra, cada uma foi pesada antes e depois de cada teste utilizando a balança OHAUS AS120 (resolução: 0,0001 g). Foram realizadas quatro medições para obtenção da média. O volume desgastado da amostra é calculado a partir da massa desgastada considerando uma massa específica de $7870 \text{ kg}/\text{m}^3$. A distância deslizada foi obtida pela Eq. (3.1). Já o desgaste do contracorpo foi calculado a partir da área da superfície de desgaste formada (Fig. 3.3)

$$\text{Distância deslizada}(m) = \text{Duração ensaio}(s) * \text{Amplitude}(m) * \text{Frequência}(Hz) \quad (3.1)$$

Para cálculo da taxa de desgaste utilizou-se o método numérico apresentado na Eq. (3.2).

$$Q\left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right) = \frac{V_2 - V_1}{X_2 - X_1} \quad (3.2)$$

Onde:

X_1 = distância deslizada em determinado ensaio 1.

X_2 = distância deslizada no ensaio consecutivo 2.

V_1 = volume desgastado no ensaio 1.

V_2 = volume desgastado no ensaio 2.

A pressão de contato foi calculada de maneira análoga. A partir dos resultados de taxa de desgaste e pressão de contato em função da distância deslizada foi obtida uma relação entre pressão de contato e taxa de desgaste.

Os mapas triboscópicos foram obtidos a partir dos dados coletados continuamente durante os ensaios. Os pares potencial de contato e posição do contracorpo sobre a amostra foram coletados utilizando um sistema da aquisição de 50 kHz para cada canal; frequência bem maior que a do movimento alternado do ensaio, de 2 Hz. Esses dados foram processados utilizando uma rotina do MATLAB® previamente desenvolvida que gera um mapa tridimensional do potencial de contato em função da posição do contracorpo sobre a amostra e número de ciclos conforme a Fig. 3.4.

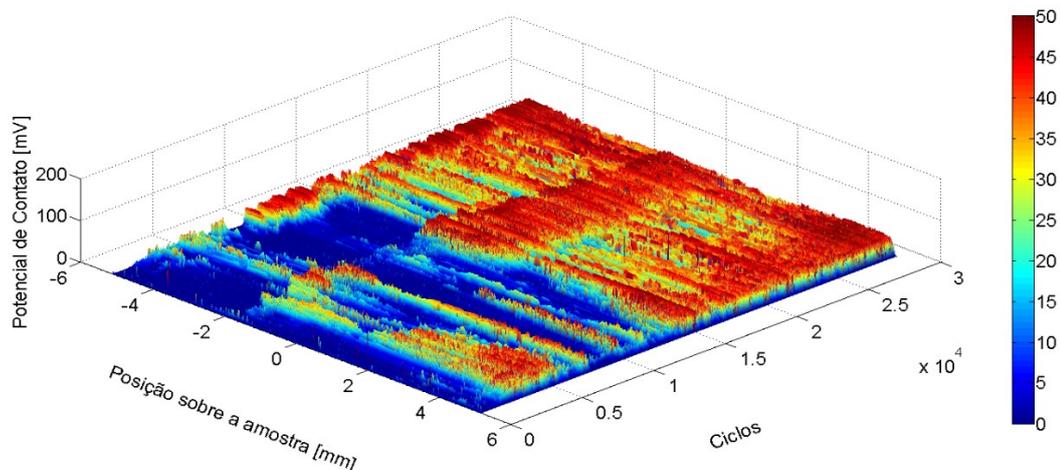


Figura 3.4 – Mapa triboscópico de potencial de contato de um dos ensaios realizados. Potencial de contato representado em escala de cores de acordo com a posição sobre a amostra e número de ciclos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes de desgaste. Foi feita a análise da evolução da taxa de desgaste e da pressão de contato durante os testes, assim como a relação entre essas duas grandezas. Também foram utilizadas outras técnicas de análise como mapas triboscópicos de coeficiente de atrito e potencial de contato e macrografias.

4.1. Pressão de contato.

A pressão de contato inicial estimada pelas equações de Hertz (Eq. (2.2), Eq. (2.3) e Eq. (2.4)), considerando um comprimento do cilindro observado de 8,1 mm, é de 78 MPa. As pressões obtidas ao decorrer do desgaste, para cada um dos testes, são mostradas na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 - Pressão de contato média.

Distância deslizada [m]	Pressão de contato média [MPa]				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão
0	78,00	78,00	78,00	78,00	-
36	25,41	16,86	17,68	19,98	±4,72
72	18,13	15,42	16,38	16,64	±1,37
144	13,38	9,76	12,45	11,86	±1,88
288	9,56	10,12	9,08	9,59	±0,52

Nota-se uma queda abrupta da pressão de contato média no primeiro teste, indo de 78 MPa para 19,98 MPa. Nos testes seguintes a queda é mais gradual. Esse comportamento pode ser observado na Fig. 4.1.

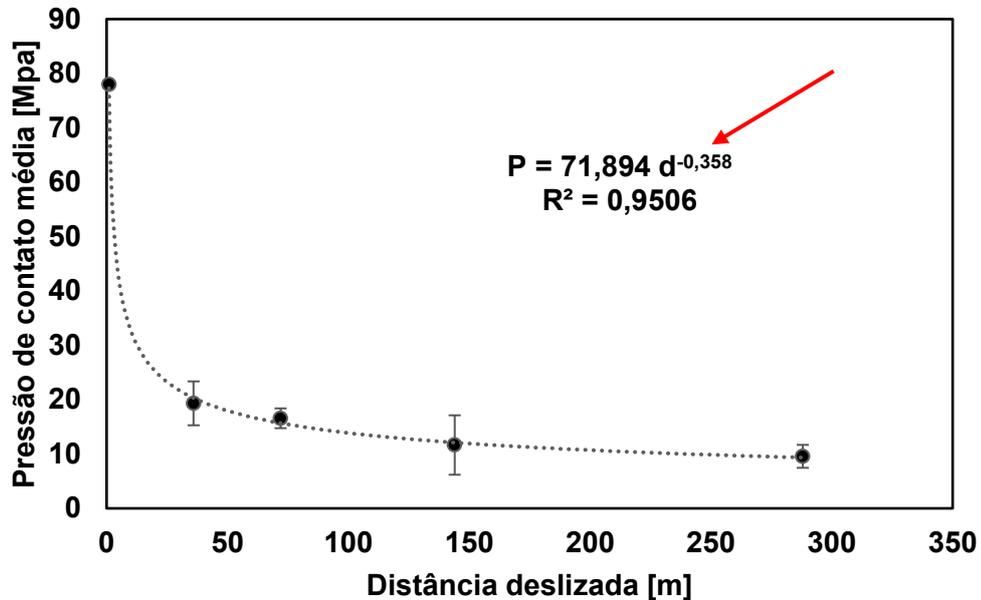


Figura 4.1 - Comportamento da pressão de contato com a distância deslizada.

Essa queda da pressão de contato se deve ou aumento da área de contato decorrente do desgaste do contracorpo. Devido às propriedades geométricas do contracorpo espera-se um coeficiente para queda da pressão de contato de - 0,333 à taxa de desgaste constante. Os resultados obtidos nos ensaios levaram a um valor próximo, de -0,358 (seta vermelha Fig. 4.1).

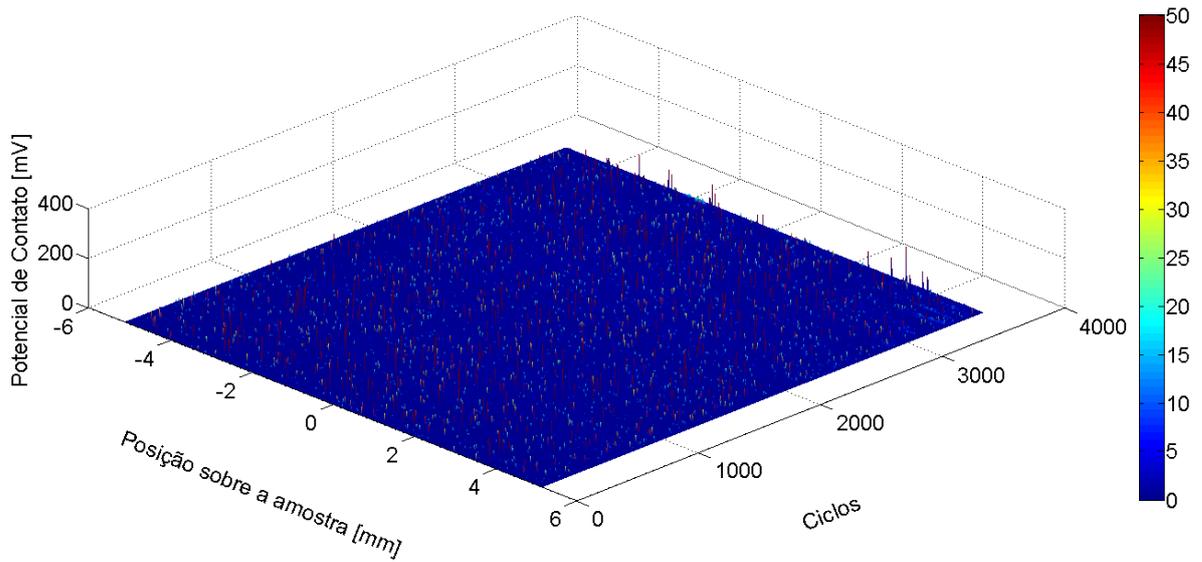
4.2. Desgaste da amostra

O desgaste da amostra obtido em cada um dos testes é mostrado na Tab. 4.2.

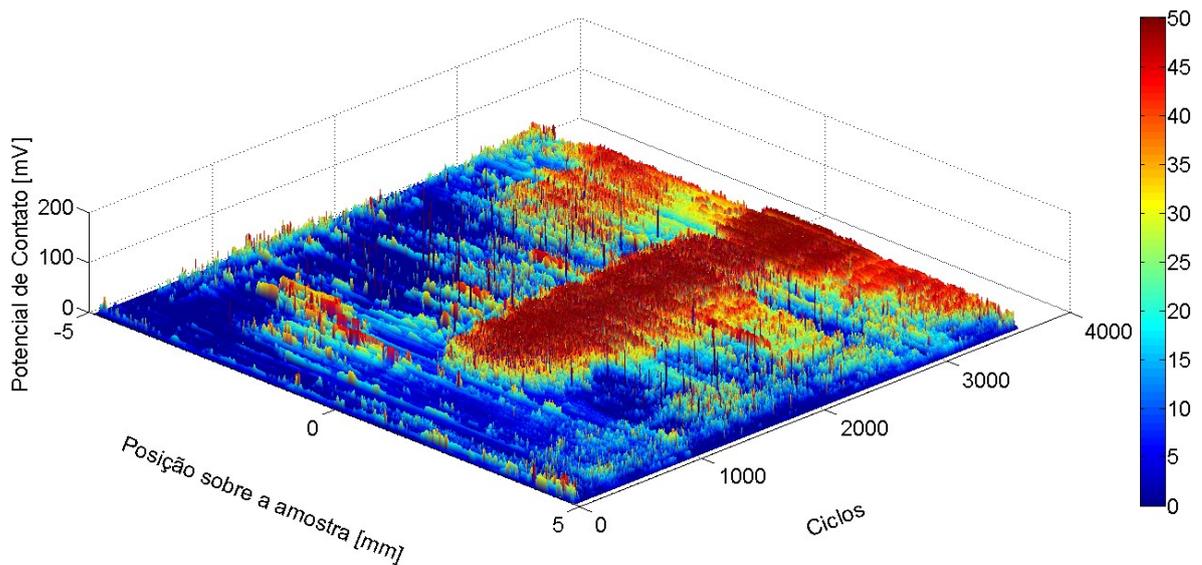
Tabela 4.2 - Desgaste da amostra.

Distância deslizada [m]	Desgaste amostra [mm ³]				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão
36	1,957	0,762	0,584	1,101	±0,746
72	2,694	1,296	1,855	1,948	±0,704
144	2,999	2,465	2,808	2,757	±0,270
288	5,870	4,727	3,050	4,549	±1,419

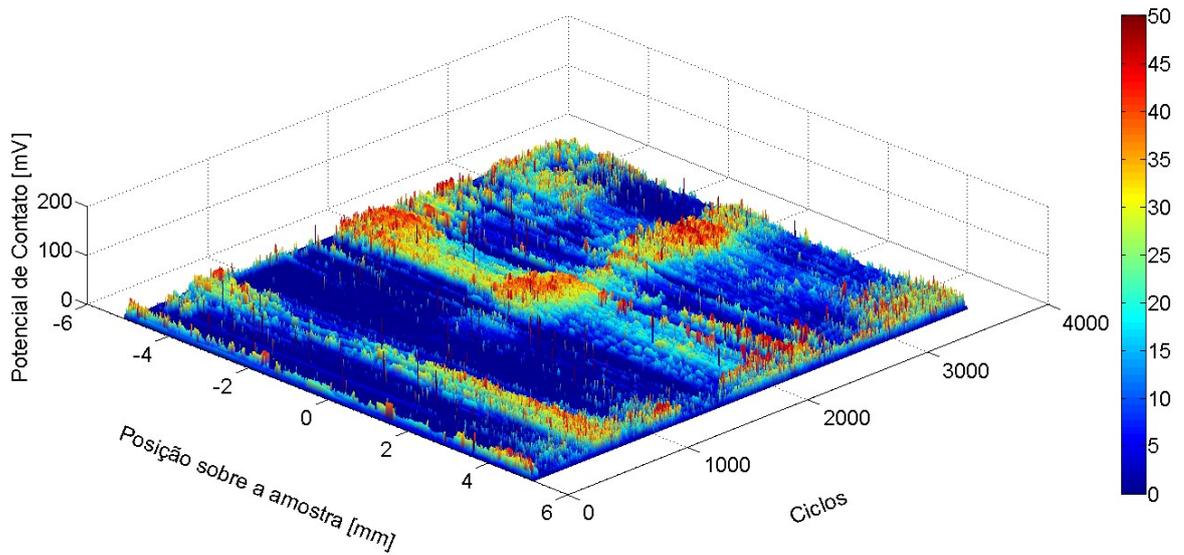
A princípio observa-se uma grande variação do desgaste em testes de mesma distância deslizada. Analisando os ensaios de 36 m (círculo vermelho), o Teste 1 apresentou desgaste de três a quatro vezes maior que o Teste 2 e o Teste 3. A partir dos mapas triboscópicos desses ensaios (Fig. 4.2) é possível perceber a elevação do potencial de contato no Teste 2 e no Teste 3, indicando que a formação de uma tribocamada não condutora pode ser o causa da redução do desgaste.



a)



b)



c)

Figura 4.2 - Mapa triboscópico de potencial de contato: a - Teste 1, b - Teste 2, c - Teste 3. Distância deslizada de 36m.

A Fig. 4.3 apresenta as macrografias das amostras desses ensaios. Observa-se a presença de placas escuras no Teste 2 e Teste 3, indicando que a tribocamada formada se adere à amostra. A maior presença de riscos nesses dois testes é um indicativo do despreendimento de material abrasivo.

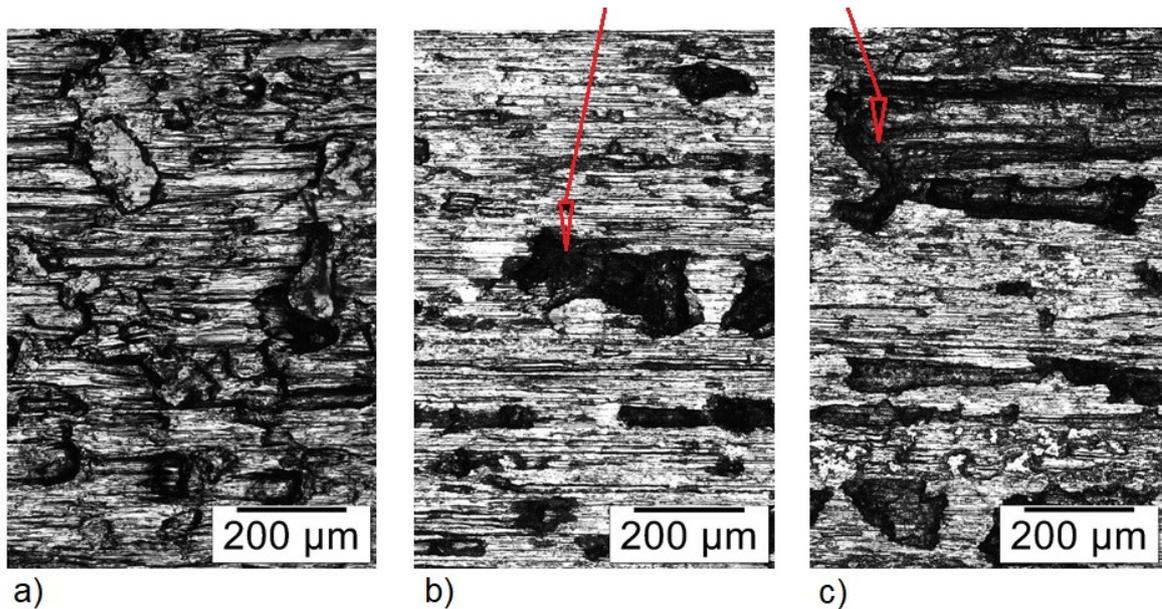


Figura 4.3 – Macrografias das amostras nos testes: a - Teste 1; b - Teste 2; c - Teste 3. Distância deslizada de 36m. Setas vermelhas indicando possível formação de tribocamada.

A Fig. 4.4 apresenta do desgaste da amostra com a distância deslizada. O comportamento médio é linear, como descrito pela equação de Archard - Eq. (2.8). Isso indica um coeficiente de desgaste K aproximadamente constante, igual a $0,0131 \text{ mm}^3/\text{m}$.

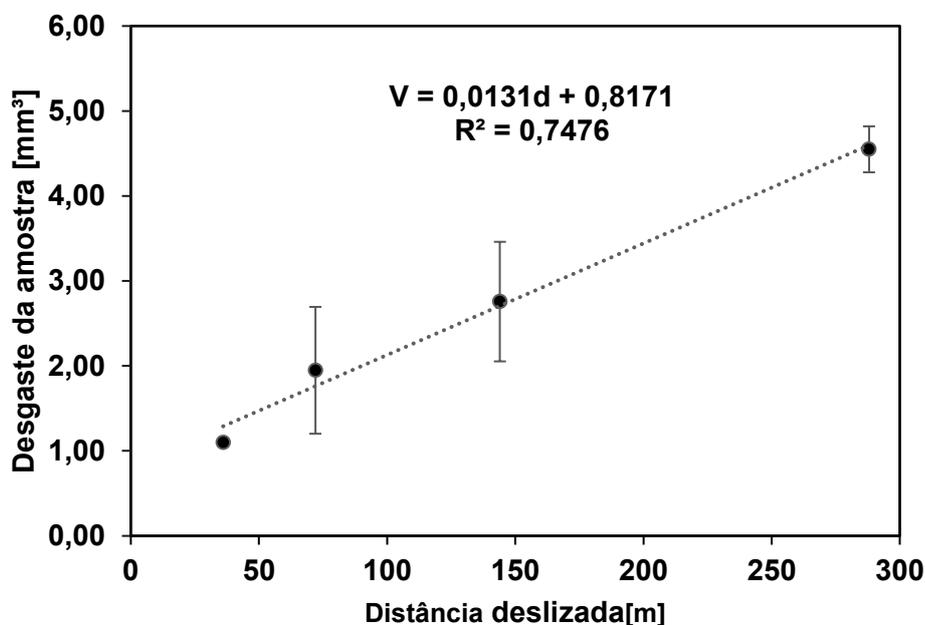


Figura 4.4 - Volume desgastado da amostra com a distância deslizada.

A Tab. 4.3 apresenta a Taxa de desgaste e Pressão de contato média calculadas numericamente conforme a Eq. (3.2). É possível perceber grandes variações da taxa de desgaste para valores de pressão de contato próximos (setas coloridas).

Tabela 4.3 – Taxa de desgaste instantânea em função da pressão de contato.

	Pressão de contato média [MPa]	Taxa de desgaste [mm³/m]
Teste 1	→ 48,7	→ 0,0544
	21,8	0,0205
	15,8	0,0042
	11,5	0,0199
Teste 2	→ 44,4	→ 0,0212
	16,1	0,0148
	12,6	0,0162
	9,9	0,0157
Teste 3	44,8	0,0162
	17,0	0,0353
	14,4	0,0132
	10,8	0,0017

O comportamento da Taxa de desgaste em função da Pressão de contato pode ser melhor visualizado na Fig. 4.5. Nota-se uma tendência de aumento da Taxa de desgaste com o aumento da Pressão de contato. Entretanto o coeficiente de correlação da amostra é $r = 0,56$ ($R^2 = 0,32$), indicando uma correlação baixa, ou seja, apesar de a Pressão de contato exercer influência, outros fatores também modificam a Taxa de desgaste da amostra. Foi utilizado um Teste de Hipóteses para estimar o coeficiente de correlação da população ρ . A hipótese de que ρ é maior que 0,5 apresenta significância de apenas 37%. Para 95% de confiança o coeficiente de correlação é $\rho = 0,08$. Assim conclui-se que a relação entre Taxa de desgaste da amostra e Pressão de contato não possui significância estatística.

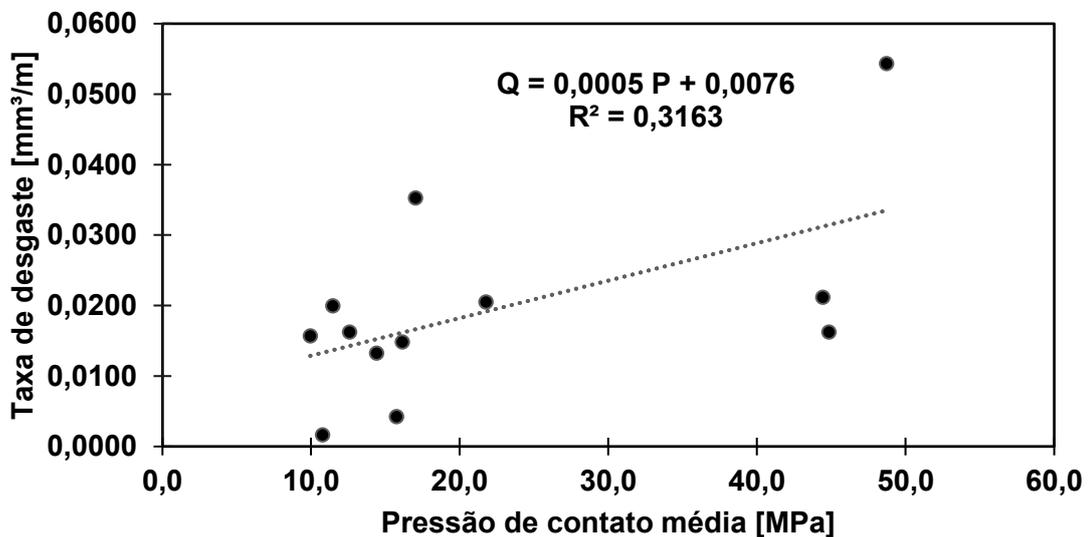


Figura 4.5 - Comportamento da taxa de desgaste instantânea da amostra com a pressão de contato média.

4.3. Desgaste do contracorpo

O desgaste do contracorpo é apresentado na Fig. 4.6. Observa-se uma tendência linear, com desvio padrão maior para testes de maiores durações. Tal comportamento sugere que modificações no tribossistema que ocorreram ao longo do teste exerceram uma influência maior no desgaste. Também é possível notar que o desgaste do contracorpo foi aproximadamente uma ordem de grandeza menor que o da amostra. Isso se deve principalmente à dureza do contracorpo ser aproximadamente sete vezes maior que a da amostra, conforme Tab. 3.1.

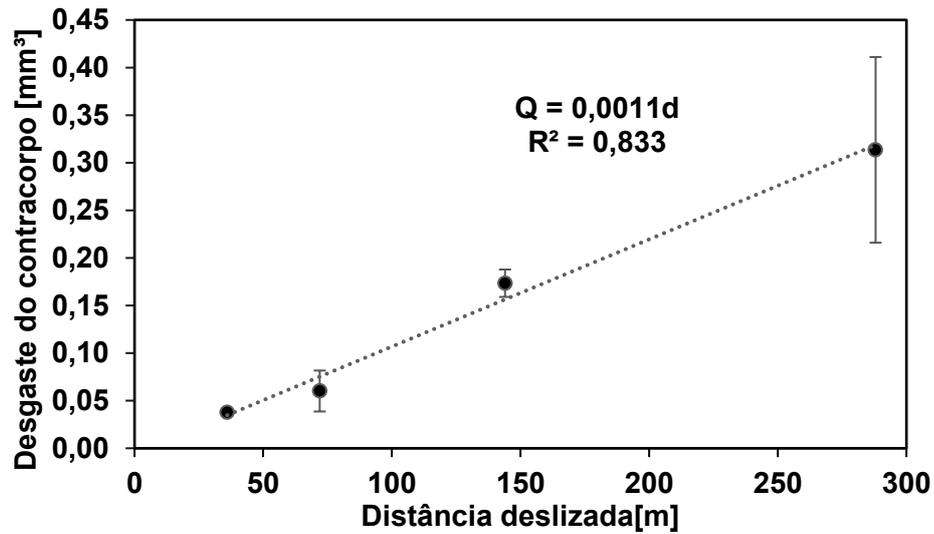


Figura 4.6 - Volume desgastado do contracorpo com a distância deslizada.

Analisando o Desgaste do contracorpo (Tab. 4.4) nos ensaios de Distância deslizada de 36 m (circulados em vermelho), observa-se um comportamento oposto ao ocorrido na amostra: o Teste 2 e o Teste 3 apresentaram desgaste aproximadamente três vezes maior que o Teste 1. Isso novamente indica que a tribocamada formada está aderida à amostra, diminuindo o desgaste da mesma e aumentando o desgaste do contracorpo.

Tabela 4.4 - Desgaste do contracorpo.

Distância deslizada [m]	Desgaste contracorpo [mm³]				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão
36	0,0167	0,0572	0,0496	0,0379	±0,0215
72	0,0459	0,0746	0,0623	0,0602	±0,0144
144	0,1143	0,2954	0,1421	0,1734	±0,0976
288	0,3144	0,2647	0,3670	0,3135	±0,0511

A Fig. 4.7 apresenta as macrografias dos contracorpos dos ensaios de 36m. É possível observar no Teste 2 e no Teste 3, além da maior superfície de desgaste, a presença maior de riscos, indicando novamente a presença de material abrasivo.

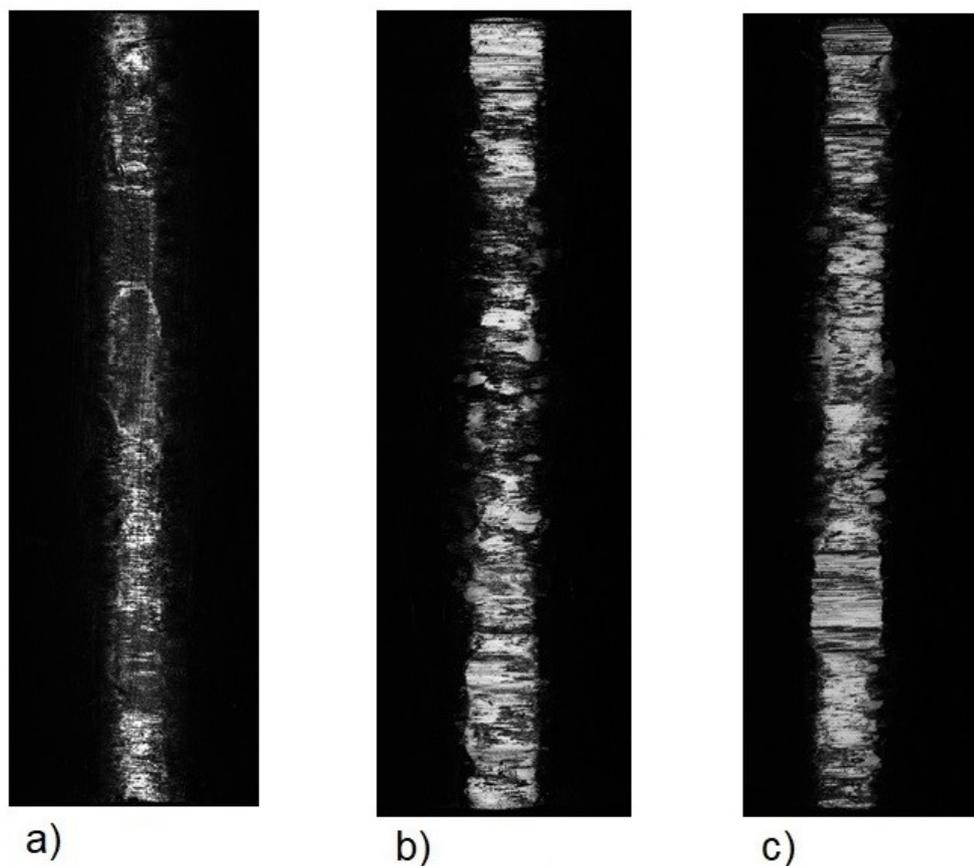


Figura 4.7 – Macrografias dos contracorpos nos testes: a - Teste 1; b - Teste 2; c - Teste 3. Distância deslizada de 36m.

A Taxa de desgaste do contracorpo (Fig. 4.8) não apresentou correlação com a pressão de contato ($R^2 = 0,0003$). Esse comportamento pode ser explicado pela elevada dureza do contracorpo, tornando o mesmo menos susceptível aos efeitos da pressão de contato, como redução de dureza pela temperatura e maior adesão das superfícies. Por outro lado, as grandes variações indicam outros fatores atuantes importantes, como a formação de uma tribocamada aderida à amostra que aumenta o desgaste do contracorpo quando presente.

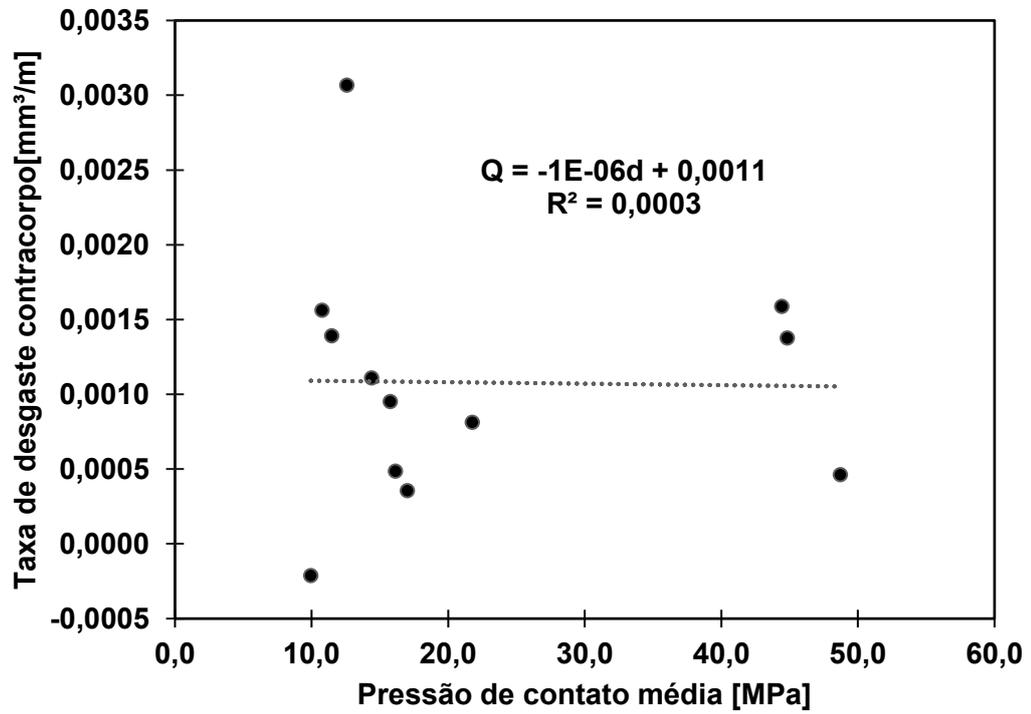


Figura 4.8 - Comportamento da Taxa de desgaste do contracorpo com a Pressão de contato média.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

De maneira sucinta, o presente trabalho permitiu observar os seguintes aspectos sobre o teste de desgaste analisado, nas configuração e parâmetros utilizados:

- A Pressão de contato média caiu rapidamente (de 78 para 20 MPa) nos primeiros 36 m de teste, passando então a ter uma queda lenta, atingindo 10 MPa a uma distância deslizada de 288 m.
- A Taxa de desgaste da amostra não apresentou correlação significativa com a Pressão de contato. Esse resultado ocorreu devido a pontos discrepantes que não se repetiram nas mesmas condições de teste, o tornando estatisticamente irrelevante. As maiores variações ocorreram nos testes de menor duração.
- A Taxa de desgaste do contracorpo não apresentou correlação significativa com a pressão de contato. Ocorreu uma maior variação nos testes de maior duração.
- As diferenças de desgaste da amostra nos testes de mesma distância deslizada, puderam ser explicadas pela formação de uma camada protetora não metálica, possivelmente de óxido de ferro, aderida à amostra.
- O desgaste médio contracorpo foi aproximadamente uma ordem de grandeza menor que o da amostra, o que é esperado devido a dureza maior do mesmo.

Assim, pôde-se concluir que variáveis não controladas atuantes no tribo-sistema tiveram influência muito mais significativa na Taxa de desgaste do que a Pressão de contato; variável de interesse inicial. O efeito mais significativo foi a formação de uma camada não condutora que diminui o desgaste da amostra e aumenta o do contracorpo. Sugere-se, para trabalhos futuros, descobrir e analisar quais fatores levam a sua formação nessa configuração de teste tribológico, podendo assim aplicar os resultados em sistemas que operem em movimento alternado, e que estão sujeitos a formação de tribo-camadas durante sua operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAYI, O. O.; ERCK, R.A. **Variation of Nominal Contact Pressure with Time during Sliding Wear**. Energy Technology Division – Argone National Laboratory – Argonne, IL 60439 – January 2001a.

AJAYI, O. O.; ERCK, R.A. **Analysis of Sliding Wear Rate Variation with Nominal Contact Pressure**. Energy Technology Division – Argone National Laboratory – Argonne, IL 60439 - August 2001b.

DA SILVA, L. R. R.; COSTA, H, L. **Tribological behavior of gray cast iron textured by maskless Electrochemical texturing**. *Wear* 376-377(2017)1601–1610.

GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. **Contact of nominally flat surfaces**. Burnd Corporation Research Division, Norwalk, Connecticut, U.S.A. Communicated by F. P. Bowden, F.R.S. - Received 28 April 1966.

GONÇALVES JR, J. L. **AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE NOVAS MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS PARA CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO**. 2016 129 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

HUTCHINGS, I. M. *Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials*. BH. Londres, 1992.

PETER, H. Jost **Tribology - Origin and Future**. *Wear*. 136 1 - 17 ,1990.

SANTOS, M. B. dos; COSTA, H. L. DE MELO, J. B. G. **Potentiality of triboscopy to monitor friction and wear**. *Wear* 332-333 (2015) 1134–1144.

Phoenix Tribology Ltd - **SLIDING HERTIZAN POINT CONTACT TESTS**. Disponível em <<http://www.phoenix-tribology.com/wp-content/uploads/guidance/Guidance-Sliding-Hertzian-Point-Contact.pdf>>. Acesso em 20 Junho de 2018.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Elsevier, 2001.

VUOLO, J.H. **Fundamentos da teoria de erros** - 1996.

VIALI, L. **Correlação**. UFRGS – Instituto de Matemática – Departamento de Estatística. Disponível em <<http://www.mat.ufrgs.br/~viali/exatas/material/laminaspi/Correlacao.pdf>>. Acesso em 23 de novembro de 2018.

WILLIAMS, J. **Engineering Tribology** Cambridge: Cambridge University. 2005.

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