

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E
MATERIAIS - PPGEM**

PEDRO LUIZ FIAD DO AMARAL

**INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NOMINAL DE CONTATO NO
COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO EM PLANO INCLINADO
AUTOMATIZADO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2013

PEDRO LUIZ FIAD DO AMARAL

**INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NOMINAL DE CONTATO NO
COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO EM PLANO INCLINADO
AUTOMÁTIZADO**

Trabalho de Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Materiais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

CURITIBA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

A485 Amaral, Pedro Luiz Fiad do
Influência da pressão nominal de contato no coeficiente de atrito estático em plano inclinado automatizado / Pedro Luiz Fiad do Amaral. — 2013.
111 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Giuseppe Pintaúde.

Coorientador: Carlos Henrique da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2013.

Bibliografia: f. 98-102.

1. Superfícies (Tecnologia) – Medição. 2. Aspereza de superfície. 3. Atrito – Testes. 4. Tribologia. 5. Sistemas de indicação visual tridimensional. 6. Engenharia mecânica – Dissertações. I. Pintaúde, Giuseppe, orient. II. Silva, Carlos Henrique, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. IV. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Campus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

PEDRO LUIZ FIAD DO AMARAL

INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NOMINAL DE CONTATO NO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO EM PLANO INCLINADO AUTOMATIZADO

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr. Eng.
Coordenador de Curso

Banca Examinadora

Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr. Eng.
(UTFPR)

Prof. Eduardo Carlos Bianchi, Dr. Eng.
(UNESP)

Prof. Marcio Mafra, Dr. Eng.
(UTFPR)

Prof. Julio Cesar Klein das Neves, Dr. Eng.
(UTFPR)

Curitiba, 12 de Julho de 2013

Dedico este trabalho à minha falecida avó
Sra. Floracy Lima do Amaral e ao meu
filho João Pedro do Amaral.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Em primeiro lugar agradeço a Deus, a Quem alguns chamam de O Grande Arquiteto do Universo, pela vida e pelas inúmeras oportunidades de aprendizado.

Agradeço ao meu orientador e co-orientador Prof. Dr. Giuseppe Pintúde e Carlos Henrique da Silva, respectivamente pela paciência e sabedoria com que me guiaram nesta trajetória.

A estagiária Blanceliz Higashino de Lima e aos estagiários Gustavo Takehara, Mateus Legroski e Matheus Broch Hildebrandt, que me auxiliaram nas execuções dos ensaios.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Ao Prof. Aloisio José Schuitek pelo incentivo e pelas idéias que deu para a elaboração desse trabalho.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

A vida só pode ser compreendida
olhando-se para trás; mas só pode ser
vvida olhando-se para frente.
(KIERKEGAARD, Soren, 1813-1855)

RESUMO

AMARAL, Pedro Luiz Fiad do. **INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NOMINAL DE CONTATO NO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO EM PLANO INCLINADO AUTOMATIZADO**. 2013. 115. Trabalho de Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais[PPGEM]) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

O movimento relativo entre superfícies planas de contato são comuns a muitos projetos de engenharia. Na operação de muitos mecanismos identificam-se os problemas de atrito como um dos principais obstáculos para o êxito do funcionamento desses dispositivos. Neste trabalho avaliou-se a influência da pressão nominal de contato no atrito estático entre superfícies de aço ABNT 1020 e 1045 contra uma placa de vidro. As superfícies dos corpos de prova foram obtidas através do Processo de Fabricação por Usinagem Com Ferramenta de Geometria Não Definida – Retificação Plana Tangencial. Os corpos de prova foram constituídos de dois grupos: o Grupo A (tipo copo - ABNT1010) e do Grupo B (tipo Maciço - ABNT1045). Todas as superfícies foram caracterizadas quanto à rugosidade, utilizando-se um perfilômetro 3-D óptico sem contato. Para as medições do atrito estático foi utilizado um sistema plano inclinado, com automatização para detecção dos movimentos dos corpos de prova ao longo do tempo. Demonstrou-se que a pressão nominal não influencia os valores de coeficiente de atrito estático. Investigou-se a partir de então, um possível efeito da rugosidade no atrito. A partir dos parâmetros de rugosidade 3D foram calculados os momentos espectrais m_0 , m_2 e m_4 , e o Parâmetro Largura de Banda, Alfa (α) que foi correlacionado com o coeficiente de atrito estático. Dentro dos parâmetros analisados: S_q , S_{dq} e S_{ds} , o parâmetro S_q foi o que apresentou a maior discrepância entre os dados coletados. Com base na análise estatística de variância com nível de confiança de 5%, do parâmetro S_q , as amostras foram realocadas em 4 grupos para os quais foram calculados os Parâmetros Alfa. Considerando-se estes grupos de amostras, mostrou-se que o parâmetro alfa afetou o coeficiente de atrito estático, ou seja, quanto maior o parâmetro, maior o coeficiente de atrito estático.

Palavras-chave: Coeficiente de atrito estático. Rugosidade. Pressão de contato.

ABSTRACT

AMARAL, Pedro Luiz Fiad do. **INFLUENCE OF NOMINAL CONTACT PRESSURE ON STATIC FRICTION COEFFICIENT IN INCLINED AUTOMATED PLAN.** 2013. 115. Trabalho de Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais [PPGEM]) - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2013.

The relative movement among flat surfaces in contact is common for many engineering projects. During the operation of many mechanisms, friction problems are identified as a main obstacle to the successful performance of them. In this study the influence of nominal pressure contact on static friction between steel surfaces (ABNT 1020 and 1045) and glass plate is evaluated. The specimens' surfaces were obtained by means of a manufacturing process classified as machining with undefined tool – tangential plane grinding. The specimens were constituted by two groups: the group A (type cup – ABNT1010) and the group B (type compact – ABNT1045). All specimens were characterized with respect to surface roughness, using a 3-D optical non-contact profilometer. For static friction measurements, an inclined plan system was used, with an automated detection of movements of specimens along time. The nominal contact pressure not has any effect on the values of static friction coefficient. Since then, a possible effect of surface roughness on friction was investigated. The spectral moments m_0 , m_2 and m_4 , and the bandwidth parameter, Alpha (α), were calculated from the 3-D roughness parameters, and this latter was correlated with static friction coefficient. Within the analyzed parameters: S_q , S_dq and S_d s, the S_q parameter presented the largest discrepancy within the sampling data. Based on the statistical analysis of variance, with a confidence level of 5%, of S_q parameter, the specimens were relocated into 4 groups, for which we calculated alpha parameter. Considering these groups, we demonstrated that the alpha parameter affected the static friction coefficient, that is, the higher this parameter, the greater the static friction coefficient.

Keywords: Static friction coefficient. Roughness. Contact pressure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação da carga normal com atrito estático para silício sobre silício medidos com o sistema centrífugo- $g=10\text{m/s}^2$ (adaptado de Dunkin e Kim, 1995)...	15
Figura 2 - Sistema Tribológico (adaptado de Czichos, 1978).....	17
Figura 3 - Entradas e saídas do sistema tribológico (adaptado de Czichos, 1978)...	18
Figura 4 - Resultados típicos para o deslizamento não lubrificado, em ar, entre aço e alumínio polido- $g=10\text{m/s}^2$ (adaptado de Bowden e Tabor, 1950 <i>apud</i> Hutchings, 2001).	21
Figura 5 - Variação do coeficiente de atrito, μ , com área nominal de contato, para madeira contra aço a seco (adaptado de Rabinowicz, 1965).....	22
Figura 6 - Força de atrito em relação ao tempo (Budinski, 2006).....	22
Figura 7 - Coeficiente de atrito em relação à velocidade de deslizamento para o cobre e o bismuto com contra-corpo de mesmo material (Bowden e Tabor, 1964 <i>apud</i> Hutchings, 2001).	23
Figura 8 - Sistema de forças em um sólido retangular no qual pode ocorrer deslizamento ou tombamento (Blau, 2008).....	31
Figura 9 – Esquema do plano inclinado e diagrama de corpo livre (Blau 2008).	33
Figura 10 – Dispositivo tipo “Trenó” (adaptado de Blau, 2008)	36
Figura 11– Dispositivo centrípeto para medir atrito(adaptado de Dunkin e Kim, 1995)	36
Figura 12 – Variação do coeficiente de atrito estático com área nominal (Dunkin e Kim, 1995)	40
Figura 13 - Variação do coeficiente de atrito estático com pressão nominal (Dunkin e Kim, 1995).....	40
Figura 14 – Força de atrito estático em relação a carga normal para materiais puros (Rabinowicz 1992).....	42
Figura 15 - Relação do coeficiente de atrito estático do Fe e Cu em relação a concentração da cobertura fracionada de Cl e O (Wheeler, 1975)	42
Figura 16 - Efeito do tempo de contato na força atrito estático entre metais (Kragelski, 1965 <i>apud</i> Blau, 2008).	44
Figura 17 - Relação entre força de atrito estático e a variação do comprimento da amostra (Woo e Thomas, 1979).....	45
Figura 18 - Força de atrito em relação ao inverso do comprimento da amostra, cada ponto é a média de 25 leituras (Chetwynde e Ganss, 1982).....	48
Figura 19 - Força de atrito em relação ao inverso do comprimento da amostra cada ponto é a média de 25 leituras (Chetwynde e Ganss, 1982).....	48
Figura 20 Coeficiente de atrito estático em relação a área teorica de contato para o par CuO X silicone amorfo (Polyakov et al, 2012).....	50
Figura 21 Variação do coeficiente de atrito estático com dureza para aço AISI H13 sobre Cromo duro (adaptado de Montanez-Calao, 2011).	50
Figura 22 - Planos médios da superfície e dos picos e distribuição de alturas da superfície e dos picos (McCool, 1986).	52
Figura 23 – Distribuição de alturas dos picos (McCool, 1986).	52

Figura 24 – Representação gráfica do contato geométrico nos picos (McCool, 1986).	55
Figura 25.- Relação entre o plano médio dos picos e a superfície (McCool, 1987) ..	59
Figura 26- Variação do coeficiente de atrito com α para aço AISI H13 revenido a 540° sobre Cromo duro (Montanez-Calao, 2011).....	60
Figura 27 - Vista esquemática da superfície em corte mostrando as diversas camadas de uma superfície usinada (Ludema, 2000).....	62
Figura 28 - Rugosidade, ondulação e forma de uma superfície de engenharia (Dagnall, 1980 <i>apud</i> Blunt, 2003).....	63
Figura 29 - Corpos de provas de aço ABNT 1010 Grupo A com furo anular	68
Figura 30 - Corpos de provas dispostos sobre a mesa magnética da máquina retificadora plana tangencial Ferdimat modelo T-104.	69
Figura 31- Corpos de provas de aço ABNT 1045 Grupo B maciço	70
Figura 32 - Superfície gerada a partir dos pontos obtidos pela máquina de medir por coordenadas na avaliação da Planeza dos Corpos de Provas.	71
Figura 33 – Pontos das medições de Dureza Vickers nos C.P. do Grupo A	72
Figura 34 - Pontos das medições de Dureza Vickers nos C.P. do Grupo B.....	73
Figura 35 - Micrografia do aço ABNT 1010.	74
Figura 36- Micrografia do aço ABNT 1045.	74
Figura 37 – Pista externa do Rolamento FAG 6204.....	76
Figura 38 - Tribômetro - método do plano inclinado.....	77
Figura 39 – Tela do <i>LabView</i> para interface com o usuário.	78
Figura 40 - Sistema montado no plano de ensaios e um corpo de prova colocado de modo a interromper parcialmente o feixe de luz.....	79
Figura 41 - Foto ampliada 6,6x do canto vivo do Corpo de Prova.....	80
Figura 42 - Áreas aproximadas onde foram realizadas as medições de rugosidade	82
Figura 43 – Imagem da superfície de rugosidade: (a) Corpo de Prova 1, (b) Corpo de Prova 11	85
Figura 44 - Imagem da superfície de rugosidade: (a) Corpo de Prova 14, (b) Corpo de Prova 6, (c) Corpo de Prova 7	85
Figura 45 – Relação do Parâmetro S_a com o Parâmetro S_q	86
Figura 46 - Imagem da superfície de rugosidade do contra-corpo de vidro.	88
Figura 47 - Relação do coeficiente de atrito estático com a carga normal corrigida para os C.P. do Grupo A	90
Figura 48 - Relação do atrito estático com a variação da área nominal – Grupo A- .	91
Figura 49 - Relação do coeficiente de atrito estático com a pressão nominal.....	92
Figura 50 - Coeficiente de atrito estático dos C.P. com massa e área nominal constante- Grupo B.	93
Figura 51 – Relação do coeficiente de atrito estático com o Parâmetro Alfa para os grupos G1, G2, G3, G4.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Coeficiente de atrito estático para metais puros em atmosfera de gás Helio à duas temperaturas.	43
Tabela 2 – Valores das Funções de distribuição Normal Padronizada (McCool, 1986).	53
Tabela 3 – Dimensões dos corpos de provas do grupo A em mm – Tipo copo-Tolerância dimensional $\pm 0,01\text{mm}$	68
Tabela 4 - Parâmetros de Usinagem utilizados na retificação dos C. P.	69
Tabela 5 - Dureza dos corpos de provas “tipo copo”(Grupo A)em aço ABNT 1010..	72
Tabela 6 - Dureza dos corpos de provas cilindros maciços (Grupo B) em aço ABNT 1045	73
Tabela 7 - Dureza do vidro(contra corpo).....	73
Tabela 8 - Área nominal variável e carga variável para os corpos de provas do grupo A – Ensaio 1	81
Tabela 9 - Área nominal variável e carga constante para os corpos de provas do grupo A – Ensaio 2.....	81
Tabela 10 - Área nominal constante e carga constante para os corpos de provas do grupo B – Ensaio 3.....	81
Tabela 11 - Resultados médios das medições dos parâmetros de rugosidade dos corpos de provas tipo copo e o Parâmetro Alfa calculado para os C. P. do Grupo A	83
Tabela 12 - Médias das medições dos parâmetrosde rugosidade dos corpos de provas maciços e o Parâmetro Alfa calculado para os C. P. do Grupo B	84
Tabela 13 – Corpos de prova que compõem os grupos obtidos em função da variação do Parâmetro Sq.....	87
Tabela 14 - Valores médios e desvio padrão, dos grupos 1, 2, 3 e 4, dos Parâmetros Sq, Sdq, Sds e Alfa	87
Tabela 15 – Médias dos parâmetros de rugosidade de 9 medições para o contra-corpo de vidro.....	87
Tabela 16 – Relação do número de contatos plásticos com o número total de contatos- np/n para os C.P. do grupo A/vidro.....	88
Tabela 17 – Valores do Ensaio 1 de atrito estático com carga e área nominal variável - GRUPO A.....	89
Tabela 18 – Valores da Carga Normal e Área Nominal para os C.P. do Grupo A	89
Tabela 19 – Valores do Ensaio 2 de atrito estático para carga normal constante e área nominal variável – Grupo A.....	91
Tabela 20 – Valores de atrito estático (Ensaio 3), no plano inclinado, dos corpos de prova tipo maciço (Grupo B) com massa constante de 0,377 Kg e área nominal constante.....	93
Tabela 21 - Resultados das medições dos parâmetros de rugosidade dos corpos de prova tipo copo(Grupo A).	103
Tabela 22 - Resultados das medições dos parâmetros de rugosidade dos corpos de	103
Tabela 23 - Parâmetro Sq, média e desvio padrão para o Grupo 1.	103

Tabela 24 - Parâmetro Sdq, média e desvio padrão para o Grupo 1.....	104
Tabela 25 - Parâmetro Sds, média e desvio padrão para o Grupo 1.	104
Tabela 26 - Parâmetro Sq, média e desvio padrão para o Grupo 2.....	104
Tabela 27 - Parâmetro Sdq, média e desvio padrão para o Grupo 2.....	104
Tabela 28 - Parâmetro Sds, média e desvio padrão para o Grupo 2.	105
Tabela 29 - Parâmetro Sq, média e desvio padrão para o Grupo 3.....	105
Tabela 30 - Parâmetro Sdq, média e desvio padrão para o Grupo 3.....	105
Tabela 31 - Parâmetro Sds, média e desvio padrão para o Grupo 3.....	105
Tabela 32 - Parâmetro Sq, média e desvio padrão para o Grupo 4.....	106
Tabela 33 - Parâmetro Sdq, média e desvio padrão para o Grupo 4.....	106
Tabela 34 - Parâmetro Sds, média e desvio padrão para o Grupo 4.....	106
Tabela 35 – Valores médios medidos de Sq, Sdq, Sps e valores calculados de m_0 , m_2 , m_4 , Raio e Alfa para os corpos de Prova do Grupo A.....	107
Tabela 36 - Valores médios medidos de Sq, Sdq, Sps e valores calculados de m_0 , m_2 , m_4 , Raio e Alfa para os corpos de Prova do Grupo B.....	107
Tabela 37 – Análise de Variância com um nível de confiança de 5% em relação ao Parâmetro Sq para os Corpos de Prova do Grupo1.....	108
Tabela 38 - Análise de Variância com um nível de confiança de 5% em relação ao Parâmetro Sq para os Corpos de Prova do Grupo2.....	108
Tabela 39 - Análise de Variância com um nível de confiança de 5% em relação ao Parâmetro Sq para os Corpos de Prova do Grupo3.....	109
Tabela 40 - Análise de Variância com um nível de confiança de 5% em relação ao Parâmetro Sq para os Corpos de Prova do Grupo4.....	109
Tabela 41 – Valores do Parâmetro Sp obtidos com o perfilometro para os CP do Grupo A.....	110
Tabela 42 – Dados para obter o Módulo de Elasticidade Equivalente E.'	110
Tabela 43 - Dados para obter w_p^*	110
Tabela 44 - Dados para obter d.....	111
Tabela 45 - Dados para obter a relação de contatos plásticos pelo número de contatos.....	111

LISTA DE SIMBOLOS

a	Aceleração
a_α	Aceleração angular
C_1	Constante positiva
C_2	Constante positiva
\cos	Cosseno
d	Altura de pico
E	Módulo de elasticidade
F	Força de atrito
F_c	Força centrífuga
F_k	Força de atrito cinético
F_s	Força de atrito estático
g	Aceleração da gravidade
h	Altura
HRc	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
L	Comprimento
L	Comprimento
m	Massa
M	Número de pontos aplicados de perfil
m_0	Momento espectral de primeira ordem
m_2	Momento espectral de segunda ordem
m_4	Momento espectral de quarta ordem
N	Força Normal
N	Número de perfis
n	Número total de contatos
n_p	Número de contatos plásticos
r	Raio
Ra	Desvio médio aritmético 2D
R	Raio médio das asperezas
Sa	Desvio médio aritmético 3D
$S5z$	Dez pontos de altura da superfície

Sal	Auto correlação do comprimento com decaimento
Sdq	Média quadrática das inclinações
Sdr	Razão da área interfacial desenvolvida
Sds	Densidade de cumes
sen	Seno
Sfd	Dimensão fractal
Sk	Profundidade da rugosidade central
Sku	Kurtosis
SMr1, Smr2	Pico / material componente do vale
Sp	Altura máxima de pico
Spk/Spk	Redução de pico / altura de vale
Sq	Desvio médio quadrático
Ssc	Media aritmética da curvatura dos picos
Ssk	Skewness
Std	Direção da textura
Str	Relação de aspecto da textura
Sv	Altura máxima de vale
Sz	Altura máxima
t	Tempo
tan	Tangente
W	Força peso
\bar{z}_s	Altura entre o plano médio da superfície e o plano médio dos picos
α	Largura de banda
β	Ângulo Então, entre a força normal e a resultante entre a força normal e força de atrito estático
$\eta(x, y)$	Conjunto de dados de superfície áspera
θ	Ângulo de inclinação do plano inclinado
θ_s	Ângulo de atrito
μ_k	Coeficiente de atrito cinético
μ_s	Coeficiente de atrito estático
σ_s	Desvio padrão da distribuição de alturas dos picos
ω	Velocidade angular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVAS	13
1.2 OBJETIVO	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 TRIBOSSISTEMA	16
2.2 ATRITO	18
2.2.1 Definições	19
2.2.2 Ensaio de Atrito Estático	24
2.2.2.1 Tribômetros	26
2.3 CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES RUGOSAS	51
Modelo de Greenwood e Williamson G-W	51
2.4 AVALIAÇÃO TOPOGRÁFICA DE SUPERFÍCIES	60
2.4.1 Definições Básicas	61
2.4.2 Conjunto de parâmetros S	64
2.4.3 Conjunto de parâmetros V	66
3 MATERIAIS E MÉTODOS	67
3.1 PREPARAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVAS	67
3.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS CORPOS DE PROVAS	71
3.3 ROTINA DE CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA	74
3.4 DISPOSITIVO PLANO INCLINADO UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS	76
3.5 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	80
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1 RUGOSIDADE	82
4.2 ATRITO	89
5 CONCLUSÕES	96
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE A - PARÂMETROS DE RUGOSIDADE PARA OS GRUPOS	103
APÊNDICE B - CÁLCULO DO MOMENTO ESPECTRAL E LARGURA DE BANDA (ALFA) E RAIO MÉDIO	107
APÊNDICE C - ANÁLISE DE VARIÂNCIA	108
APÊNDICE D - DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA RELAÇÃO DO NÚMERO DE CONTATOS PLÁSTICOS COM O NÚMERO TOTAL DE CONTATOS (np/n)	110

1 INTRODUÇÃO

A preocupação do homem com os problemas tribológicos de atrito e desgaste não é surpreendente, porque o nosso envolvimento com tais fenômenos afetam quase todos os aspectos da vida. Estes problemas não se limitam às máquinas onde ocorre contato mecânico, eles também têm influências profundas em muitos outros aspectos da vida. O próprio movimento dos animais e de suas articulações é claramente uma situação tribológica. O atrito também está presente em atividades de lazer, sejam escaladas ou qualquer forma de jogos de bolas, tais como o giro de uma bola de críquete, golfe ou nossa proficiência em patins ou esquis. Segurar, cortar e escovar são outras manifestações do impacto da Tribologia em nossa vida diária, enquanto a limpeza dos dentes é claramente um processo de desgaste controlado, onde deseja-se evitar o desgaste do esmalte, enquanto desgasta-se filmes indesejados. Mesmo a capacidade de caminhar é dependente da existência de atrito adequado enfim, não há dúvidas de que os efeitos tribológicos tiveram claramente um efeito importante sobre todo o processo evolutivo. O contato entre superfícies sólidas é fundamental, para o funcionamento de máquinas, equipamentos, enfim tanto em mecanismos, criados pelo homem, como naturais (Halling, 1989).

1.1 JUSTIFICATIVAS

O movimento relativo entre superfícies planas de contato são comuns a muitos projetos de engenharia. Na operação de muitos mecanismos identificam-se os problemas de atrito como um dos principais obstáculos para o êxito do funcionamento desses dispositivos. Testes dos efeitos do atrito entre duas superfícies planas é difícil devido a problemas de alinhamento relativo das superfícies. Portanto, se duas superfícies planas de interface são desejadas, o equipamento de plano inclinado é geralmente usado.

Atrito é uma das principais causas de desgaste e dissipação da energia. Consideráveis ganhos podem ser feitos através de um melhor controle do atrito. Estima-se que um terço dos recursos energéticos do mundo em apreço é

necessariamente utilizado para superar atrito de uma forma ou de outra (Stachowiak, 2001). Daí a importância de conhecer-se o coeficiente de atrito estático o mais próximo do real quando se está projetando um equipamento ou um sistema, pois como o coeficiente de atrito estático é para a maioria dos casos maior do que o cinético ou dinâmico. O projeto se dá para as condições de forças de atrito calculadas com o μ_s (coeficiente de atrito estático), pois é a situação mais crítica. A literatura apresenta faixas de valores muito amplas para diversos pares de materiais, pois o valor de coeficiente de atrito tem a influência de diversos fatores, como acabamento superficial, temperatura de trabalho, umidade relativa do ambiente, lubrificação portanto essa faixa de valores deve contemplar diversas situações (Halling, 1989).

O estudo da redução do atrito entre os corpos, ou das conseqüências deste fenômeno, envolve os mais diversos ramos da ciência. Tanto nas mais avançadas aplicações tecnológicas (indústrias automobilística, aeroespacial, petrolífera, informática e telecomunicações) como nas ciências humanas (medicina, ortodontia, música, ergonomia) procuram-se entender quais são os mecanismos responsáveis pelo atrito e de que forma este fenômeno pode afetar o funcionamento do sistema, aumentando a sua eficiência, reduzindo custos e até ocasionando uma melhoria na qualidade de vida da sociedade (Hutchings, 2001).

Existe uma grande dispersão nos valores do atrito estático, μ_s , obtidos nos ensaios de atrito, realizados por vários pesquisadores, de onde se conclui que em todos os sistemas de medição, obtenção das superfícies de contato e procedimentos experimentais utilizados existe uma grande quantidade de variáveis, que não são de fácil identificação, que por sua vez ocasionam estas perturbações nos resultados. Por exemplo, nos ensaios realizados por Dunkin e Kim (1995), mostrados na Figura 1, que relaciona atrito estático com a carga normal para corpos de provas de silício dopado com arsênio, verifica-se que o atrito estático, μ_s , para a mesma carga normal, 8 mgf, varia de 0,2 a mais de 3. Observa-se que existe um aumento do coeficiente de atrito estático e do desvio padrão à medida que a força normal diminui, Acredita-se que isto é devido às partículas mais leves são mais susceptíveis a mínimas alterações no seu ambiente (por exemplo, umidade) por causa das forças mais baixas envolvidas.

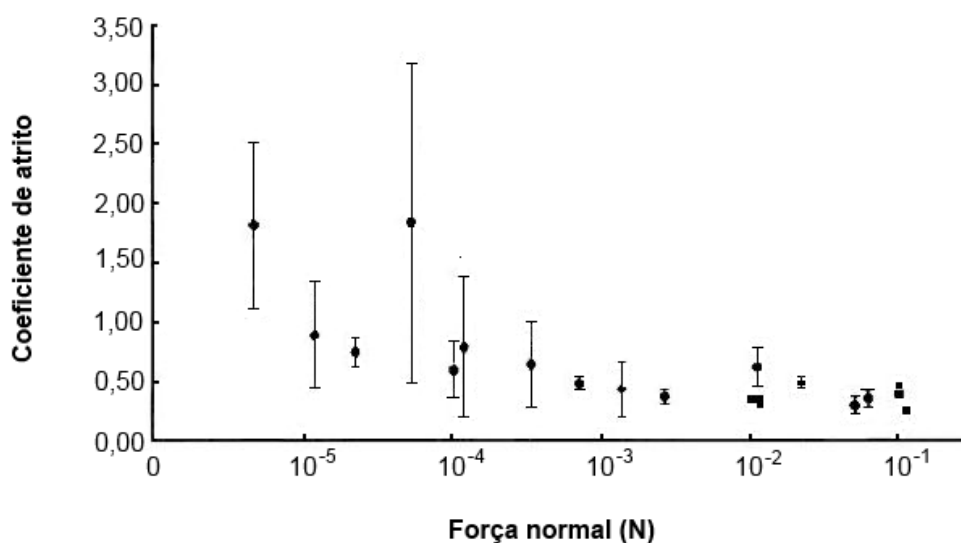


Figura 1 - Relação da carga normal com atrito estático para silício sobre silício medidos com o sistema centrífugo- $g=10m/s^2$ (adaptado de Dunkin e Kim, 1995)

1.2 OBJETIVO

Considerando as justificativas descritas, esta Dissertação de Mestrado tem como objetivo determinar o valor do coeficiente de atrito estático μ_s em função da área nominal de contato e pressão nominal, a fim de estudar os fatores que podem ocasionar dispersões e possíveis correlações do atrito estático com o acabamento superficial avaliado através de parâmetros específicos de rugosidade 3D.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi desenvolvido dentro do Grupo de Materiais, Tribologia e Superfícies (GrMaTS) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O trabalho está estruturado em 7 capítulos. Após a introdução apresenta-se a revisão da literatura com assuntos como parâmetros superficiais, conceito de atrito e ensaios de atrito estático. O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho e o capítulo 4 contém os Resultados e Discussões. Finalmente são apresentados os Capítulos 5, com as Conclusões, o Capítulo 6, com sugestões para Trabalhos Futuros e as Referências.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A palavra Tribologia é derivada do Grego, *TRIBOS* e significa atrito, de modo que a tradução literal seria “a ciência do atrito”. A norma ASTM G40-93 define Tribologia como: “a ciência e a tecnologia de interação de superfícies em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados”. Esta definição, apesar de abraçar a tradução literal, é de importância ainda maior e foi criada para reunir o interesse em atrito e desgaste, de químicos, engenheiros, metalúrgicos, físicos e similares. A preocupação abrangente com tribologia imediatamente ilustra a natureza interdisciplinar do tema. Em certo sentido, é o nome por si só que é relativamente novo porque o interesse do homem nas partes constituintes da Tribologia é mais velho que a história registra. É evidente que a invenção da roda ilustra a preocupação do homem com redução do atrito no movimento translacional, e este invento certamente antecede história documentada (Halling, 1989).

2.1 TRIBOSSISTEMA

No estudo do atrito, desgaste e lubrificação, percebe-se que a resistência ao desgaste e a força ou coeficiente de atrito não são dependentes apenas dos materiais envolvidos e suas composições. Essas medidas são afetadas também pelas condições dos ensaios, condições do ambiente, acabamento superficial, presença de óxidos, lubrificantes ou abrasivos presentes na interface e tipo de desgaste envolvido. Em decorrência é necessário especificar um sistema bem definido de modo a delimitar o campo de validade das propriedades tribológicas. A este sistema atribuí-se o nome de “Tribossistema” ou “Sistema Tribológico” (Fig. 2).

Segundo Czichos (1978), criador da proposta de tribossistema, a estrutura do mesmo consiste em quatro elementos: Corpo, Contra-Corpo, Meio Interfacial e Ambiente.

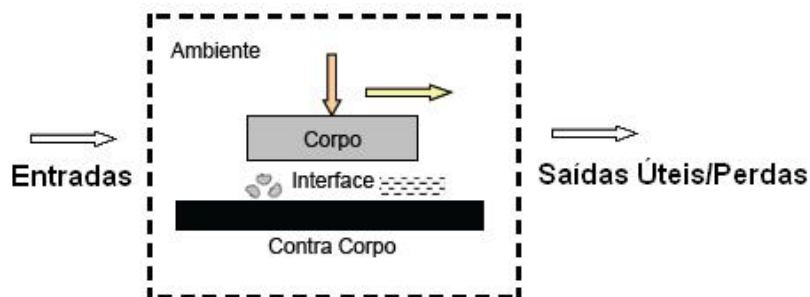


Figura 2 - Sistema Tribológico (adaptado de Czichos, 1978)

Resumidamente, o funcionamento dos diferentes sistemas tribos-mecânico consiste, basicamente, em converter entradas em saídas, que são utilizadas tecnicamente. As relações funcionais de causa e efeito entre entradas e saídas são acompanhados por perdas de saídas, de energia mecânica e de materiais, denotado pelo atrito e perdas por desgaste.

De um ponto de vista externo ao sistema, o sistema pode ser tratado como uma caixa-preta com entradas e saídas, como mostra esquematicamente na Figura 3.

A função técnica muitas vezes pode ser expressa como uma relação entre uma entrada e uma saída útil. Nem todas as entradas podem ser consideradas desejáveis, algumas podem ser consideradas como distúrbios. Nem todas as saídas podem ser desejadas, tais saídas podem do ponto de vista prático, serem consideradas como perdas.

De um modo geral, parte de uma entrada funcional pode ser perdida, aparecendo como uma perda na saída. No entanto, a perda de saída não necessita de ser totalmente o mesmo tipo de quantidade como a entrada ou saída de dados úteis (Czichos, 1978).

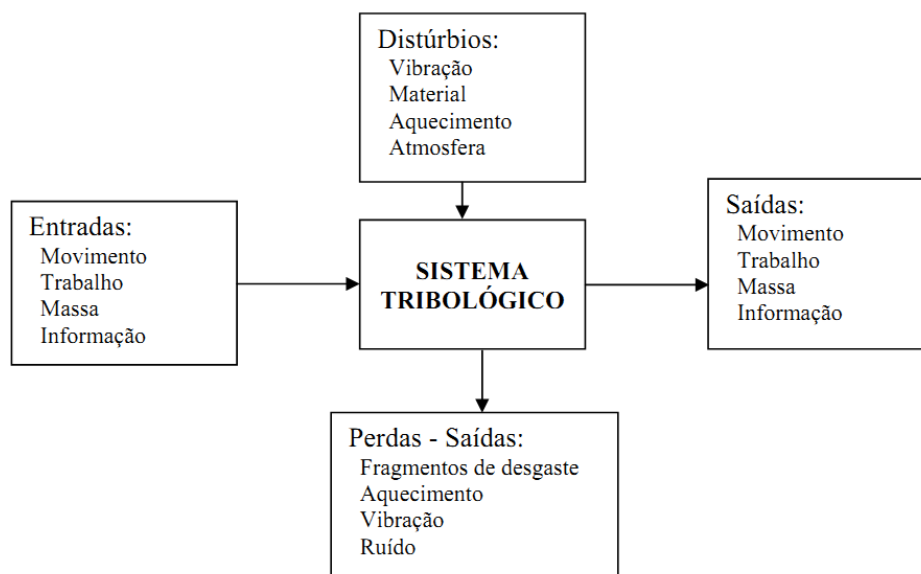


Figura 3 - Entradas e saídas do sistema tribológico (adaptado de Czichos, 1978)

2.2 ATRITO

Leonardo da Vinci (1452 - 1519) foi provavelmente o primeiro que estudou de uma forma criteriosa e científica o fenômeno do atrito. Afirmou que a força de atrito é proporcional à força normal, que independe da área de contato e atribuiu um valor de proporcionalidade entre a força de atrito e a força normal de 0,25. Desta forma se tratou o atrito durante mais de duzentos anos, quando Guillaume Amontons (1663 - 1705) chegou à conclusão de que materiais diferentes apresentam valores de atrito diferentes (naquela época acreditava-se que o atrito era uma propriedade do material) e que o atrito é causado pela interferência entre asperezas. Em meados do século XVIII, Euler introduz o símbolo μ para o coeficiente de atrito, conceitua o atrito estático e estabelece que o coeficiente de atrito estático é maior que o cinético (ASM Handbook, 2006).

Cientistas como, Charles Augustin Coulumb (1736 – 1806), Leonhard Euler (1707 –1783), John Theophilus Desagulier (1683 – 1744), Osborne Reynolds (1842 – 1919), Heirich Rudolph Hertz (1869 – 1851), George Vogelpohl (1900 – 1975), Frank Philip Boluden (1903 – 1968) e diversos outros deram importantes contribuições para o desenvolvimento histórico do conhecimento dos fenômenos tribológicos (Dowson, 1998).

Enfim, no século XX houve um grande avanço no entendimento dos

fenômenos relacionados ao atrito. À medida que houve um progresso no conhecimento da mecânica dos sólidos deformáveis, novas teorias do atrito foram desenvolvidas, onde o conceito sobre o atrito foi considerado, e a sua natureza e forma foram melhoradas. Entretanto, alguns princípios básicos continuam sendo utilizados como parâmetros de projeto de equipamentos e de manutenção (Blau, 2008).

Essencialmente, quando trata-se de uma situação tribológica onde ocorre a interação de duas superfícies sólidas em um determinado ambiente, resultando em duas manifestações exteriores:

a) Dissipação de energia: Definida como a resistência ao movimento representada pelo coeficiente de atrito. Essa dissipação de energia resulta em calor liberado no contato e certa quantidade de ruído.

b) Mudanças das características: Durante o processo de escorregamento relativo, as superfícies alteram suas características, elas tornam-se mais lisas ou mais rugosas, as propriedades físicas, como a dureza, podem ser alteradas e pode-se perder material através do processo de desgaste. Essas mudanças podem ser benéficas, como acontece em situações de amaciamento, para produzir situações de operações próximas às ideais ou desastrosas, quando ocorre a falha da superfície. Portanto, nem sempre o atrito e o desgaste são fenômenos desvantajosos.

2.2.1 Definições

Quando dois corpos sólidos são colocados juntos, sob uma força normal diferente de zero e sofre a ação de outra força que tem uma componente paralela à superfície de contacto (força tangencial), deslizamento ou escorregamento pode ou não pode ocorrer, dependendo se a força tangencial pode superar a força de atrito se opondo a ela. Em alguns casos, a força normal pode ser devida apenas ao peso da parte superior do corpo que descansa sobre a parte inferior, mas em outros casos, a força normal pode ser devido a outras forças aplicadas além da gravidade. Se o movimento relativo vai ou não ocorrer depende da relação entre as forças envolvidas. A norma ASTM G40-93, (ASTM, 1992) define:

- Força de atrito: - "a força de resistência tangencial para a interface entre os dois corpos em que, sob a ação de uma força exterior, um corpo se move ou é susceptível de se deslocar em relação ao outro".
- Coeficiente de atrito - "a razão entre a força de resistência ao movimento tangencial entre dois corpos e a força normal que pressionando os corpos juntos".

Mais especificamente, a força que é apenas suficiente para resistir ao aparecimento de movimento relativo de escorregamento ou (F_s) que nos permite definir o coeficiente de atrito estático (μ_s):

$$\mu_s = \frac{F_s}{N} \quad (1)$$

A força que resiste ao movimento relativo de deslizamento, após o início do movimento, (F_k) dá origem a definição para o coeficiente de atrito cinético (μ_k):

$$\mu_k = \frac{F_k}{N} \quad (2)$$

É importante reconhecer que as equações 1 e 2 são definições e não leis ou modelos de atrito. Elas simplesmente definem uma proporcionalidade entre duas forças. Em muitos sistemas práticos de deslizamento, em particular na ausência de lubrificação eficaz, o coeficiente de atrito de deslizamento varia com o tempo, e também não é independente da força normal (Blau, 2008).

Assim sempre que há contato entre dois corpos sob uma carga normal, N , a força de atrito é necessária para iniciar e manter o movimento relativo. Três fatos básicos, conhecidos como as leis atrito de deslizamento em condições secas, têm sido experimentalmente estabelecidos:

- a força de atrito é proporcional a carga normal no contato;
- a força de atrito é independente de uma área nominal de contato;
- a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

Essas três leis são de confiabilidade variável, mas fornecem subsídios importantes nas observações empíricas, com exceção de alguns casos especiais.

A Figura 4 mostra os resultados típicos para o deslizamento não lubrificado, em ar, entre aço, e alumínio polido. O coeficiente de atrito permanece efetivamente constante, embora a carga variando de um fator em torno de 10^6 corroborando com a 1ª lei do atrito.

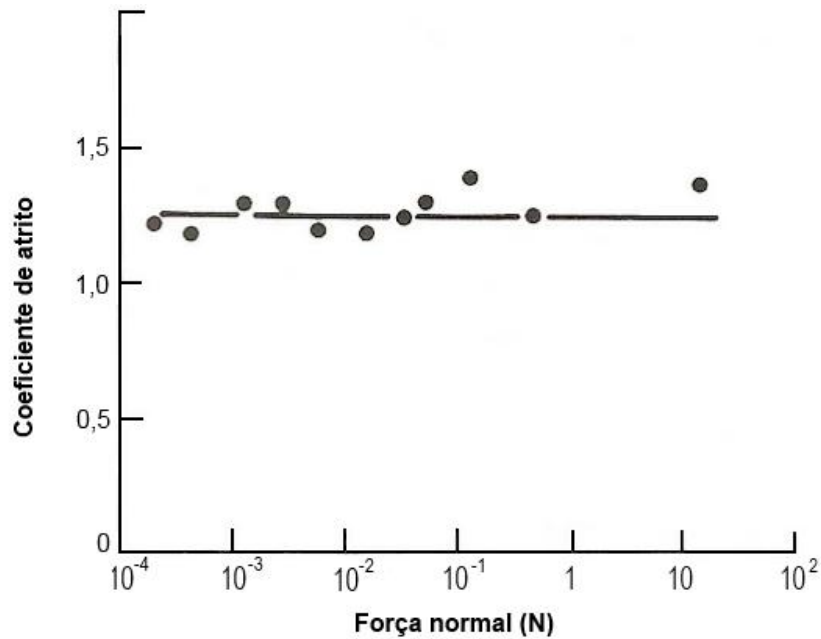


Figura 4 - Resultados típicos para o deslizamento não lubrificado, em ar, entre aço e alumínio polido- $g=10\text{m/s}^2$ (adaptado de Bowden e Tabor, 1950 *apud* Hutchings, 2001).

A Segunda Lei de atrito, também tem sido testada e seu enunciado corresponde para a maioria dos materiais, com a exceção dos polímeros. A Figura 5 mostra o coeficiente de atrito para controles deslizantes de madeira sobre a superfície de aço sem lubrificação. A carga normal foi mantida constante, enquanto que a área de contato nominal variou por um fator de cerca de 250, o valor de μ_s permanece constante.

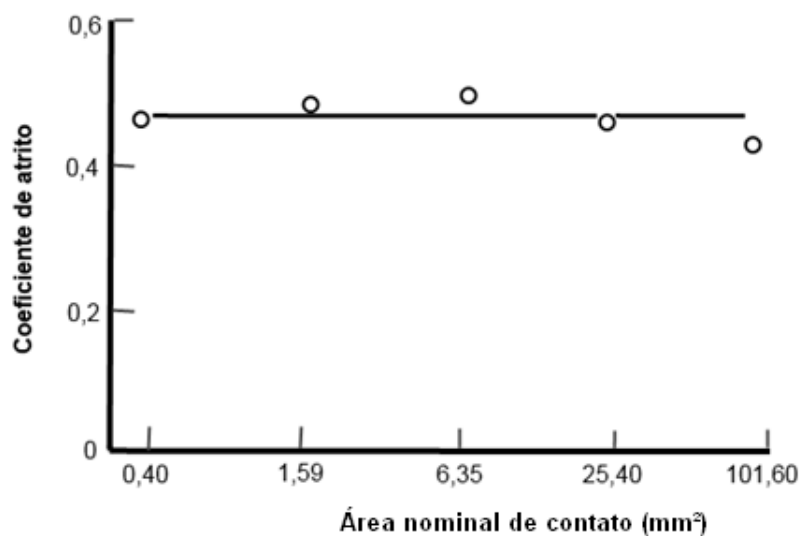


Figura 5 - Variação do coeficiente de atrito, μ , com área nominal de contato, para madeira contra aço a seco (adaptado de Rabinowicz, 1965).

A Terceira Lei de atrito é menos bem fundamentada do que as duas primeiras. É uma questão de observação comum de que a força de atrito necessária para iniciar deslizamento é geralmente maior do que o necessário para mantê-lo, e, portanto, o coeficiente de atrito estático (μ_s) geralmente é maior do que o coeficiente de atrito cinético, μ_k , (figura 6).

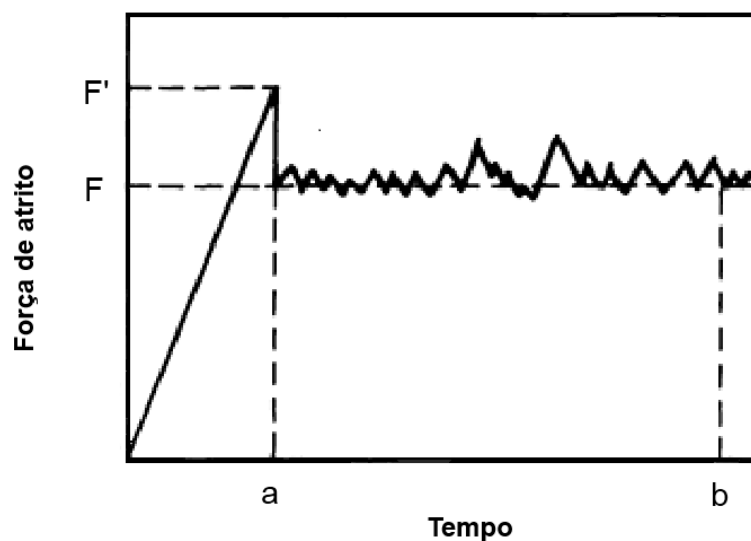


Figura 6 - Força de atrito em relação ao tempo (Budinski, 2006).

Mas uma vez que o deslizamento é estabelecido, μ_k vem a ser praticamente, em muitos sistemas, independente da velocidade de deslizamento embora a elevadas velocidades de deslizamento, da ordem de dezenas ou centenas de metros por segundo para metais, μ_k cai com velocidade crescente e tende a ficar constante para velocidades maiores, como mostra na figura 7 (hutchings, 2001).

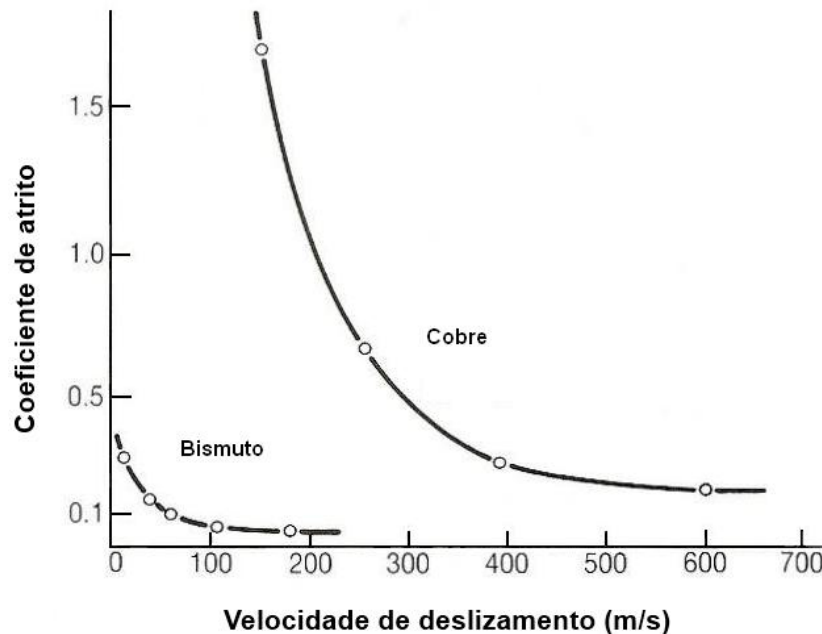


Figura 7 - Coeficiente de atrito em relação à velocidade de deslizamento para o cobre e o bismuto com contra-corpo de mesmo material (Bowden e Tabor, 1964 *apud* Hutchings, 2001).

É amplamente aceito que o fenômeno atrito é resultado de interações complexas de contato entre corpos que incluem os efeitos das asperezas da superfície, deformação plástica de um material mais mole por asperezas de outra superfície dura ou partículas de desgaste e interações moleculares levando a uma adesão nos pontos de contato íntimo. Um número de fatores, tais como as propriedades mecânicas e físico-químicas dos materiais em contato, topografia da superfície e ambiente, determinam a importância relativa de cada um dos componentes no processo de atrito (Stolarski, 2000). A um nível fundamental, existem três variáveis principais que controlam o atrito de sólidos não lubrificados:

(a) a área real de contato;

- (b) a resistência ao cisalhamento das junções adesivas formadas nos pontos de contato real;
- (c) o meio em que essas junções são rompidas durante o movimento relativo.

2.2.2 Ensaio de Atrito Estático

Coeficientes de atrito e parâmetros relacionados foram medidos por centenas de anos. Algumas destas medições são realizadas nas próprias máquinas e equipamentos para os quais os dados são necessários, mas frequentemente, as medições de atrito são realizadas utilizando dispositivos especialmente concebidos em laboratório. Medições laboratoriais de coeficientes de atrito são por vezes projetadas para simular situações particulares de contato deslizante, atrito em roscas para aplicações críticas, ou aprender sobre a natureza fundamental de atrito de sólidos ou sólidos lubrificados controlando cuidadosamente vários parâmetros, tais como força normal, a velocidade, acabamento da superfície, a temperatura, umidade, composição do lubrificante, etc. (Halling, 1989). Para medir-se atrito deve-se estabelecer o sistema a ser utilizado e preparação das superfícies em contato. Há três elementos envolvidos na preparação da superfície:

a) Formar o plano ou contorno adequado

Na formação da superfície de teste, um método deve ser utilizado para evitar elementos indesejáveis. Se a superfície é para simular uma peça de máquina específica, a amostra deve ter o mesmo acabamento superficial, configuração e o tratamento térmico conforme a referida peça. Retificação e torneamento podem produzir tensões residuais sub-superficiais e provocar o endurecimento em metais, alterando assim a resposta das camadas próximas da superfície para a superfície de contato.

b) A limpeza das amostras.

Se as peças são normalmente limpas de uma determinada maneira, antes da instalação, desta mesma forma deve-se proceder com a amostra. Se a superfície é destinada a estudos mais fundamentais de atrito, deve ser cuidadosamente preparado para remover os efeitos de usinagem e outros elementos decorrentes do processo de fabricação utilizado.

Não há uma "melhor maneira" para preparar superfícies para ensaios de atrito. O método selecionado em cada instância deve se ajustar à situação. Películas superficiais, como manchas ou umidade adsorvida podem ter um efeito significativo sobre o atrito quando a pressão de contato é menor e, quando as superfícies são muito lisas. Por outro lado, quando entre as superfícies em contato contém partículas abrasivas ou se a pressão de contato aplicada faz com que ocorra cisalhamento dentro da superfície, filmes finos podem ter pouco ou nenhum efeito sobre a força de atrito medida, (Blau, 2008). Mesmo nos métodos de ensaio ASTM, o procedimento de preparação da amostra difere de um método para outro.

Em alguns procedimentos de teste de desgaste, instruções de limpeza são bastante vagos. Por exemplo, a ASTM G-76 (2007), para o teste de estados de erosão de partículas sólidas, recomenda: "limpar a superfície da amostra com cuidado." O procedimento para o teste de bloco-contranel de desgaste, ASTM G-77(2010), é mais detalhada:

Limpar o bloco e o anel através de um processo que permite eliminar em qualquer escala, película de óleo, ou resíduo, sem danificar a superfície. Para metais, o seguinte procedimento é recomendado: limpar o bloco e o anel em tricloroetano, ultra-sonicamente, se possível, uma lavagem de metanol pode ser usada para remover quaisquer vestígios de resíduos de tricloroetano. Permitir que os blocos sequem completamente.

O padrão de pino-disco, ASTM G-99(2010), recomenda uma abordagem um pouco diferente:

Imediatamente antes do teste, e antes da medição ou pesagem, limpar e secar as amostras. Tome cuidado para remover toda a sujeira e materiais estranhos das amostras. Utilizar agentes de limpeza não-clorados, não formadores de filme e solventes. Em materiais secos com poros abertos devem-se remover todos os vestígios dos líquidos de limpeza que podem ser aprisionadas no material.

Certos solventes, como etanol e acetona, tendem a absorver água e deixam manchas ou filmes nas superfícies das amostras. O metanol é uma alternativa adequada para substituir o etanol. Ainda outros investigadores preferem simplesmente lavar as amostras com detergente e água quente, enxaguar e secar. Independentemente da escolha do método de limpeza das amostras, o que é importante na apresentação dos resultados dos ensaios de atrito é descrever os métodos utilizados para tal.

Recontaminação após a limpeza é outro aspecto. Se uma superfície de metal é simplesmente lixada, antes da execução do ensaio, pode ocorrer, no momento do ensaio, a reformação de um óxido. A taxa de oxidação (espessamento da película superficial) pode ser parabólica, em alguns casos, ou logarítmica, de modo que a taxa de variação da espessura da camada de óxido será mais elevada imediatamente após a limpeza de abrasivo. Em tais casos, para garantir maior repetibilidade do ensaio, à espera de várias horas, até que a camada oxidada atinja uma espessura relativamente constante, pode ser melhor do que executar o ensaio imediatamente após a limpeza da amostra quando a espessura oxidada muda rapidamente. Alguns materiais porosos ou poliméricos adsorvem contaminantes superficiais facilmente, outros materiais podem se dissolver em solventes normais de limpeza. Por isso, é importante verificar a compatibilidade dos materiais ensaiados com o procedimento de limpeza proposto.

c) Manuseio das amostras.

Em alguns casos, pode não ser possível utilizar produtos de limpeza líquidos, em vez disso, manusear espécimes cuidadosamente para evitar tocar na superfície de teste, e simplesmente utilizar um jato de ar ou de gás de inserção para remover as partículas antes dos testes. Manipulação das amostras com as mãos pode introduzir erros em testes de atrito.

2.2.2.1 Tribômetros

A edição de 1989 do Dicionário Oxford de Inglês define um tribômetro como "um instrumento para estimar o atrito de deslizamento" (apud Blau, 2008). A mais antiga referência fornecida por esse dicionário é de 1774 escritos de Goldsmith, que usou a palavra tribômetro para dizer um "medidor de atrito" (apud Blau, 2008). Em 1877, Knight definiu como "um aparelho parecido com um trenó, usado para estimar o atrito entre as superfícies em contato" (apud Blau, 2008).

Uma vez que o comportamento de atrito é uma propriedade do sistema tribológico, e não exclusivamente dos materiais em contato, nenhum ensaio pode simular todos os tipos de situações. Assim, os métodos devem ser selecionados para atender às necessidades específicas da investigação.

A norma DIN 50322 (apud Blau, 2008) foi concebida para definir várias escalas e graus de complexidade para ensaios de desgaste, mas ela pode aplicar-se igualmente bem ao ensaio de atrito. As categorias para estes ensaios são:

- I. Ensaios de campo em tamanho real (por exemplo: um caminhão)
- II. Ensaios do componente real, mas em uma bancada de testes (por exemplo: um caminhão com as rodas em um carrinho dinamômetro)
- III. Ensaios do subconjunto de um banco de ensaio (por exemplo: a remoção e ensaio de uma transmissão motorizada)
- IV. Ensaios de uma versão em menor escala do conjunto (exemplo: uma versão de testes para baixo porte da transmissão)
- V. Ensaios de tribos-elemento (exemplo: uma máquina de teste de equipamentos que utiliza engrenagens reais)
- VI. Ensaios envolvendo a geometria básica de contato (por exemplo: bola contra plano, rolo contra rolo, etc.)

De acordo com esta classificação, "os ensaios de laboratório" que normalmente caem em qualquer categoria, exceto a primeira, entretanto, alguns ensaios de campo são tão cuidadosamente controlados e monitorados que poderiam ser considerados na categoria "laboratório".

Em 1976, a Subcomissão de desgaste, da Sociedade Americana de Engenheiros de Lubrificação, ASLE, (agora chamada Sociedade de Tribologistas e Engenheiros de Lubrificação, STLE) publicou os resultados de uma extensa pesquisa de atrito e desgaste e dispositivos utilizados em laboratórios de pesquisa. A publicação contém 234 respostas, que foram agrupados em categorias baseadas na macro-geometria de contato como segue:

- A. Esferas múltiplas,
- B. Cilindros cruzados,
- C. Pino contra plano (movimento alternado ou linear),
- D. Plano-contra Plano (movimento alternado ou linear),
- E. Pino em rotação contra disco (face carregada),
- F. Pino contra disco em rotação (face carregada),
- G. Cilindro contra Cilindro (face carregada),
- H. Cilindro ou Pino contra cilindro rotativo (borda carregada),

- I. Plano Retangular contra cilindro rotativo (borda carregada),
- J. Disco contra disco (borda carregada),
- K. Múltiplas Amostras,
- L. Diversos.

Muitos dos dispositivos descritos pelo ASLE foram concebidos para reproduzir as condições de contato em tipos específicos de rolamentos, engrenagens, discos, buchas, e vedantes mecânicos, mas a maioria deles não se enquadram em nenhuma das categorias V ou VI da Norma DIN 50 322. Cada entrada na compilação descreve a gama dos parâmetros de funcionamento de cada um dos dispositivos de ensaio, os materiais típicos testados, e várias referências que ilustram a forma como a máquina foi utilizada em casos específicos.

Uma forma conveniente de classificar tribômetros é baseada na conformidade do macro-contato. Superfícies conformadas de tal forma que se ajustam a área nominal de contato essencialmente não mudam a geometria de contato com a ocorrência de desgaste. Em contraste, o termo superfícies não-conformes tem sido definidas como superfícies cujos centros de curvatura estão em lados opostos da interface, como em elementos de rolamentos ou dentes de engrenagem. As vantagens dos ensaios conformes são de que a área de contato nominal não muda durante a utilização, a distribuição da pressão tende a ser mais uniforme do que nos ensaios não conformes, e o estado de lubrificação pode ser mais bem controlada já que a espessura da película (a separação entre as superfícies) tende a ser constante. Uma das principais desvantagens dos ensaios de contato conformes é que pode ser difícil de alinhar as superfícies de amostras, de modo que elas fiquem perfeitamente paralelas. Uma grande vantagem dos ensaios não conformes, tais como a extremidade arredondada do ensaio pino contra disco, é que o contato pode ser feito em um ponto de tangência tal que o paralelismo exato e alinhamento coplanar dos dispositivos ou superfícies preparadas não são necessários. Por outro lado, em ensaios de contato não conformes as tensões tendem a variar com a localização na região de contato, e o desgaste altera a área nominal de contato de forma significativa, e, geralmente, não linear, durante o ensaio (Blau, 2008).

Segundo Blau (2008) os dispositivos de ensaios de atrito têm várias características em comum:

- (a) proporcionam um meio para fixar ou apoiar os dois corpos para os quais se desejam avaliar o atrito;
- b) proporcionam um meio para mover os corpos um em relação ao outro de um modo controlado;
- (c) proporcionam um meio de aplicar uma força normal, e
- (d) proporcionam um meio de medir ou inferir a magnitude da força de atrito tangencial em vigor, que se opõe ao movimento relativo.

Dentro desses requisitos centenas de ensaios de atrito foram desenvolvidos. O atrito pode ser medido com um simples transferidor e alguns pedaços de madeira, ou com uma mesa, uma roldana, um fio. Por outro lado, sofisticados dispositivos de alta precisão com instrumentos controlados por computador também foram usados para medir o atrito sobre a escala molecular. Entretanto, em muitos dispositivos de testes de atrito aparentemente simples, são numerosas as sutilezas que podem reduzir a repetibilidade, reprodutibilidade e a relevância dos dados (Blau, 2008).

Na prática habitual para a obtenção do coeficiente de atrito, apenas uma ou duas quantidades precisam ser apuradas com rigor: ou o ângulo de inclinação de um plano em relação à horizontal, ou as magnitudes da força de atrito e a força normal. Em todos os casos, exceto para a maioria dos estudos de investigação fundamental, apenas forças macroscópicas são medidas. Ou seja, a força externa necessária para superar a resistência ao deslizamento é medida, não são separadas as contribuições individuais das asperezas sobre superfícies em contato (Blau, 2008).

A concepção do método de ensaio laboratorial adequado deve considerar vários fatores, alguns dos quais podem não serem viáveis do ponto de vista dos equipamentos e outros recursos disponíveis; entretanto ignorá-los, seria abrir a porta a eventuais erros e possíveis interpretações erradas dos dados. Portanto os fatores a serem considerados são os seguintes:

- a) A forma e quantidade dos materiais,
- b) A limpeza e o preparo das superfícies das peças,
- c) O tempo adequado entre limpeza e testes,
- d) O tipo de acabamento superficial que deve ser utilizado,
- e) A direção do deslizamento,
- f) Tipo de movimento (contínuo ou intermitente),
- g) Pressão contato e velocidade a serem usados,

- h) Controle das condições ambientais,
- i) Características vibracionais da máquina de teste,
- j) Sistema de sensoriamento de força,
- k) Armazenamento dos dados,
- l) Taxa de amostragem ou intervalo de aquisição de dados,
- m) Número de testes necessários,
- n) Condições de lubrificação.

Enfim todas as informações necessárias para caracterizar plenamente as condições de testes, lubrificantes e os materiais utilizados de modo a não haver dúvidas quanto ao processo e para que os resultados anômalos possam ser interpretados adequadamente baseados em informações pormenorizadas.

Estas considerações tornam difícil o desenvolvimento de ensaios de atrito padrões porque não existe nenhuma aplicação de atrito padrão, e não há nenhuma combinação de materiais conhecidos que deslizando produzem sempre o mesmo coeficiente de atrito, independentemente da sua forma de medição (isto é, não existe tal coisa como o atrito é intrínseco de um dado par de materiais). Portanto, o desenvolvimento dos materiais de referência para calibrar os coeficientes de atrito de todos os tipos de tribômetros não é possível. Em vez disso, ensaios de máquinas devem ser calibrados para assegurar que as forças normal e tangencial venham a ser medidas com a maior precisão possível, ensaios padrões de atrito são desenvolvidos apenas se houver um número suficientemente grande, tanto de materiais ou componentes a serem testados de uma certa maneira ou se a importância de uma determinada aplicação justifica os rigores do processo de desenvolvimento de normas. Por um lado, as normas podem ser criadas apenas para controle de qualidade dentro de um ensaio ou análise laboratorial, ou eles podem ser formalizados nacional ou internacionalmente para uso generalizado (Blau, 2008).

Em alguns aspectos, os ensaios mais simples do coeficiente de atrito são mais eficazes. É fácil de visualizar conceitualmente a mecânica da montagem experimental, e é fácil de compreender os parâmetros a serem medidos. Também é fácil de obter a informação necessária para calcular μ . Experimentos simples podem ser tão eficientes como os mais sofisticados, se feito com cuidado e corretamente interpretado.

Em alguns sistemas estáticos, na eminência do movimento, é necessário determinar se ocorre ou não deslizamento, pois poderá ocorrer o tombamento da amostra antes do deslizamento. Considerando-se um sólido retangular de peso W e comprimento L em repouso em uma superfície plana (Fig. 8).

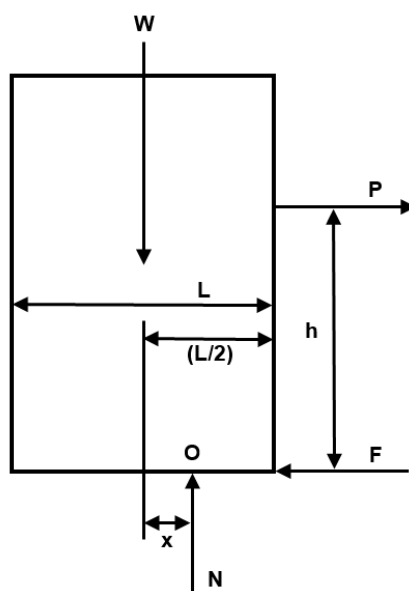


Figura 8 - Sistema de forças em um sólido retangular no qual pode ocorrer deslizamento ou tombamento (Blau, 2008).

A força normal é N e se opõe W . Quando atuado por uma força P a uma altura h , acima e paralela ao plano de descanso, o primeiro corpo irá permanecer no lugar, o sólido retangular (cursor) começará a deslizar, ou tombará. Para verificar qual dessas possibilidades irá ocorrer, montou-se um sistema de forças e criou-se um diagrama de corpo livre. A fim de evitar que ocorra tombamento, e para manter o equilíbrio estático, a força normal N se desloca para mais perto da extremidade direita da caixa, fora do centro por uma distância x . Estabeleceu-se uma origem O na posição de N e fazendo o somatório dos momentos em relação ao ponto O tem-se:

$$\sum M_o = Wx - Ph = 0 \quad (3)$$

Assim:

$$x = \left(\frac{Ph}{W} \right) \quad (4)$$

e

$$P = \left(\frac{Wx}{h} \right) \quad (5)$$

A caixa vai tombar no canto inferior direito se não ocorrer deslizamento ao longo do plano de descanso desde que uma força crítica de tombamento Pt seja aplicada:

$$Pt \geq \left(\frac{W}{h} \right) \left(\frac{L}{2} \right) \quad (6)$$

Na Equação 6, x é substituído com $(L / 2)$ uma vez que ocorre basculamento, no canto inferior direito da caixa. Note-se que esta situação exige que força F , que equilibra a força aplicada P , seja menor do que a força necessária para vencer a força de atrito estático,

$$F \leq \mu_s N \quad (7)$$

caso contrário o deslizamento ocorreria antes da caixa tombar. Além disso, se ocorre deslizamento, $0 \leq x \leq (L / 2)$. Se a força P e a força F forem iguais, tanto pode ocorrer deslizamento como tombamento.

O dispositivo para medição de coeficientes de atrito que usa o sistema “plano inclinado” (Fig. 9) pode ser construído de forma relativamente fácil e barata, entretanto, pode-se automatizar este tipo de equipamento através da incorporação de unidades motoras para inclinar o plano, níveis eletrônicos para medir a inclinação, detectores de movimento de amostras para determinar o momento exato do início do deslizamento (Carvalho e Nascimento, 2006. Passos e Silva, 2012. Montanez-Calau, 2011).

Uma das características dos ensaios de atrito com o sistema de plano inclinado é que a distribuição de carga se desloca para frente quando o ângulo de inclinação aumenta o que pode aumentar ligeiramente a força do atrito estático, em

comparação com um tipo de ensaio realizado em que a força de tração aumenta gradualmente em uma massa em repouso numa superfície horizontal.

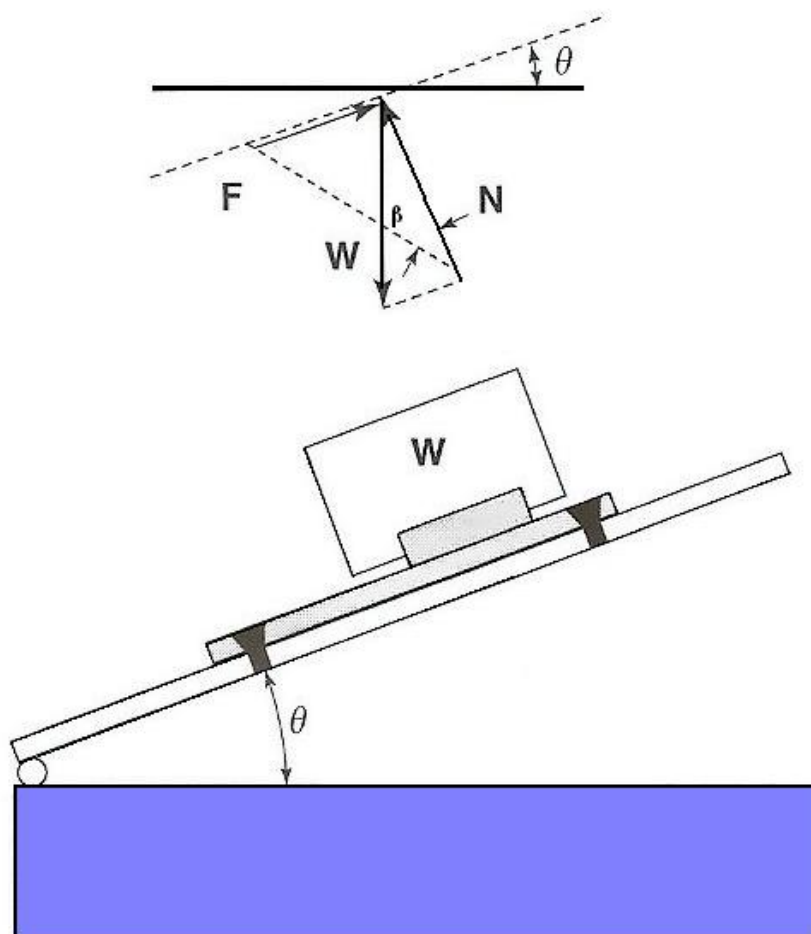


Figura 9 – Esquema do plano inclinado e diagrama de corpo livre (Blau 2008).

O peso total do corpo em repouso, isto é, a amostra mais o peso do suporte, é W . A força normal que se opõe W e resulta em equilíbrio estático perpendicular à superfície de deslizamento é N , quando o ângulo de inclinação é 0. Se o plano for inclinado por um ângulo $\theta > 0$, um sistema de forças é desenvolvido. Para θ diferente de 0, $N < W$ e,

$$N = \quad (8)$$

O componente de W ao longo da superfície de contato e para baixo é:

$$P = \quad (9)$$

Antes de movimento relativo, a força de atrito estático F_s , ($= \mu_s N$) \geq P. Então, β é o ângulo entre a força normal e a resultante entre a força normal e força de atrito estático, como mostrado no diagrama de corpo livre da Figura 9. Quando não há movimento iminente, $\beta > \theta$. Quando $F_s = P$, o movimento é dito ser iminente e a definição do coeficiente de atrito estático obtém-se:

(10)

$$\mu_s = \tan \theta \quad (11)$$

Ou, simplesmente,

$$\mu_s = \tan \theta \quad (12)$$

Sob estas condições, $\beta = \theta_s$, o ângulo de atrito ou o ângulo de repouso.

No dispositivo de plano inclinado não é necessário conhecer a massa do objeto que se quer medir o atrito. Tudo o que se precisa fazer para calcular o coeficiente de atrito estático é lentamente aumentar o ângulo de inclinação até que o bloco começa a deslizar e observar o ângulo de inclinação, no primeiro deslizamento, θ , usando um goniômetro. O coeficiente de atrito estático é simplesmente a tangente de θ .

É típico expressar o atrito estático ou cinético de sólidos não lubrificadas com duas casas decimais e não mais. Esta convenção foi amplamente adotada na literatura de Tribologia pelas seguintes razões:

- (a) o atrito estático e cinético da maioria dos sólidos em sólidos deslizantes em condições ambientais normais, geralmente situa-se entre 0,10 e 2,00, e
- (b) a força de atrito tende a variar durante o deslizamento, e a menos que sejam tomadas precauções especiais para controlar a força de atrito em função do tempo, a variação dos valores medidos, mesmo durante a mesma experiência, é tipicamente superior a 0,01. O coeficiente de atrito medido para sistemas tribológicos

bem lubrificadas podem cair abaixo de 0,01, assim nesses casos uma maior precisão é justificada.

Dois métodos padrão de ensaio ASTM são baseados no teste de plano inclinado: ASTM D-3248 (ASTM 1988, atrito estático de papelão e sólido) e D-3334 (ASTM 1990, a partir de monofilamentos de tecidos).

Quando se utiliza um dispositivo de plano inclinado para medir os coeficientes de atrito estático, como observado anteriormente, não é estritamente necessário saber-se o peso do objeto que descansa no plano móvel, mas isso não quer dizer que μ_s é independente da carga.

Outra disposição adequada para a obtenção de coeficientes de atrito estático ou cinético é o sistema "trenó" mostrado na Figura 10. A força normal é determinada pela massa total da amostra em movimento e quaisquer pesos agregados. A força tangencial é aplicada horizontalmente. Tal como acontece com o dispositivo de plano inclinado, existem versões comerciais deste dispositivo, alguns que têm controles elaborados e sistemas de aquisição de dados. Tais dispositivos são usados rotineiramente na medição do atrito de polímeros e têxteis. A força horizontal é aumentada até o início do movimento relativo, ponto em que o coeficiente de atrito estático pode ser determinado. Os meios de aplicação da força tangencial podem ser tão simples como a colocação de quantidades crescentes de peso sobre o prato pendurado a partir de uma polia (como Leonardo da Vinci fez), empurrando-a com uma "escama de peixe" (ou um dos seus similares mais sofisticados), ou puxar a amostra de bloco com um motor de acionamento, enquanto o controle da força de atrito é feito de forma contínua através da utilização de células de carga.

Budinski, (1992) apontou que o uso de linha de pesca de nylon para puxar a amostra ao longo do plano inclinado pode produzir maiores coeficientes de atrito estático do que usar uma corrente ou fio mais rígido. Assim, Budinski recomenda que a escolha do material do arame para puxar deve ser com base na natureza da simulação requerida.

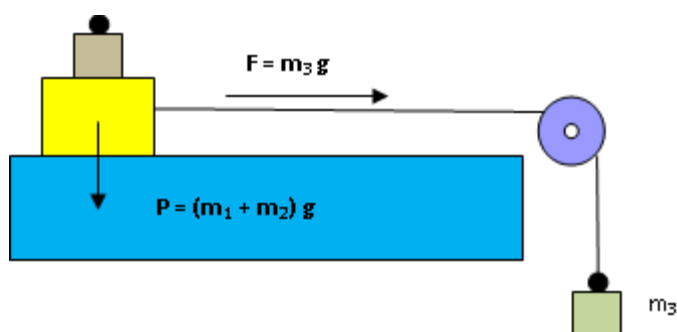


Figura 10 – Dispositivo tipo “Trenó” (adaptado de Blau, 2008)

O dispositivo utilizado por Dunkin e Kim (1995), para avaliação do atrito estático entre superfícies sólidas é o que usa a força centrípeta ocasionada pela rotação de um corpo. A configuração usada (Fig.11) é um corpo rígido sobre uma superfície de suporte em rotação. Os valores de apenas duas variáveis são necessários nesta concepção para medir o coeficiente estático de atrito para as superfícies de contacto entre o corpo e a superfície de apoio. Estas duas variáveis são a velocidade angular da plataforma e a distância desde o centro de rotação para o centro de gravidade do corpo rígido. Durante o funcionamento da plataforma, esta é coberta com uma caixa de *plexiglass* (não mostrado na Fig. 11.) que é 15,24 cm

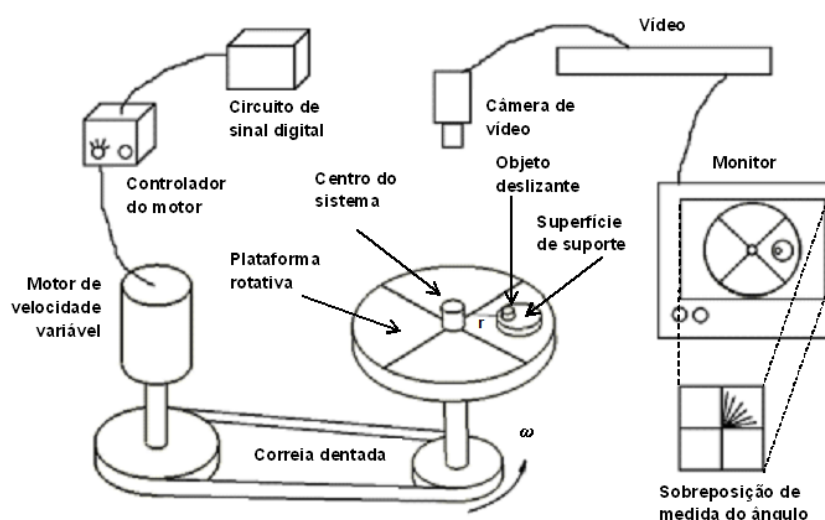


Figura 11– Dispositivo centrípeto para medir atrito(adaptado de Dunkin e Kim, 1995)

elevada acima da plataforma. Isto evita que a turbulência do ar se torne um problema quando os objetos são muito leves. Durante o funcionamento experimental, um objeto deslizante com massa m é colocado sobre a superfície de apoio e a sua distância a partir do centro da plataforma, r , é medido com uma precisão de +/- 0,2 milímetros usando um paquímetro. Nesta configuração a força normal, N , que mantém a superfície do objeto deslizante em contato com a superfície de apoio. É calculado pela igualdade

$$(13)$$

em que g é a constante gravitacional. Este valor de N permanece constante durante o evento experimental. A plataforma é forçada a girar e a sua velocidade angular, ω , é aumentada com uma aceleração a_ω , uniforme e bem baixa. Este movimento do objeto deslizando sofre uma aceleração dada pela expressão:

$$\mathbf{a} = \frac{d\omega}{dt} \mathbf{r} + \omega^2 \mathbf{r} = \mathbf{a}_t \quad (14)$$

A aceleração de rotação da plataforma é controlada tal que $a_\omega \ll \omega$ o que leva à expressão:

$$(15)$$

que é a aceleração do objeto deslizante. A velocidade de rotação da plataforma aumenta lentamente até alcançar uma velocidade angular em que a força centrífuga, F_c , que atua sobre objeto deslizante é maior do que a força de atrito, F_s entre as duas superfícies. Este desequilíbrio provoca o deslizamento do corpo, ao longo da superfície de apoio. Na velocidade angular em que o movimento deslizante do objeto ocorre pela primeira vez F_c , é igual a F_s :

$$F_c = ma = m\omega^2 r = F_s = \mu N \quad (16)$$

Ao longo deste evento a normal N permanece constante. O evento é fotografado usando uma câmera de vídeo que grava o evento. A fita é então analisada quadro a quadro para identificar, quando o movimento ocorre pela primeira vez e qual é a velocidade angular da plataforma nesse instante, então μ é determinado pela expressão:

(17)

O eixo do suporte da plataforma é fixo de tal forma que a estabilidade é assegurada e seu alinhamento é calibrado para minimizar o movimento vertical da superfície durante a rotação. O sistema de rotação e movimentação da plataforma é constituído por quatro partes que consistem; no movimento de polias e correias, o motor de velocidade variável, o controlador do motor e o circuito de sinal digital.

O controle do motor é feito através um controlador de velocidade ajustável com uma placa de interface digital.

Uma vez que a aceleração angular deve ser mantida pequena comparada com a velocidade angular, o circuito de sinal digital é usado para fornecer um sinal que vai aumentando lentamente e faz com que o motor atinja a velocidade máxima em 5 min.

As medições da velocidade angular versus o tempo decorrido mostra α sendo $0,087 \text{ rad.s}^{-2}$. Dado um raio máximo de 15,24 centímetros a contribuição do termo αr para o coeficiente de atrito estático teria um valor máximo de 0,0013. Isso apóia a decisão de desconsiderar o termo αr na equação. (2) para a aceleração. O erro máximo combinado introduzido por meio da leitura de r e w é inferior a 4%. A gama de valores de μ que pode ser medida com o aparelho é de 0,01 a 4,5.

Dunkin e Kim (1995), através deste dispositivo realizaram experimentos nos quais foram medidos os coeficientes de atrito estático entre superfícies planas com baixas forças normais. Estes ensaios foram feitos com pastilhas de silício tipo n dopada com arsênico com a superfície polida e contra corpo do mesmo material e com bolachas de alumínio polido contra cobre. Nos ensaios em que manteve-se a área nominal constante e variou-se a carga, mostrados na Figura 1 observa-se uma grande dispersão nos resultados.

No caso de ensaios com área nominal constante e variação da carga observa-se que o coeficiente de atrito estático, μ_s e o desvio padrão aumentam quando a carga normal diminui e torna-se muito baixa (Etsion e Amit, 1992).

Os resultados mostrados na Figura 1 apoiam as observações de Etsion e Amit, (1992) para as cargas inferiores a 100 mgf. Acredita-se que tais resultados são devidos a que os corpos de provas mais leves são mais susceptíveis a alterações mínimas no seu ambiente por causa das baixas forças envolvidas. Por exemplo, humidade pode desempenhar um papel significativo no aumento do coeficiente de atrito estático e, menos consistente. Além disso, sob cargas extremamente baixas efeitos de filmes contaminantes podem tornar-se significativos pois os contatos ocorrerão quase exclusivamente entre os filmes em vez do que entre os sólidos. Neste caso, o coeficiente de atrito elevado pode ser devido aos efeitos de cisalhamento dos filmes de contaminantes. Experiências mostraram que sob cargas relativamente leves líquidos, tais como óleo mineral e água desmineralizada na interface de superfícies planas tendem a aumentar o coeficiente de atrito, em vez de diminuir (Dunkin e Kim, 1995).

Para cargas superiores a 100 mgf, os resultados do coeficiente de atrito estático mostrados, na figura 1, são interpretados pelo autor como constante com um valor médio de 0,36 (Dunkin e Kim, 1995).

Os ensaios de atrito estático em que foi mantida a carga constante e variou-se a área nominal em uma faixa de 1,0 a 4,5 cm², (Fig. 12).

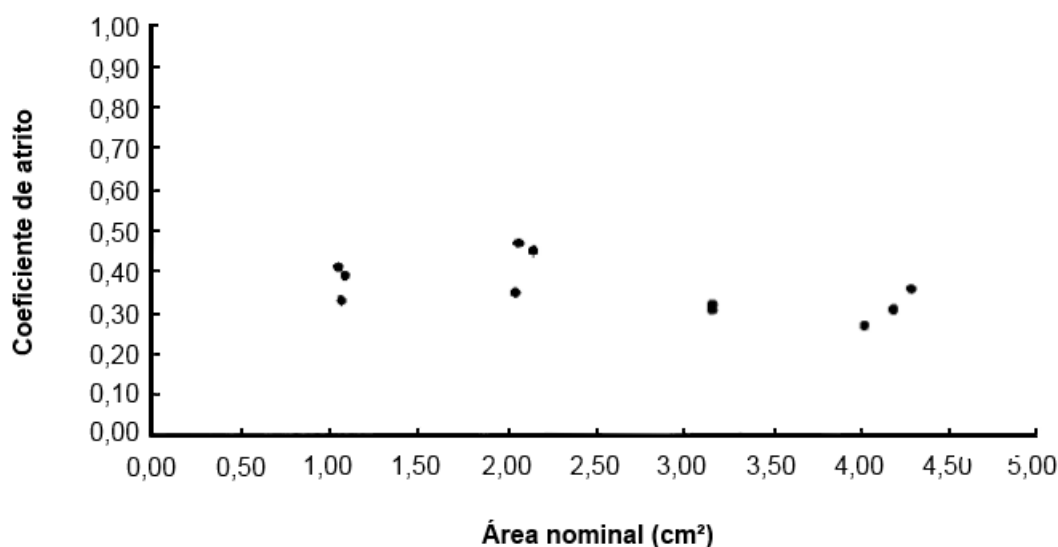


Figura 12 – Variação do coeficiente de atrito estático com área nominal (Dunkin e Kim, 1995)

Os resultados mostrados na Figura 12 indicam que o coeficiente de atrito estático é uma constante, com um valor médio de 0,35 e é independente da área nominal de acordo com a teoria, apesar de que, as superfícies serem polidas, a área real de contato é significativamente menor do que a área de contato nominal e é uma função da carga.

Os ensaios de atrito estático em que foi variada a pressão nominal são mostrados na Figura 13.

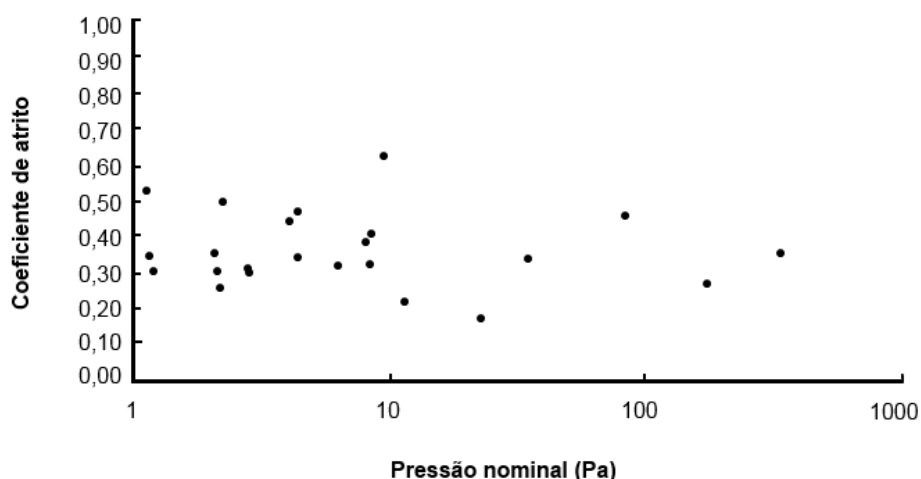


Figura 13 - Variação do coeficiente de atrito estático com pressão nominal (Dunkin e Kim, 1995)

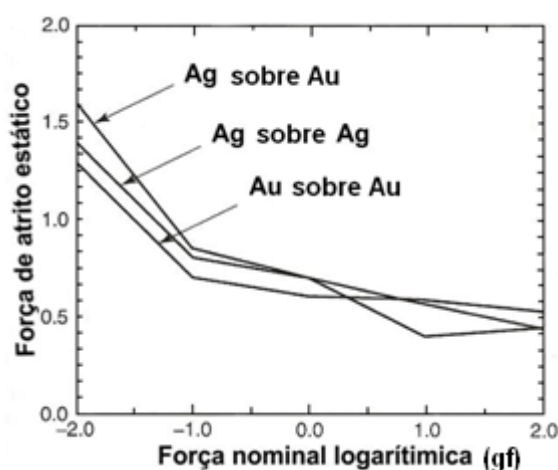
Nos ensaios em que foi variada a pressão nominal (Fig. 13) oriundo da combinação dos ensaios em que foram variadas a carga ou área não foi observado variação do coeficiente de atrito estático compreendido entre 0,20 e 0,65 para uma interface entre as superfícies de dióxido de silício. Nestes dados a menor carga foi de 100 mgf. Os testes de carga mais baixos não foram incluídos devido à dificuldade em determinar a área de deslizamento das amostras (Dunkin e Kim, 1995).

Rabinowicz (1992), utilizando um plano inclinado, obteve dados de atrito estático, para uma gama de metais nobres de alta pureza, que indicam claramente que o peso da amostra de deslizamento pode afetar significativamente a medição do coeficiente de atrito estático (Fig. 14). A implicação destes resultados é que em

cargas baixas, há uma maior tendência para ocorrência de cargas estáticas. Pode-se então, argumentar que, para amostras muito pequenas, as cargas estáticas podem retardar o aparecimento de deslizamento e, portanto, afetar a força de atrito (Rabinowicz, 1992).

Neste estudo, o coeficiente de atrito estático de um grande número de pares de metal nobre foi medido. Os resultados dos valores médios estatísticos de atrito e dispersão de valores de atrito são consistentes com aqueles obtidos em estudos anteriores, no entanto, uma vez que os testes anteriores foram realizados utilizando todas as amostras com carga de 20 g, a dependência de atrito na carga não foi observado (Rabinowicz, 1971).

O fato de que os pares de diferentes metais dar diferentes valores de atrito e que a compatibilidade entre os materiais e a estrutura cristalina hexagonal influenciam a magnitude do atrito, é conhecido a um longo período de tempo, mas o fato de que em cargas baixas o atrito aumenta consideravelmente parece ser novo. Uma consequência prática é que a cargas baixas, tais como aqueles encontrados com micro-mecanismos, a tendência para ação de cargas estáticas é muito maior do em altas cargas (Rabinowicz, 1965). O atrito de alta a baixa carga é um fenômeno difícil de explicar. Ele não parece ser um efeito da tensão superficial envolvendo umidade. Talvez um aspecto da energia de superfície de aderência está envolvido, Isso muitas vezes produz valores de atrito que são mais elevados em cargas mais baixas (Rabinowicz, 1965). Assim, um pequeno valor de carga proporciona um raio pequeno de junção, o que dá um valor elevado do coeficiente de atrito.



**Figura 14 – Força de atrito estático em relação a carga normal para materiais puros
(Rabinowicz 1992)**

Coeficientes de atrito estático medidos experimentalmente em condições ambientais ou contaminados provavelmente não vão assumir os valores obtidos em ambientes de pesquisa controlados. Em uma série de experiências conduzidas cuidadosamente, sobre o papel de oxigênio e cloro adsorvido sobre junções metálicas, quanto à resistência ao cisalhamento, Wheeler (1975), mostrou como μ_s pode ser reduzido na presença de gases adsorvidos. Figura 15 mostra que o coeficiente de atrito diminui com a adsorção de oxigênio ou cloro tanto no ferro como no cobre.

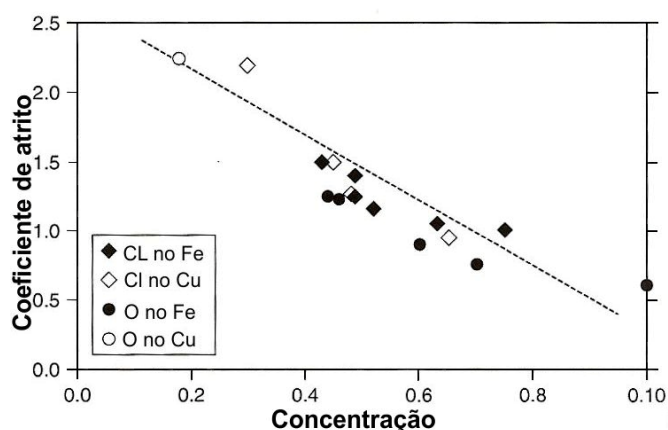


Figura 15 - Relação do coeficiente de atrito estático do Fe e Cu em relação a concentração da cobertura fracionada de Cl e O (Wheeler, 1975)

Por outro lado, os coeficientes de atrito estático para as superfícies de metal puro, bem limpas, na presença de gases não reativos, como He pode ser relativamente elevado, (Tabela 1). Nota-se que o atrito do cobre sobre o níquel e o atrito de níquel sobre cobre são diferentes. Isto é uma demonstração do fato de que a inversão dos materiais da amostra de deslizamento e a superfície usada como contra corpo pode afetar o atrito medido, confirmando a afirmação de que o atrito é uma propriedade da tribosistema e não apenas dos materiais em contato (Blau, 2008).

Tabela 1 Coeficiente de atrito estático para metais puros em atmosfera de gás Hélio à duas temperaturas.

COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO		
Combinação de materiais	300 K	80 K
Fe (99.9%) sobre Fe (99.99%)	1,09	1,04
Al (99%) sobre Al (99%)	1,62	1,60
Cu (99.95%) sobre Cu (99.95%)	1,76	1,70
Ni (99.95%) sobre Ni (99.95%)	2,11	2,00
Au (99.98%) sobre Au (99.98%)	1,88	1,77
Ni (99.95%) sobre Cu (99.95%)	2,34	2,35
Cu (99.95%) sobre Ni (99.95%)	0,85	0,85
Au (99.98%) sobre Al (99%)	1,42	1,50
Fe (99.9%) sobre Cu (99.95%)	1,99	2,03

Fonte Arkarov e Kharitonova, 1986 *apud* Blau 2008

O tempo durante o qual as superfícies permanecem em contato, imediatamente antes da solicitação para a ocorrência do movimento, pode afetar a parcela de adesão que contribui para o atrito estático. Pois pode ocorrer a contaminação das superfícies por contaminantes com baixa resistência ao cisalhamento, fazendo com que o coeficiente de atrito diminua. Se as superfícies estão limpas uma ligação interfacial mais tenaz é desenvolvida entre elas, e o coeficiente de atrito tende a aumentar.

Foi demonstrado por Kragelski (1965 *apud* Blau, 2008) que para metais (Figura 16) uma primeira aproximação do comportamento de atrito estático é dado pela:

$$\mu_s(t) = \mu_{s(t=\infty)} - [\mu_{s(t=\infty)} - \mu_{s(t=0)}]e^{-ut} \quad (18)$$

onde:

$\mu_s(t)$ é o valor da corrente do coeficiente de atrito estático, no tempo t ,

$\mu_{s(t=\infty)}$ é o valor limite do coeficiente de atrito estático para tempos longos,

$\mu_{s(t=0)}$ é o coeficiente de atrito estático inicial, e u é uma constante.

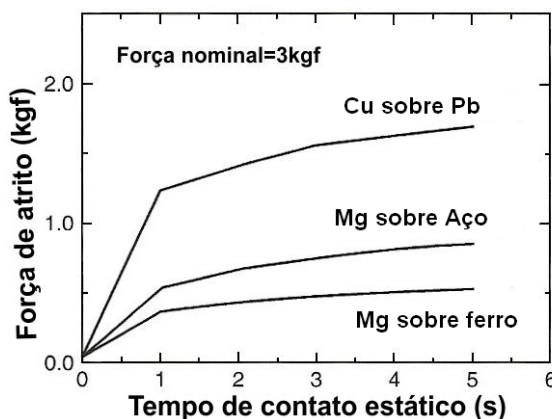


Figura 16 - Efeito do tempo de contato na força atrito estático entre metais (Kragelski, 1965 apud Blau, 2008).

Em contraste com a dependência exponencial no tempo, Buckley (1978) mostrou, usando dados de ensaios de um único cristal de Au contra liga Al com 5% de Cu, que o crescimento de junção ("*contact creep*") pode causar um aumento linear da força adesiva com o tempo.

Quando os materiais são colocados em contato íntimo, não é inesperado que os átomos nas suas superfícies comecem a interagir. O grau desta interação irá depender da pressão de contato, da temperatura e da afinidade de reatividade química que a espécie tem uma para a outra, de modo que não deve ser surpresa que o atrito possa mudar com o tempo de contato. Este fenômeno é de grande importância para o funcionamento intermitente de mecanismos controlados remotamente, como as antenas e outras partes móveis de satélites em órbita terrestre. Motores de acionamento devem ser capazes de superar o atrito de partida após longos períodos de inatividade. (Buckley, 1978)

Woo e Thomas, (1979) realizaram pesquisas teóricas e experimentais, e obtiveram resultados que estatisticamente sugerem que as propriedades que afetam o atrito variam com as dimensões da área nominal. Esta variação é devido à existência de flutuações espaciais aleatórias que estão fora da largura de banda das características impostas pelos processos de preparação das superfícies e que comprimentos de onda mais longos dominam completamente o comportamento do contato. Isto coloca em dúvida a lei de Amontons, de que o atrito estático é independente da forma da área nominal. Em um experimento, utilizando um dispositivo tipo trenó, planejado para ensaiar a relação do atrito estático com as

propriedades estatísticas da rugosidade do contato e com uma dimensão da área nominal, o atrito estático foi medido em três amostras retangulares de aço cuja área nominal e carga normal, foram mantidas constantes e cuja relação comprimento/largura variada. Segundo esses pesquisadores, o atrito estático encontrado mostrou relação linear com o comprimento da amostra de acordo com as previsões teóricas (Figura 17).

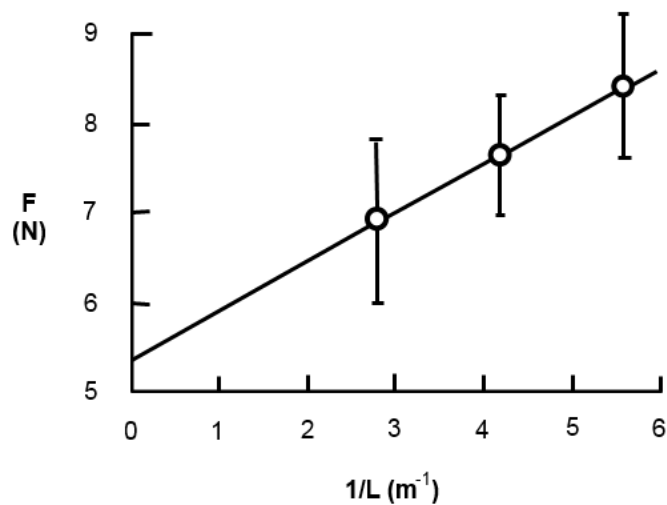


Figura 17 - Relação entre força de atrito estático e a variação do comprimento da amostra (Woo e Thomas, 1979)

Detalhes da justificativa teórica para investigação dos efeitos da superfície podem ser encontradas no trabalho de Woo e Thomas, (1979). Brevemente, o seu argumento assenta-se em duas observações. Muitas superfícies naturais criadas por processos aleatórios têm densidades de potência espectral linearmente relacionada com o quadrado do comprimento de onda (Sayles e Thomas, 1978) e a partir desta variação das alturas da superfície seria de esperar que dependessem do comprimento da superfície considerada. Usando isto e um modelo de contato entre as superfícies aleatórias envolvendo suposições plausíveis sobre os fenômenos de contato, o coeficiente de atrito estático é previsto pela seguinte equação:

$$\mu = \frac{c_1}{L} + C_2 \quad (19)$$

onde C_1 e C_2 são constantes positivas e L é um comprimento característico da superfície.

A verificação deste comportamento aparente, de que o coeficiente de atrito estático varia com o comprimento da superfície em contato, foi obtida através de uma técnica experimental simples. Amostras de aço com a mesma área nominal de contato, mas diferentes proporções entre comprimento e largura foram colocados sobre a superfície de uma placa e puxou-se as amostras paralelamente a até ocorrer o deslizamento. A força máxima durante a tração foi assumida como sendo a força necessária para superar o atrito estático. Cuidados foram tomados para tornar as superfícies de contato o mais constante possível quanto à topografia assim todas as superfícies foram retificadas ao mesmo tempo. O comprimento característico foi tomado como o lado maior da amostra.

O tracionamento da amostra foi aplicado aproximadamente através do centro de gravidade da amostra de modo a criar um momento na amostra que tenderia a sulcar o contra corpo com a borda. Argumentou-se, não sem razão, que em materiais duros estes sulcos ocasionados por pequenos momentos não têm efeito significativo e por isso foi ignorado. No entanto, qualquer força devido à sulcos na borda poderia muito bem ser proporcional à largura dessa borda, ou seja, inversamente proporcional ao comprimento de amostra na configuração experimental. Outro ponto é que, em função da área constante, o aumento esperado da variância ao longo da superfície (retificação paralela ao lado maior) seria acompanhada por uma diminuição proporcional, da mesma, em toda a superfície transversal.

Pode-se esperar que, com o aumento da variância, os pontos de contato real tendem a ocorrer em distâncias mais afastadas da superfície média dos planos e assim a separação média dos planos aumentará. A outra hipótese é que o tamanho médio de contatos reais são mantidos. Isso parece menos provável, pois se os contatos estão mais distantes da média, a intuição sugere que, uma vez que os extremos são eventos raros, os contatos seriam menores e mais numerosos. Assim, a área real constante para carga constante, conforme exigido tradicionalmente é talvez mais aceitável pelo valor de superfície.

Resta também o ponto de vista prático de que se os modelos baseados na teoria de processo aleatório representam adequadamente a natureza das superfícies

encontradas na maioria das situações tribológicas, onde a mão humana tem desviado o processo verdadeiramente natural.

A investigação experimental envolve muitas variáveis em potencial, algumas das quais podem aparecer como erros sistemáticos. Mesmo quando se tenta manter a semelhança dos espécimes fechados, haverá variações de peso e, conseqüentemente, da carga normal e da força de atrito e pode haver variação topológica. Isso pode contribuir para a precisão experimental relativamente pobre.

O trabalho de Woo e Thomas, (1979) levou os pesquisadores Chetwynde e Ganss, (1982) a realizarem ensaios a fim de testar com maior precisão e cuidado a sugestão de que o coeficiente de atrito estático pode não ser independente da área nominal de contato. Chetwynde e Ganss, (1982) projetaram um experimento de precisão relativamente alta para a execução dos ensaios, mantendo algumas características básicas do trabalho experimental de Woo e Thomas, (1979). Os resultados mostram alguma variação no coeficiente de atrito estático com a forma e o tamanho da amostra, mas a variação é pequena e nem sempre coerente com as previsões teóricas.

Foram realizados ensaios envolvendo superfícies com uma rugosidade R_a de cerca de $0,4 \mu\text{m}$. Os resultados obtidos estão resumidos na Figura 18. A Variação entre as amostras é muito pequena, mas a análise de variância mostra que ela é significativa com 99,9% de confiança. A regressão linear dá uma ligeira inclinação positiva. Há evidências de uma pequena tendência de o coeficiente de atrito aumentar linearmente com o comprimento da amostra.

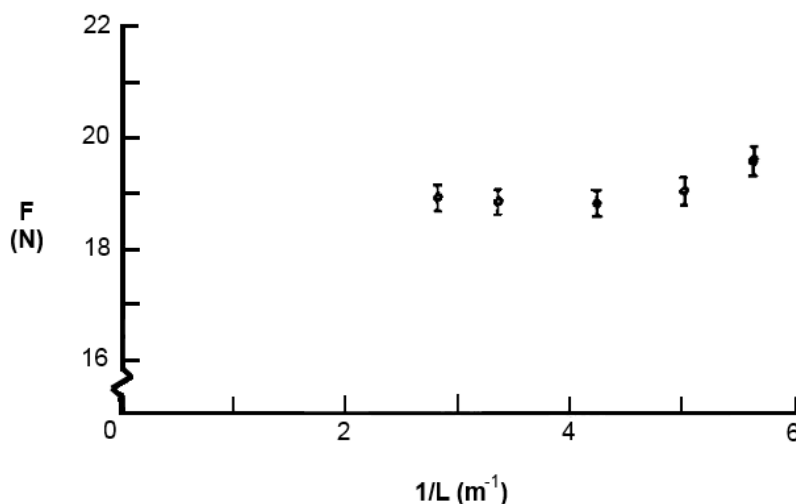


Figura 18 - Força de atrito em relação ao inverso do comprimento da amostra, cada ponto é a média de 25 leituras (Chetwynde e Ganss, 1982).

A Figura 19 mostra os resultados de outro ensaio, em que as superfícies foram retificadas para uma rugosidade em torno de $0,6 \mu\text{m}$, onde a diferença é significativa com 99,9% de confiança. No entanto, a tendência tem uma inclinação negativa o que não é consistente com o comportamento teórico esperado segundo a teoria de Woo e Thomas, (1979).

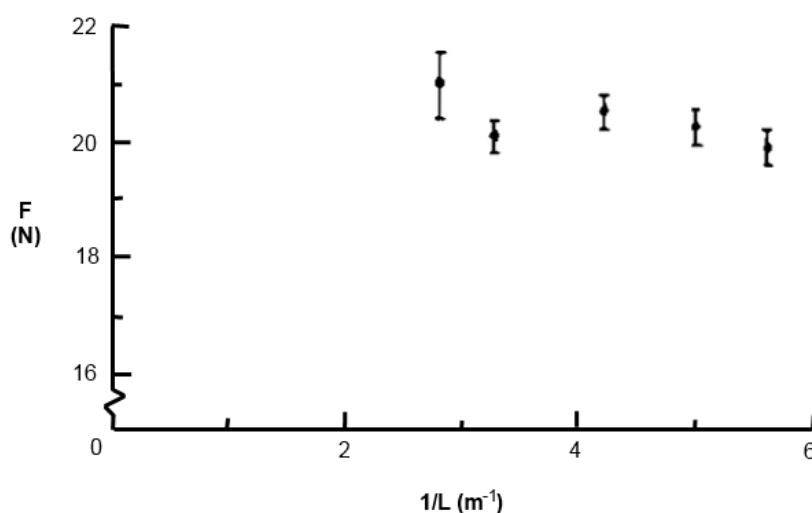


Figura 19 - Força de atrito em relação ao inverso do comprimento da amostra cada ponto é a média de 25 leituras (Chetwynde e Ganss, 1982).

Este conflito entre os resultados do trabalho dos pesquisadores Woo e Thomas, (1979) e do posterior trabalho de Chetwynde e Ganss, (1982) é mais uma constatação das dificuldades em controlar todas as variáveis possíveis em tais

experimentos, da grande dispersão nos resultados encontrados, além de considerar a questão, de a que ponto exatamente, os modelos teóricos de contato, devem ser tomados nessas interpretações. Vários outros erros sistemáticos podem ocorrer no que diz respeito aos procedimentos experimentais e ao dispositivo de ensaio. Magnetismo residual das amostras pode ser significativo para alterar a natureza das forças de contato. Após a retificação em uma mesa magnética revelou-se extremamente difícil desmagnetizar totalmente as amostras, (Woo e Thomas, 1979). A suposição de que todas as amostras têm intensidades de campo uniforme e assim, com a mesma área, todos exercem a mesma influência no ensaio, é plausível, mas isto também é passível de questionamento. Embora a discrepância entre estes resultados e os resultados anteriores provavelmente não é unicamente devido a tais causas, um fator tribológico de causa desconhecida também parece estar ativo e este assunto permanece aberto para maiores investigações (Chetwynde e Ganss 1982).

Diversos pesquisadores, ao longo do tempo, têm estabelecido correlações do atrito estático, da área real de contato com os parâmetros de rugosidade, por exemplo Ghabrial e Zaghlool, (1974) encontrou resultados crescentes do coeficiente de atrito estático para diferentes processos de fabricação com diferentes acabamentos, avaliando os ângulos das inclinações das asperezas. Koura e Omar,(1981) encontraram resultados semelhantes para o mesmo problema. Polyakov, B. et al.,(2012) analisando efeito da rugosidade da superfície em atrito estático de *nanowires* (NWs) sobre superfícies planas, estimando a área de contato real, que foi encontrada através de um modelo para múltiplas asperezas baseado na mecânica de contato, desenvolvido por Derjaguin–Muller–Toporov, verificou um aumento do coeficiente de atrito com o aumento da área real de contato, conforme mostra a Figura 20

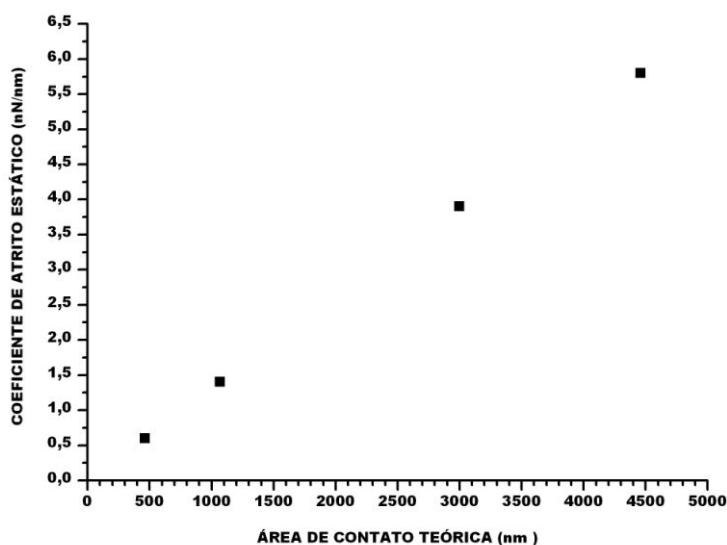


Figura 20 Coeficiente de atrito estático em relação a área teórica de contato para o par CuO X silicone amorfo (Polyakov et al, 2012).

Montanez-Calao (2011), em ensaios, utilizando Plano Inclinado Automatizado (Passos e Silva, 2012) avaliou o atrito estático de amostras retificadas em Aço AISI H13, com diâmetros de 30mm e 10mm de altura, com massa de 0,06 Kg, temperados e revenidos com durezas 41 HRc, 48 HRc e 57 HRc e um contra corpo revestido com cromo duro com dureza de 1072 ± 30 HV, constatou que efeito da dureza não alterou o coeficiente de atrito estático, μ_s , (Figura 21).

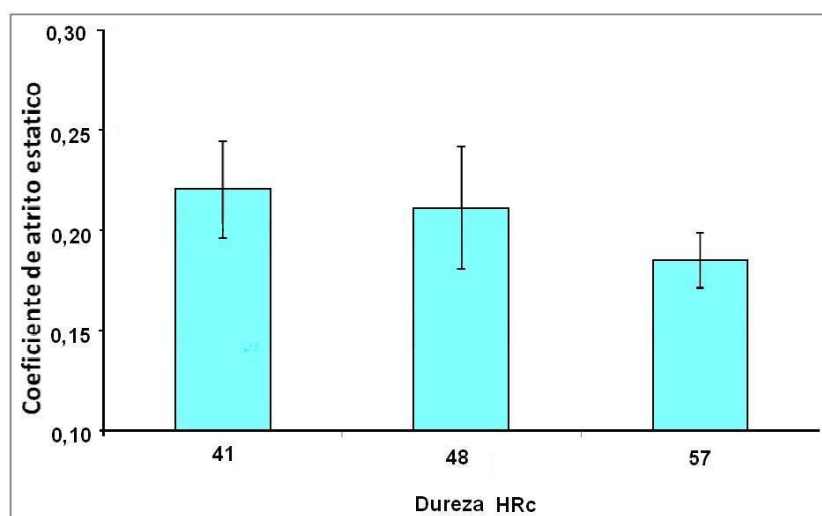


Figura 21 Variação do coeficiente de atrito estático com dureza para aço AISI H13 sobre Cromo duro (adaptado de Montanez-Calao, 2011).

2.3 CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES RUGOSAS

Quando duas superfícies nominalmente planas e paralelas se tocam levemente o contato ocorre em poucos pontos. Com o aumento da força normal as superfícies as asperezas mais altas se deformam aumentando a área real de contato.

Estas asperezas suportam toda a carga normal uma vez que são os únicos pontos de contato entre as superfícies e, portanto, responsáveis por quaisquer forças de atrito que atuam entre elas. Se uma corrente elétrica passar entre as superfícies se propagará através destes pontos de contato. Um entendimento de como as asperezas de superfícies em contato se comportam sob a variação de carga é essencial para o entendimento de qualquer estudo sobre atrito, desgaste ou resistência em contatos elétricos (Hutchings, 2001).

Modelo de Greenwood e Williamson G-W

No modelo de Greenwood e Williamson(1966) assume-se que todos os contatos são devidos a asperezas de forma esférica e com mesmo raio r , e se deformam elasticamente sob ação de uma carga de acordo com as equações de Hertz. As asperezas são mecanicamente independentes, ou seja, a carga que elas suportam depende de sua altura e não da carga suportada pelas asperezas vizinhas. A altura dos picos é expressa como um desvio do plano médio dos picos e é tratada como uma variável aleatória que segue uma distribuição de probabilidade gaussiana, com desvio padrão σ_s

A altura média dos picos fica acima da altura média da superfície como um todo, a uma distancia de Z_s , como indicado na Figura 22. A Figura 23 mostra a forma assumida pela distribuição de alturas ou função de densidade de probabilidade PDF (*Probability Density Funtion*) $f(z_s)$. A função é simétrica com relação à altura média dos picos. A probabilidade que um pico tenha uma altura, medido em relação ao plano médio de pico, na faixa (z_s, z_s+dz_s) é expressa em termos da PDF como $f(z_s) dz_s$.

A probabilidade que um pico aleatoriamente selecionado, tenha uma altura que exceda algum valor, chamado d , é a área abaixo da PDF, à direita de d . A Equação 23 é a equação da PDF.

$$f(z_s) = \frac{1}{\sigma_s(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{z_s^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (23)$$

Portanto, a probabilidade que um pico selecionado aleatoriamente exceda a altura d é representada pela Equação 24:

$$P(z_s > d) = \int_d^{\infty} f(z_s) ds \quad (24)$$

Este cálculo pode ser relacionado às áreas sob a curva normal padrão tabulados cuja média é 0 e o desvio padrão é 1.

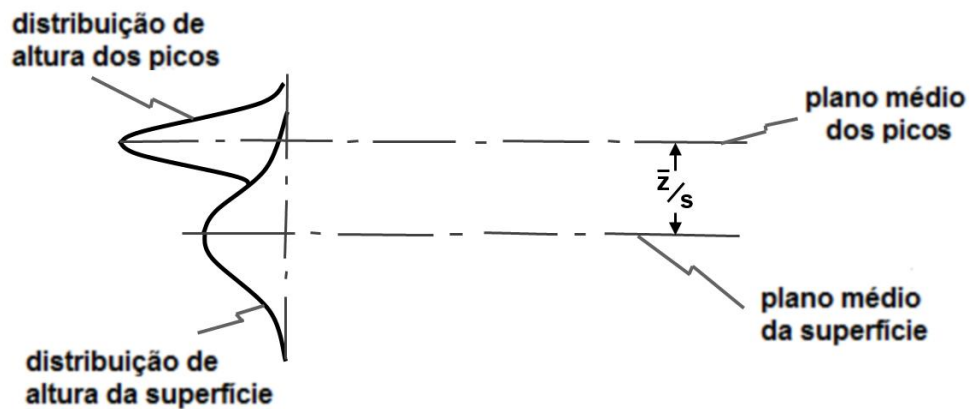


Figura 22 - Planos médios da superfície e dos picos e distribuição de alturas da superfície e dos picos (McCool, 1986).

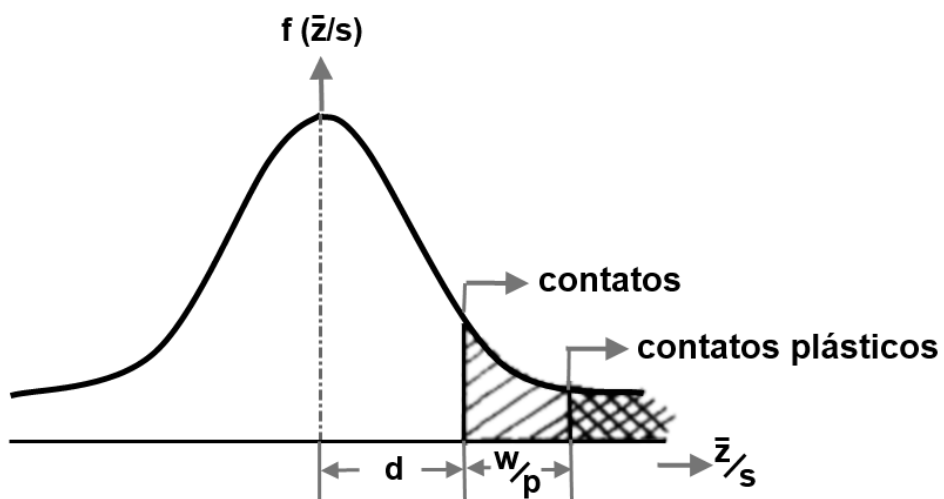


Figura 23 – Distribuição de alturas dos picos (McCool, 1986).

Usando a função padrão normal de densidade $\Phi(x)$, a probabilidade de que um pico tenha uma altura maior do que d , acima do plano meio dos picos é dada pela Equação 25.

$$P(z_s > d) = \int_{d/\sigma_s}^{\infty} \phi(x) dx = F_0\left(\frac{d}{\sigma_s}\right) \quad (25)$$

Sendo $F_0(t)$ a área sob a curva normal padrão à direita do valor t . Os valores de $F_0(t)$ para uma faixa de t de 2 até 4, são apresentados na Tabela 2. Quando superfícies são pressionadas uma contra a outra seus planos médios se tornam paralelos. Então se uma superfície rugosa e uma plana são pressionadas uma contra a outra até que o plano médio da superfície rugosa e o plano médio da superfície plana são separados por uma distancia d , a Equação 26 dá a probabilidade de que um pico selecionado aleatoriamente esteja em microcontato:

Tabela 2 – Valores das Funções de distribuição Normal Padronizada (McCool, 1986).

t	F₀
2,0	0,0227500
2,1	0,0001786
2,2	0,0001390
2,3	0,0001072
2,4	0,0081980
2,5	0,0062100
2,6	0,0046610
2,7	0,0034670
2,8	0,0025550
2,9	0,0018660
3,0	0,0013500
3,2	0,0006871
3,4	0,0003369
3,6	0,0001591
3,8	0,00007235
4,0	0,00003167

$$P(z_s > d) = F_0 \left(\frac{d}{\sigma_s} \right) \quad (26)$$

Sendo D_{sum} o número de picos por unidade de área, o número médio esperado de contatos em qualquer unidade de área é representado pela Equação 27.

$$n = D_{sum} F_0 \left(\frac{d}{\sigma_s} \right) \quad (27)$$

Dado que um pico esta em contato porque sua altura z excede d , o pico deve flexionar uma quantidade $w = z - d$, como mostra a Figura 24. Para uma esfera de raio R flexionada elasticamente em uma quantidade w , a solução de Hertz para a área de contato é dada pela Equação 28:

$$A = \pi R w (z - d) = \pi a^2 \quad z > d \quad (28)$$

Sendo a o raio de contato.

A Equação 29 representa a carga correspondente à aspereza:

$$P = \frac{4}{3} E' R^{1/2} w^{3/2} = \frac{4}{3} E' R^{1/2} (z - d)^{3/2} \quad z > d \quad (29)$$

Na qual,

$$E' = \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (30)$$

E_1 , E_2 , e v_1 , v_2 são o módulo de Young e o coeficiente de Poisson de cada um dos corpos. A pressão máxima (P_0) de Hertz no microcontato está representada na Equação 31:

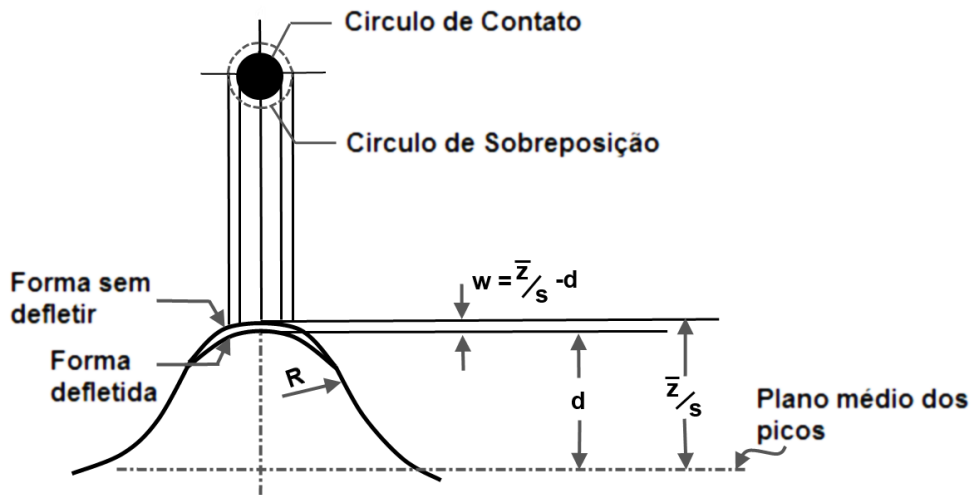


Figura 24 – Representação gráfica do contato geométrico nos picos (McCool, 1986).

$$p_0 = 1.5 \frac{P}{A} = \frac{2E'}{\pi R^{1/2}} w^{1/2} = \frac{2E'}{\pi R^{1/2}} (z - d)^{1/2} \quad (31)$$

Ambos A e P são funções da variável aleatória z. A média ou valor esperado da função da variável aleatória é obtido integrando a função e densidade de probabilidade da variável aleatória sobre o espaço de possíveis valores da variável aleatória. Isto é representado pela Equação 32.

$$A = \int_d^{\infty} \pi R(z - d) f(z) dz \quad (32)$$

Considerando-se contatos plásticos, um pico em contato experimentará fluxo plástico, quando a máxima tensão cisalhante excede a metade da tensão de escoamento em tensão simples. No contato de uma esfera e um plano, a tensão cisalhante máxima é relacionada com a tensão máxima de hertz p_0 assim:

$$\tau_{max} = 0.31 p_0 \quad (33)$$

$$0.31 \frac{2E'(z-d)^{1/2}}{\pi R^{1/2}} > \frac{Y}{2} \quad (34)$$

ou

$$z - d > 6.4R \left(\frac{Y}{E'} \right)^2 \equiv wp \quad (35)$$

$$z > d + wp \quad (36)$$

Assim, se a força externa aplicada for suficiente para ocasionar deformação plástica, qualquer pico com altura maior a $d+wp$ apresentará deformação plástica. O numero esperado de contatos plásticos por unidade de área é:

$$n_p = D_{SUM} F_0 \left(\frac{d}{\sigma_s} + wp^* \right) \quad (37)$$

Sendo;

$$wp^* \equiv \frac{wp}{\sigma_s} \quad (38)$$

Ou

$$wp^* = 6.4 \frac{R}{\sigma_s} \left(\frac{Y}{E'} \right)^2 \quad (39)$$

A relação de contatos plásticos com o numero total de contatos é dada pela Equação 40:

$$\frac{n_p}{n} = \frac{F_0 \left(\frac{d}{\sigma_s} + wp^* \right)}{F_0 \left(\frac{d}{\sigma_s} \right)} \quad (40)$$

Os valores e cálculos a obtenção dessa relação encontra-se no APÊNDICE D.

O modelo de Greenwood-Williamson tem três parâmetros de entrada:

R , que é considerado o raio constante do pico esférico,

σ_s , o desvio padrão da distribuição de altura dos picos (assumindo Gaussiana) e

D_{sum} , a densidade de área dos picos, para calcular, em função da separação entre duas superfícies rugosas, a densidade de contato, a densidade de contato

plástico, a carga média por unidade de área e a carga média por unidade de área de contato real.

Os três parâmetros do modelo GW estão relacionados com os momentos espectrais m_0 , m_2 , e m_4 de uma superfície isotrópica ou superfície equivalente à isotrópica.

Quando a superfície é anisotrópica existem duas direções ortogonais, conhecidas como direções principais, nas quais o valor de m_2 é mínimo e Máximo. Segundo McCool o valor designado de m_2 para uma superfície isotrópica equivalente pode ser construído por meio da média harmônica.

O valor de m_4 é obtido de forma similar, enquanto m_0 é independente da direção. Se m_0 é medido nas duas direções com m_2 e m_4 , a media aritmética ordinária e, não a media harmônica, pode ser usada para combinar os valores de m_0 .

A área de contato real de uma dada separação média de planos depende apenas da largura do parâmetro de banda α (Alfa), ('*bandwidth*'), definido pela Equação 41 enquanto que, elasticamente a carga suportada depende de α e m_2 , (McCool, 1986).

Com base nas comparações sugere-se que o modelo GW seja adotado por metrologistas para relacionar microgeometrias, medindo fisicamente quantidades mais compreensíveis, como a densidade de contato, carga, área real e densidade de contato plástico. (McCool, 1987). O parâmetro Alfa é dependente do processo de obtenção da superfície (usinagem) e dos parâmetros utilizados (McCool, 1986).

$$\alpha \quad (41)$$

Onde m_0 , m_2 , e m_4 são conhecidos como os momentos espectrais de primeira, segunda e quarta ordem do perfil e são representados pelas equações 42, 43 e 44 respectivamente. Eles são equivalentes ao quadrado da altura média, a inclinação e segunda derivada de um perfil em uma direção arbitrária, ou seja,

$$m_0 \quad (42)$$

$$m_2 = E \left\{ \left(d \right. \right. \quad (43)$$

$$m_4 = E \left\{ \left(d^2 z, \right. \right. \quad (44)$$

Sendo $z(x)$ o perfil em uma direção arbitrária x e $E\{ \}$ indica uma expectativa estatística. A raiz quadrada de m_0 que é conhecida como σ_s ou Sq e a inclinação dos picos $(m_2)^{1/2}$ fazem parte da saída de um perfilômetro.

Os parâmetros de entrada do modelo de GW podem se expressar em termos dos momentos espectrais.

A densidade de picos pode ser definida (Longuet-Higgins, 1957 apud McCool 1987) como:

$$D_{sum} = \frac{m_4}{6\pi m_2 \sqrt{3}} \quad (45)$$

BUSH (1976 apud McCool, 1987) sugere que o Raio R pode ser aproximadamente o recíproco da média dos picos de curvatura e dado pela expressão:

$$R = 0.375 \left(\frac{\pi}{m_4} \right)^{1/2} \quad (46)$$

BUSH (1976 apud McCool, 1987) também expressa o desvio padrão das alturas dos picos como:

$$\sigma_s = \left(1 - \frac{0.8968}{\alpha} \right)^{1/2} m_0^{1/2} \quad (47)$$

A Figura 25 apresenta as distancias representativas nas superficies de contato no modelo proposto por G-W.

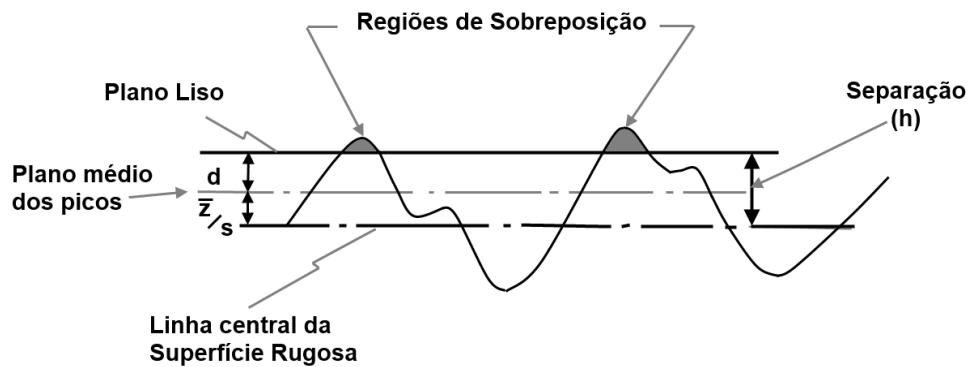


Figura 25.- Relação entre o plano médio dos picos e a superfície (McCool, 1987)

Para um dado valor de h (Figura. 24) conhecido, temos que a distancia 'd' pode ser encontrada utilizando a equação 48. O valor de h pode ser considerado igual ao parâmetro S_p obtido para cada superfície.

$$d = h - \bar{z}_s \quad (48)$$

Sendo a distancia z_s definida por BUSH (1976 apud McCool 1987) como:

$$\bar{z}_s = 4 \left(\frac{m_0}{\pi \alpha_{GW}} \right)^{1/2} \quad (49)$$

Obtendo o valor de d é possível calcular o parâmetro t , usando a Equação 50, que é o parâmetro de entrada na Tabela 2 para assim obter os valores de F_0 .

$$(50)$$

Assim, o produto dos parâmetros de GW (σ_s , R , D_{sum}) dependem somente de α e poderão ser constantes para um dado processo de acabamento.

Montanez-Calao (2011), utilizando o parâmetro alfa, α , que é uma combinação dos momentos espectrais, apresentados por McCool (1986), que são parâmetros relacionados com rugosidade, encontrou uma relação linear levemente ascendente do parâmetro de rugosidade alfa (α), com o coeficiente de atrito, μ_s , (Figura 26).

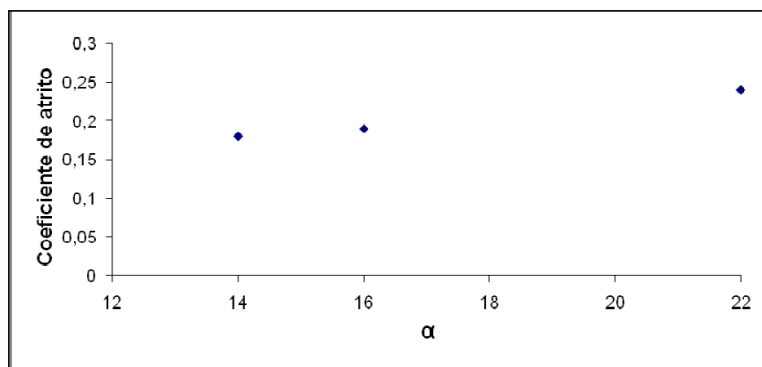


Figura 26- Variação do coeficiente de atrito com α para aço AISI H13 revenido a 540° sobre Cromo duro (Montanez-Calao, 2011).

2.4 AVALIAÇÃO TOPOGRAFICA DE SUPERFÍCIES

O constante progresso na área industrial exige métodos e processos altamente eficientes na obtenção de produtos cada vez mais precisos. O projeto de novos mecanismos exige perfeição crescente e as tolerâncias de fabricação se fazem cada dia menores, ao ponto que as formas anteriormente aceitas devido a seu método de obtenção através de determinados processos de fabricação, já não mais podem ser aplicadas sem prévia verificação de sua geometria e textura superficial.

Superfícies reais, por mais perfeitas que sejam, apresentam particularidades que são uma decorrência do método empregado em sua obtenção, por exemplo: torneamento, fresamento, retificação, brunimento, lapidação, etc. As superfícies obtidas através destes processos apresentam um conjunto de irregularidades (asperezas) com espaçamento regular ou irregular e que tendem a formar um padrão ou textura característica em sua extensão.

A rugosidade ou textura primária está formada por sulcos ou marcas deixadas pelo agente que atacou a superfície no processo de usinagem, (ferramenta, rebolo, partículas abrasivas, ação química, etc) e se encontra superposta a um perfil de ondulação provocado por deficiência dos movimentos da máquina, deformação no tratamento térmico, tensões residuais de forjamento ou fundição, etc.

Diversos parâmetros tornam-se necessários a cada dia e os equipamentos fabricados graças aos avanços da eletrônica os incorporam com resolução digital e com a possibilidade de obter facilmente uma análise gráfica.

Uma superfície apresenta erros de diferentes magnitudes e sua definição é possível através de meios ou técnicas também diferentes, por isso, para facilitar seu estudo, se dividem em dois grandes grupos, que são: erros macro-geométricos e erros micro-geométricos.

Erros Macro-geométricos chamados também erros de forma ou de textura secundária e que incluem entre eles divergências de ondulação, ovalização, multifacetamento, conicidade, cilindridade, planeza, etc. Esses tipos de erros são passíveis de medição através de instrumentação convencional, como micrometros, comparadores, projetores de perfil, etc.

Erro Micro-geométricos Conhecidos como erros de rugosidade ou de textura primária. Seu perfil é formado por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta no processo de fabricação. Sua avaliação somente é possível devido ao progresso da eletrônica que com auxílio de circuitos eletrônicos vem desenvolvendo, aparelhos cada vez mais precisos como os perfilômetros para avaliações em duas dimensões e mais recentemente os interferômetros para a execução de medições em três dimensões.

2.4.1 Definições Básicas

Tem sido mostrado que 90% de todas as falhas de componentes de engenharia na prática são iniciadas na superfície, através de mecanismos, tais como fissuras de fadiga, corrosão sob tensão, o desgaste abrasivo ou adesivo em excesso, à corrosão, à erosão, etc. No presente estudo é fundamental conhecer-se as características das superfícies em contato. Claramente então, é importante compreender as propriedades da superfície e zonas da sub-superfície de um componente. Estas propriedades podem ser agrupadas sob o termo integridade da superfície (Griffiths, 2001).

Sabe-se que é impossível produzir uma superfície perfeitamente lisa, com os processos de fabricação disponíveis, pois cada processo de fabricação deixa uma micro-escala de "impressão digital" na superfície da peça trabalhada, que é única

para o processo de fabricação. A natureza desta "impressão digital" é referida como a textura da superfície, ou a topografia da superfície do componente. Normalmente, esta textura é constituída por uma série de picos e vales que têm tamanho, forma e espaçamento característico. (Blunt, 2003)

Além de afetar a forma da textura da superfície, o método de fabricação escolhido também afeta as camadas abaixo da superfície do componente. Por exemplo, observando-se, uma superfície usinada de um metal tal como o aço, a secção transversal (Figura 27) pode-se ver que a superfície é constituída pelas seguintes camadas :

0. Camada de gases adsorvidos.
1. Uma camada de óxido, que os metais possuem, com vários nanômetros de espessura.
2. A camada topográfica, os picos e os vales que constituem a forma da superfície e resultam da remoção de material (ou adição) e são produzidos pelo processo de fabricação (passagem da ferramenta, descarga elétrica, etc.).
3. A camada deformada plasticamente produzida pela operação de usinagem.
4. A camada metalurgicamente deformada resultante principalmente do aquecimento durante a usinagem.

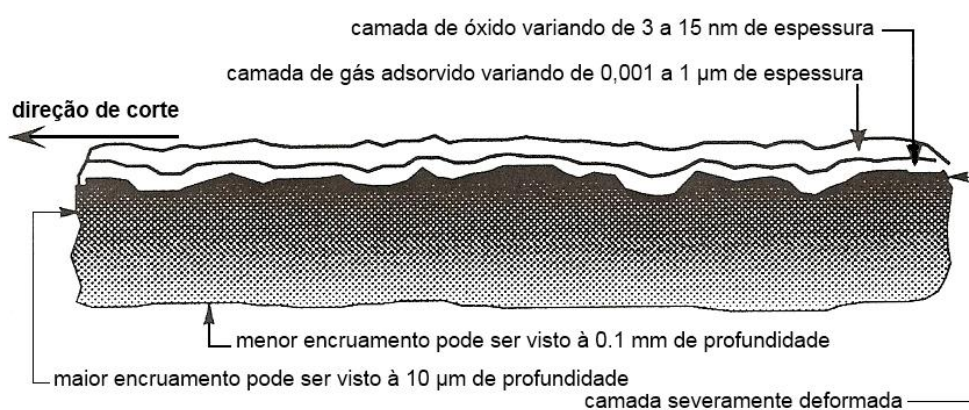


Figura 27 - Vista esquemática da superfície em corte mostrando as diversas camadas de uma superfície usinada (Ludema, 2000).

Convencionalmente a textura é composta de características definidas como ondulação, rugosidade e forma (Figura 28). Tradicionalmente, quando a textura da

superfície é medida quantitativamente é apenas a rugosidade que é analisada, a ondulação e a forma dos elementos são mecanicamente, eletricamente ou digitalmente filtrados a partir dos dados registrados.

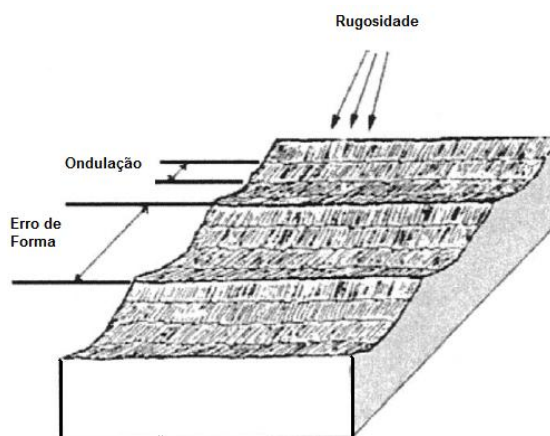


Figura 28 - Rugosidade, ondulação e forma de uma superfície de engenharia (Dagnall, 1980 *apud* Blunt, 2003).

A diferença entre as características de ondulação, rugosidade e forma da textura da superfície é baseada no comprimento de onda de pico ou a superfície do pico de espaçamento. Ondulação é geralmente atribuída a uma máquina individual, por exemplo, um rebolo desbalanceado, irregularidades no avanço da ferramenta, trepidações e vibrações gerais. Erros de forma são geralmente causados pela falta de rigidez da peça durante a usinagem permitindo que ela flexione ou dobre. Deslocamentos das partes móveis da máquina também podem causar erro de forma. Solicitações no material, aquecimento induzido da superfície, ou tensão residual superficial excessiva podem causar flexão e erro de forma. Normalmente, os erros de forma produzem uma ou duas ondulações sobre as dimensões da superfície avaliada.

Parâmetros numéricos para a textura de superfície, usados em desenhos de engenharia são os meios de comunicação entre projeto, fabricação e desempenho funcional, e os meios de comunicação entre um fornecedor e um cliente. Estes parâmetros são utilizados não só como um ponto de referência para a fabricação e a especificação de tolerância de superfície, mas também, especialmente no caso dos parâmetros 3D para prever as propriedades funcionais.

Os parâmetros numéricos iniciais definidos para textura da superfície de área foi desenvolvido no início dos anos 1990, os chamados “14 parâmetros de Birmingham”. (Stout et al, 1993).

Atualmente os parâmetros utilizados e aceitos pelas organizações de padrões europeias e internacionais e que formam uma parte fundamental da nova base de padrões de textura de superfície 3D. O novo parâmetro numérico definido para a textura de superfície 3D se destina a abordar propriedades geométricas, ou seja, de campo e aspectos característicos. O conjunto de parâmetros de campo é usado para classificar indicações de médias, desvios, extremos, informações de espaçamento e propriedades genéricas funcionais. Nota-se que nem sempre é necessário caracterizar superfícies utilizando todos os parâmetros. Técnicas estatísticas, tais como testes de significância e análise de correlação são úteis na definição de subconjuntos de parâmetros aplicáveis. (Stout et al, 1993) (Lonardo, et al, 1996) (Peters e Bryan, 2001).

Os parâmetros de campo 3D consistem no conjunto de parâmetros S e o conjunto de parâmetros V. Os parâmetros S dependem da amplitude da altura e da frequência de espaçamento, para a descrição da amplitude e da informação espacial. Os parâmetros V dão informações fundamentais da taxa de material com base em uma curva. (curva de Abbott-Firestone).

2.4.2 Conjunto de parâmetros S

O conjunto de parâmetros S contém 15 parâmetros e foi classificado em cinco tipos, amplitude, espaçamento, dimensões, híbrido, fractal e outros parâmetros, como mostrado no Quadro 1.

Neste trabalho os parâmetros de interesse são um parâmetro de amplitude, S_q , um parâmetro espacial, S_{ds} , e um parâmetro híbrido, S_{dq} , que serão definidos a seguir.

CONJUNTO DE PARÂMETROS S				
PARÂMETROS DE AMPLITUDE	PARÂMETROS ESPACIAIS	PARÂMETROS HÍBRIDOS	PARÂMETROS FRACTAIS	OUTROS PARÂMETROS
Desvio médio quadrático - S_q	Densidade de cumes - S_{ds}	Media aritmética da curvatura dos picos - S_{sc}	Dimensão fractal – S_{fd}	Direção da textura - S_{td}

Skewness - Ssk	Auto correlação do comprimento com decaimento – Sal	Média quadrática das inclinações - Sdq		Dez pontos de altura da superfície – S5z
Kurtosis - Sku	Relação de aspecto da textura - Str	Razão da área interfacial desenvolvida - Sdr		
Altura máxima de pico/vale – Sp, Sv				
Altura máxima – Sz				

Quadro 1 – Conjunto de parâmetros S (Blunt, 2003)

O parâmetro Sq é um parâmetro de dispersão, definido como à raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios do perfil em relação ao plano médio, dentro da área de amostragem.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M n_i^2} \quad (51)$$

Onde,

M é o número de pontos aplicados de perfil, e

N é o número de perfis.

$\eta(x, y)$ é o conjunto de dados de superfície áspera ou a superfície ondulada ou a textura da superfície primária, de acordo com a exigência da superfície em análise.

Em geral, $\eta(x, y)$ é obtido utilizando técnicas de filtração. Sq é um parâmetro muito geral e amplamente utilizado. Em estatística, é o desvio padrão da amostra.

Por sua vez, a densidade de cumes da superfície, Sds, é o número de cumes de uma unidade de área de amostragem Sds deve ser avaliada após a poda de, 5% do Sz (padrão). Os parâmetros Sq e Sdq são os equivalentes 3D ao parâmetros Rq e Rdq em 2D, respectivamente. O parâmetro Sds é definido pela equação:

$$Sds = \frac{N^2 d_t}{(M-1)(M-1)} \quad (52)$$

Por fim, a raiz quadrada média da inclinação da superfície topográfica avaliada, S_{dq} , é o valor da raiz quadrada da média da inclinação da superfície na área de amostragem. S_{dq} é calculado usando o polinômio de Lagrange, com sete pontos em direções ortogonais (Dong, Sullivan, and Stout, 1994).

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{(M-6)(N-6)} \sum_{j=4}^{N-3} \sum_{i=4}^{M-3} \dots} \quad (53)$$

2.4.3 Conjunto de parâmetros V

Os parâmetros V (Quadro 2) parâmetros e curvas relacionados são projetados para avaliar as características topográficas funcionais da superfície por meio da análise do volume de material e do volume de vazios. Para a obtenção destes parâmetros a superfície é dividida em três zonas, a zona da altura do pico, a zona central e as zonas de vale e, em seguida, faz-se os cálculos de volume com base nestas três zonas.

CONJUNTO DE PARÂMETROS V		
Proporção linear de área de material na curva de parâmetros	Volume de vazios	Volume de material
Família Sk	Família de Volumes	
<ul style="list-style-type: none"> • profundidade da rugosidade central - Sk • redução de pico / altura de vale – Spk/Spk • pico / material componente do vale – SMr1, Smr2 	<ul style="list-style-type: none"> • volume central de vazio - Vvc • volume de vale vazio -Vvv 	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de material – Vmp • Volume central de material - Vmc

Quadro 2 – Conjunto de parâmetros V (Blunt, 2003)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo será descrito o processo de obtenção, caracterização dos corpos de prova e a metodologia utilizada nos ensaios com o plano inclinado automatizado afim de que se possa avaliar com maior precisão os resultados e possíveis variáveis que ocasionam perturbações na determinação do coeficiente de atrito estático.

Coeficientes de atrito estático estão convenientemente tabulados e incorporados aos manuais de engenharia há pelo menos 300 anos. No entanto, estes valores tabelados representam coeficientes médios de atrito determinados ao longo de um largo espectro de condições de teste. Embora estes números forneçam uma orientação geral da sensibilidade do coeficiente de atrito para os materiais em contato, eles podem não ser representativos do coeficiente de atrito que realmente vai resultar entre os pares em contato real (Etsion, 1992).

3.1 PREPARAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVAS

A preparação dos corpos de provas quanto aos processos de usinagem foram executados no laboratório Centro de Fabricação Mecânica (CFM) do Departamento de Mecânica (DAMEC), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Os corpos de provas, (C.P.) mostrados na Figura 28, numerados de 1 a 8, (denominados grupo A), usinados em aço ABNT 1010, todos retirados de uma mesma barra laminada com diâmetro 3" foram inicialmente torneados nos diâmetros 70, 65, 60, 55, 50, 45, 40, e 35 mm sendo logo a seguir cortados no comprimento de 50mm, mais sobremetal para usinagem de acabamento, em seguida foi feito um furo anular (Figura 28b), dando ao corpo de prova a forma de um copo possibilitando a variação da massa, pela adição de chumbo granulado, mantendo a mesma área de contato nominal.

A Figura 29 e a Tabela 3 mostram a geometria e dimensões dos corpos de provas com furo anular do grupo A – Tipo copo.

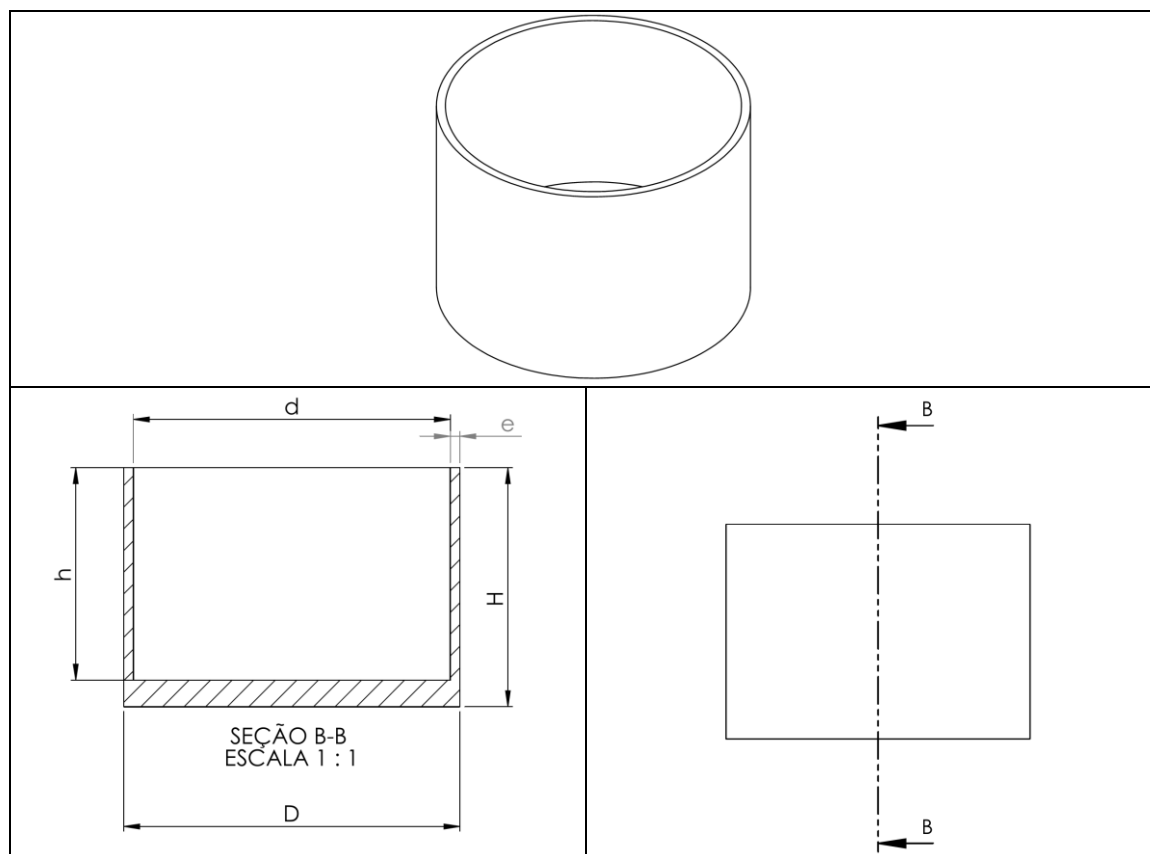


Figura 29 - Corpos de provas de aço ABNT 1010 Grupo A com furo anular

Tabela 3 – Dimensões dos corpos de provas do grupo A em mm – Tipo copo- Tolerância dimensional $\pm 0,01\text{mm}$

CP	H	h	D	d	e	Área de contato nominal (mm^2)	Massa m (kg)
1	49,40	45	70	66	2	962,11	0,106
2	49,40	45	65	61	2	1256,64	0,125
3	49,40	45	60	56	2	1590,43	0,145
4	49,40	45	55	51	2	1963,50	0,163
5	49,40	45	50	46	2	2375,83	0,195
6	49,40	45	45	41	2	2827,43	0,210
7	49,40	45	40	36	2	3318,31	0,235
8	49,40	45	35	31	2	3848,45	0,270

No acabamento, das superfícies em que foi avaliado o contato, foi utilizado o processo de retificação plana tangencial (Figura 30) e retificados ao mesmo tempo com os mesmos parâmetros de usinagem, mostrados na Tabela 4. A máquina retificadora utilizada foi uma Ferdimat modelo T-104.

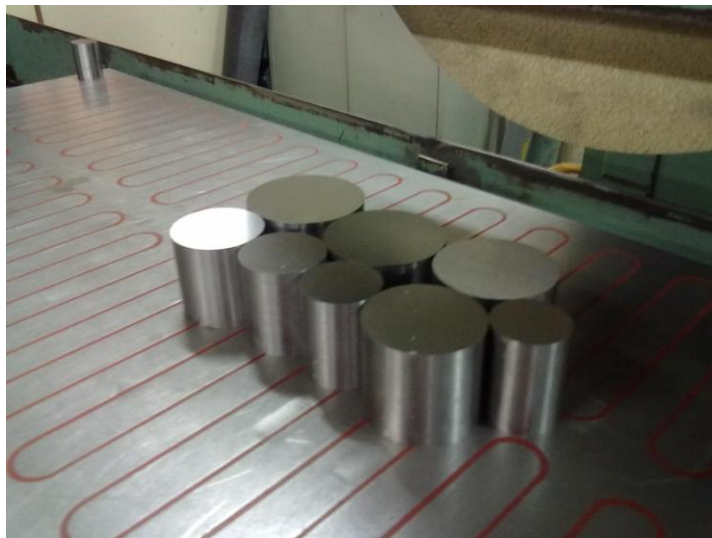


Figura 30 - Corpos de provas dispostos sobre a mesa magnética da máquina retificadora plana tangencial Ferdimat modelo T-104.

Como contra corpo, para todos os ensaios, foi utilizada uma placa plana de vidro de 120 mm x 140 mm com 10 mm de espessura, portanto o efeito magnético das peças retificadas não interferiu nos valores de atrito medidos, como demonstrado por Woo e Thomas, (1979).

Tabela 4 - Parâmetros de Usinagem utilizados na retificação dos C. P.

Vel. Longitudinal da mesa	Vel. Transversal da mesa	Vel. De corte	Penetração de trabalho	Rebolo	Refrig.
32,5 mm/s	10 mm/min	32,5 m/s	30 μ m	AA80K60V2	Emulsão 2%

Os corpos de provas (C.P.) usinados em aço ABNT 1045, (denominados grupo B), foram todos retirados de uma mesma barra laminada de diâmetro 3" e de comprimento 300 mm. Inicialmente a barra foi torneada no diâmetro 56 mm, mais sobremetal para usinagem de acabamento e retificada em uma retificadora cilíndrica garantindo o diâmetro de $56 \pm 0,01$ mm em toda a extensão da barra em seguida esta foi cortada em 9 peças (numeradas de 10 a 18) com comprimento de $20 \pm 0,001$ mm mais sobremetal para usinagem (Figura 31). No acabamento das superfícies em que foi avaliado o contato foram retificadas, ao mesmo tempo,

utilizado o processo de retificação plana tangencial com os mesmos parâmetros de usinagem (Tabela 4).

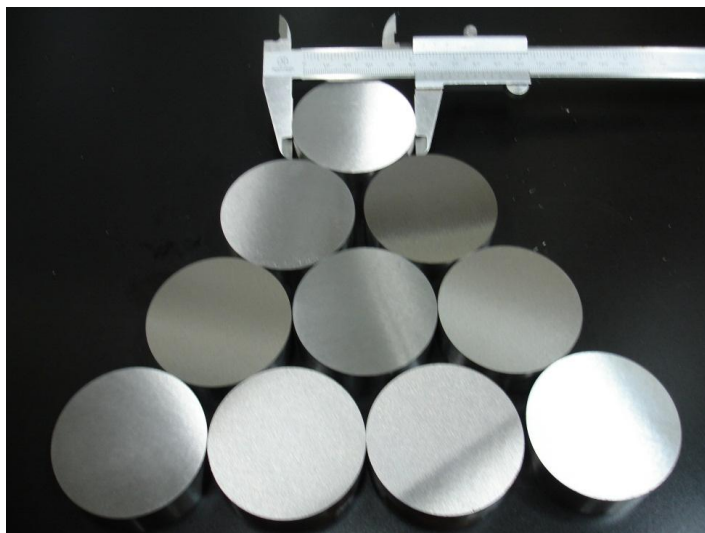


Figura 31- Corpos de provas de aço ABNT 1045 Grupo B maciço

Todos os corpos de provas (C.P.) do Grupo A foram fixados ao mesmo tempo na mesa magnética de uma retificadora plana tangencial. O mesmo procedimento e parâmetros de corte foram utilizados na retificação dos C.P. do Grupo B.

A planeza dos corpos de provas foi avaliada, após a retificação, em uma máquina de medição por coordenadas marca Zeiss, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná. No procedimento de medição foram apalpados de 100 a 200 pontos em cada corpo de prova e os valores encontrados foram de $0,019 \pm 0,001$ mm para os corpos de provas do grupo A e $0,008 \pm 0,001$ mm para os corpos de provas do grupo B a partir dos quais foi possível obter a Figura 32.

Planeza é o termo utilizado para a tolerância geométrica de forma, é definida conforme a NORMA DIN 7184, como a distancia t de dois planos paralelos, entre os quais se encontram todos os pontos da superfície tolerada.

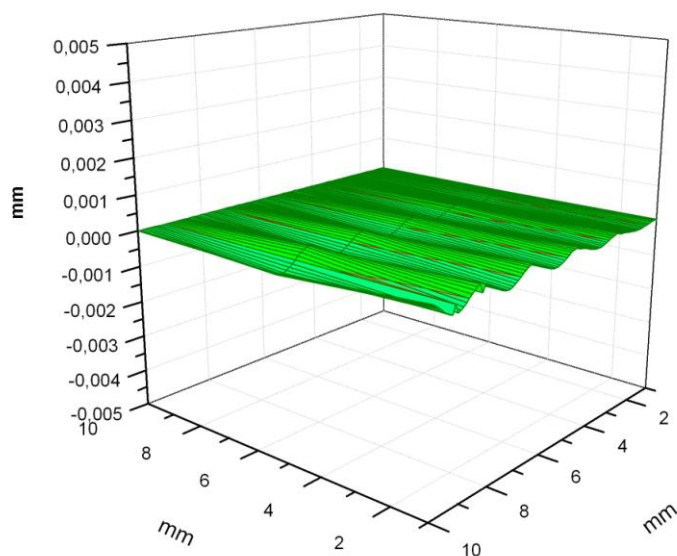


Figura 32 - Superfície gerada a partir dos pontos obtidos pela máquina de medir por coordenadas na avaliação da Planeza dos Corpos de Provas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS CORPOS DE PROVAS

A caracterização microestrutural dos corpos de provas foi realizada no Laboratório de Materiais do DAMEC na UTFPR.

Foi executado ensaio de dureza Vickers nos corpos de provas (C.P.) tipo “copo” de aço ABNT 1010 (grupo A) e nos corpos de provas cilíndricos maciços de aço ABNT 1045 (grupo B) (Tabelas 5 e 6). A Tabela 7 mostra os valores de microdureza Vickers para o contra-corpo de vidro, utilizados nos ensaios de atrito estático.

As Figura 33 e 34 mostram as regiões, dos corpos de provas Grupo A e do Grupo B, respectivamente, em que foram realizados os ensaios de dureza Vickers.

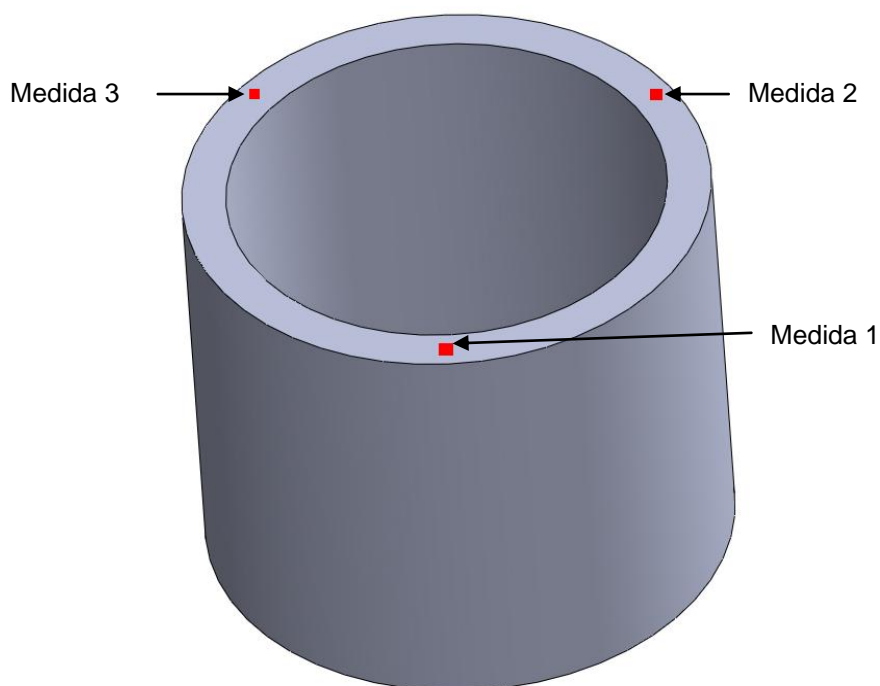


Figura 33 – Pontos das medições de Dureza Vickers nos C.P. do Grupo A

Tabela 5 - Dureza dos corpos de provas “tipo copo”(Grupo A)em aço ABNT 1010

Dureza Vickers HV 20					
C.P.	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Média Geral
2	192	189	186	189 ± 3	
4	197	199	193	196 ± 3	196 ± 6
5	194	199	193	195 ± 3	
8	203	203	206	204 ± 2	

O valor médio de dureza encontrado para o aço ABNT 1010 é condizente com a microestrutura revelada para este tipo de amostra, como será apresentado na Fig. 35.

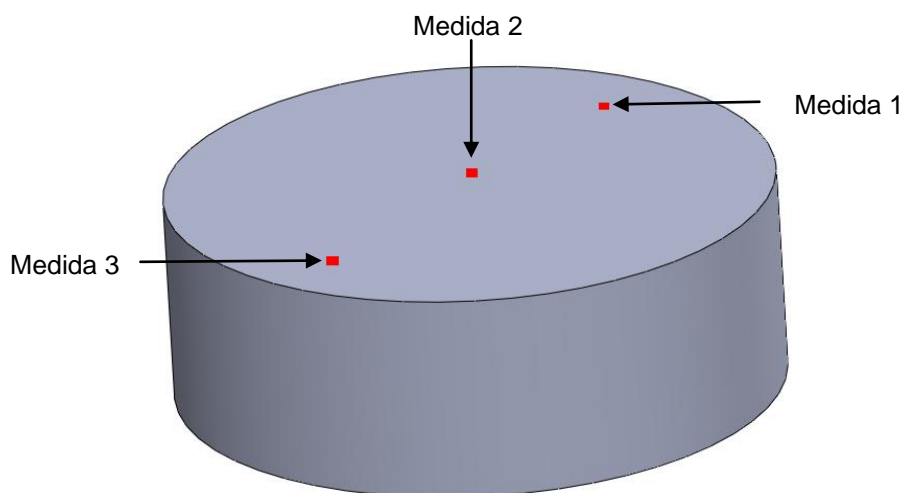


Figura 34 - Pontos das medições de Dureza Vickers nos C.P. do Grupo B

Tabela 6 - Dureza dos corpos de provas cilindros maciços (Grupo B) em aço ABNT 1045

Dureza Vickers HV 20				
C.P	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média
10	221	228	221	223 ± 4

O valor médio de dureza do aço ABNT 1045 é condizente com a microestrutura revelada para este tipo de amostra, como será apresentado na Fig. 36.

Tabela 7 - Dureza do vidro(contra corpo)

Microdureza Vickers HV 0,05				
Peça	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média
1	542	555	550	549 ± 7

Na análise metalográfica os corpos de provas foram atacados com solução de ácido nítrico a 2% em álcool etílico (nital) as Figuras 35 e 36 mostram as observações realizadas em microscópio com aumento de 100 x para o aço ABNT 1010 e ABNT 1045 respectivamente. As microestruturas observadas são típicas

para os dois materiais. As observações realizadas nessa análise foram em pontos semelhantes aos pontos de ensaios de dureza mostrados nas Figuras 33 e 34.



Figura 35 - Micrografia do aço ABNT 1010.

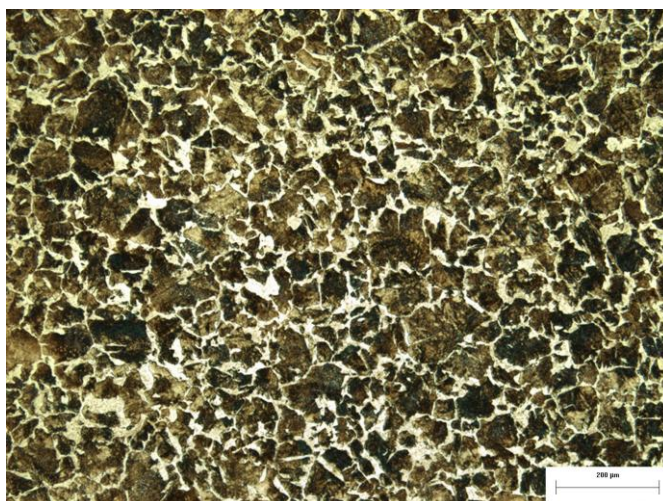


Figura 36- Micrografia do aço ABNT 1045.

3.3 ROTINA DE CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA

Neste trabalho é proposta uma abordagem através do qual os parâmetros de rugosidade 3D S_q , S_{ds} e S_{dq} , disponível como saída em equipamentos de medição de rugosidade, podem ser usados para determinar a entrada para o modelo de micro contato GW (Greenwood-Williamson), e são utilizados para estimar o parâmetro de banda α , da superfície. O processo é aplicável a superfícies isotrópicas ou a

superfícies anisotrópicas transformadas para forma equivalente isotrópico (Mc Cool,1987).

Através dos parâmetros de saída, oferecidos pelo interferômetro de luz branca, Sq, Sdq e Sds o parâmetro alfa é calculado pelo seguinte equacionamento, como:

$$\alpha = \frac{M_0 \cdot M_4}{M_2^2} \quad (54)$$

$$E, \quad M_0 = S q^2 \quad (55)$$

$$M_2 = S d q^2 \quad (56)$$

$$M_4 = \frac{S d s S}{s} \quad (57)$$

Portanto:

$$\alpha = \frac{S q^2}{s} \quad (58)$$

O raio médio é dado por:

$$\text{raio médio} \quad (59)$$

Na resolução das equações foi utilizada uma planilha feita no *software* Excel (Apêndice B)

Para validar o procedimento para obtenção do parâmetro alfa (α), aplicou-se o equacionamento utilizado com os respectivos parâmetros (Sq, Sdq, Sds) para um aço SAE 52100. Para isto foi usado a borda lateral de uma pista externa de um rolamento radial de uma fileira de esferas 6204 marca FAG (Figura 37). Pois o valor de alfa para este tipo de material (Pintaude *et al.*, 2013) e acabamento superficial é conhecido (em torno de 13), (Zavarise, *et al.*, 2007).

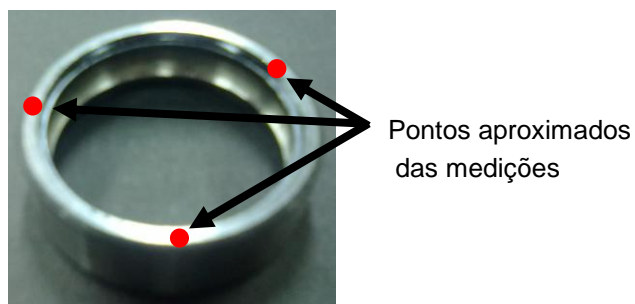


Figura 37 – Pista externa do Rolamento FAG 6204.

3.4 DISPOSITIVO PLANO INCLINADO UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS

Para a determinação do coeficiente de atrito estático se fez uso de um tribômetro, o qual utiliza o método do plano inclinado que é um dispositivo em que se consegue com facilidade um paralelismo entre os corpos a serem ensaiados. Esse dispositivo foi desenvolvido no Laboratório de Superfícies e Contatos (LASC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). A Figura 38 apresenta um desenho do equipamento de ensaio. O tribômetro possui uma superfície plana retangular, a qual é articulada em uma de suas extremidades. Inicialmente, tal superfície se encontra a zero grau com o plano horizontal, podendo ser inclinada por meio do acionamento de um motor de passo acoplado a um sistema de transmissão por correias sincronizadoras (Passos e Silva, 2012).

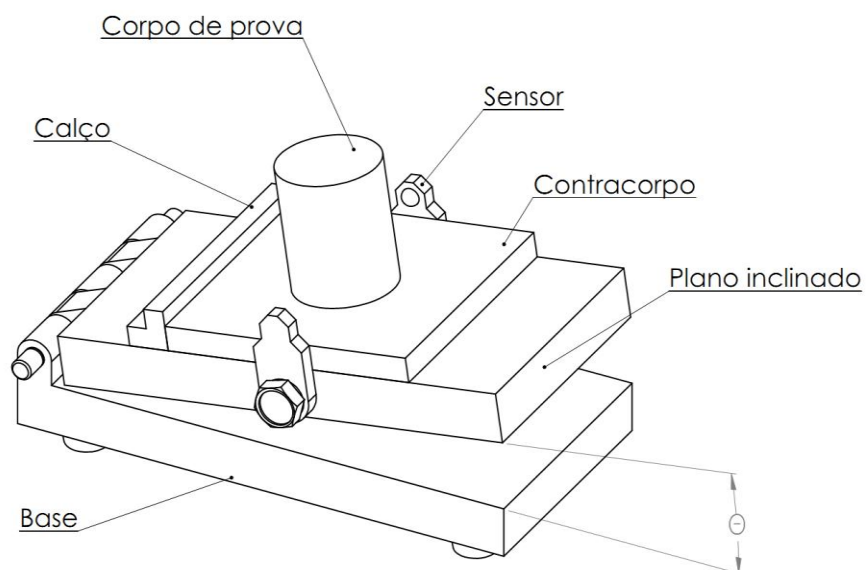


Figura 38 - Tribômetro - método do plano inclinado.

O princípio de funcionamento consiste em aumentar de forma lenta e controlada o ângulo de inclinação (θ) do plano até que o corpo, que está em repouso, inicie um movimento relativo em relação ao contra-corpo. Tanto o sistema de elevação quanto a detecção do movimento são controlados por um *software* desenvolvido em linguagem *LabView®*. A Figura 39 mostra a tela para interface com o usuário.

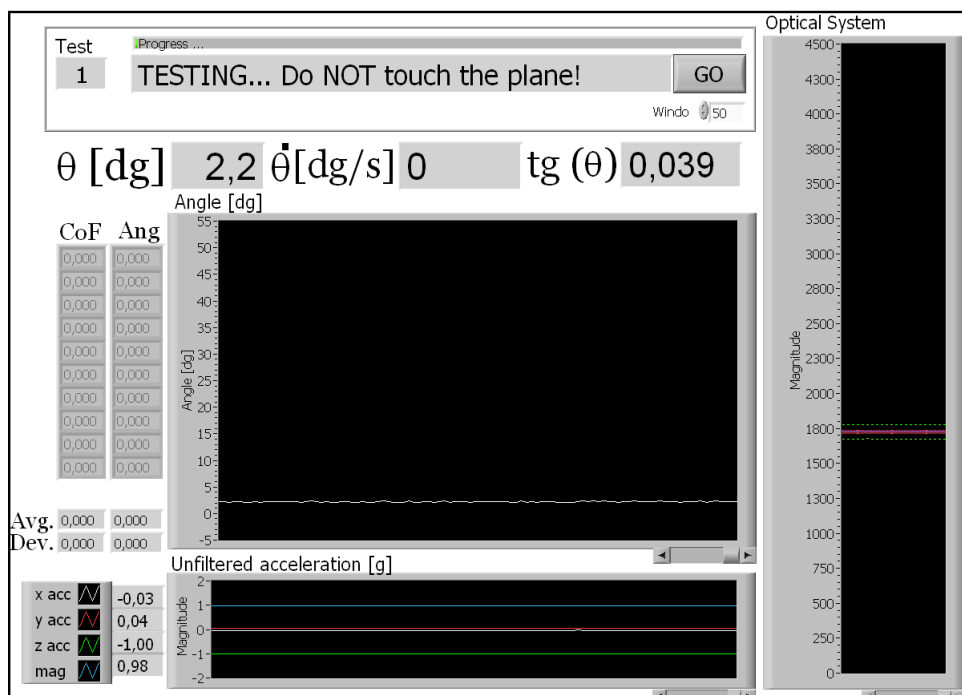


Figura 39 – Tela do *LabView* para interface com o usuário.

O corpo de prova (corpo) juntamente com o contra-corpo são posicionados, um sobre o outro, em cima da superfície retangular plana. No momento em que ocorre o movimento relativo, o sistema detecta tal movimento e interrompe a elevação, e o ângulo de inclinação é então medido. Neste momento, o valor da tangente do ângulo representa o coeficiente de atrito estático entre o par tribológico corpo e contra-corpo conforme mostra a Eq. 60.

$$\mu = \frac{F_a}{N} = \frac{P \operatorname{sen} \theta}{P \operatorname{cos} \theta} = \tan \theta \quad (60)$$

Onde: F_a = força de atrito tangencial ao plano de deslizamento, [N]

N = força normal ao plano de deslizamento, [N]

P = Força peso do corpo, [N]

θ = ângulo de inclinação, [°]

O sistema de detecção do movimento da amostra consiste de um laser monocromático de 5W da cor vermelha equipado de sistema óptico já acoplado ao canhão gera um feixe em formato de linha com ângulo de abertura de

aproximadamente 60°. Uma lente convergente de distância focal 50 mm é montada de modo a deixar os feixes paralelos. Na outra extremidade do plano de ensaio, é montada uma segunda lente convergente idêntica a primeira e em seu foco é montado um sensor que detecta a intensidade luminosa incidente.

A Figura 40 mostra o sistema montado no plano de ensaios e um corpo de prova colocado de modo a interromper parcialmente o feixe apenas para ilustração.

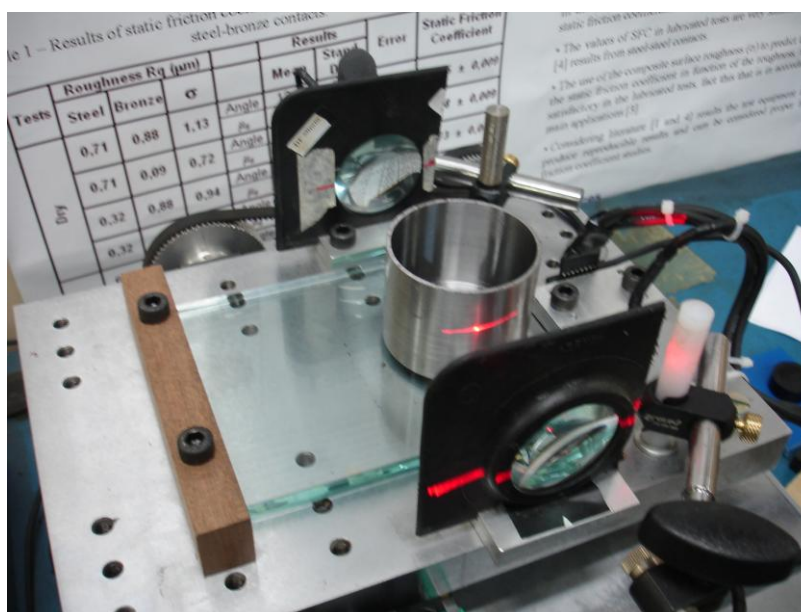


Figura 40 - Sistema montado no plano de ensaios e um corpo de prova colocado de modo a interromper parcialmente o feixe de luz.

Para a medição da inclinação, utilizou-se um sensor acelerômetro, que mede a aceleração atuante nos três eixos XYZ. O motor que aciona o plano inclinado, possibilita a inversão do sentido de rotação (baixa e levanta o plano). O equipamento foi calibrado no laboratório de metrologia e qualidade da UTFPR-CT. Vale ressaltar que um erro residual médio de 0,06° é extremamente baixo, especialmente quando aplicada a função tangente (cálculo do coeficiente de atrito relativo ao ângulo crítico). O valor do erro médio do coeficiente de atrito, calculado por $\text{errcoef} = \text{tg}(x) - \text{tg}(x + \text{errang})$, é de 0,0014, sendo seu valor máximo 0,0022 para 45° e mínimo de 0,0011 para ângulos próximos de 0° (Passos e Silva, 2012).

3.5 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram realizados em ambiente com a temperatura e umidade relativa do ar monitorados. Os C.P. e contra corpo foram limpos em cuba para limpeza por ultra-som, com álcool isopropílico por um tempo de 7 ± 2 minutos. Imediatamente após a limpeza foram executados os ensaios no plano inclinado automatizado. Cada corpo de prova foi ensaiado cinco e oito vezes consecutivamente. Os ensaios foram executados á seco (ao ar). A taxa de inclinação do plano inclinado foi de $0,33^\circ/s$. No posicionamento do C.P. tomou-se o cuidado de colocá-lo na posição em que o feixe de *laser* apresentasse a melhor resolução na detecção do movimento (Fig.41).

Nos ensaios dos C.P. do Grupo A foi colocado dentro do corpo de prova chumbo granulado para obter-se a mesma carga.

Embora os corpos de provas tivessem cantos vivos estavam isentos de rebarbas. A Figura 41 uma mostra a foto do corpo de prova tirada com a Lupa Olympus SZX10 modelo DP25-4 com aumento de 6,6 vezes.

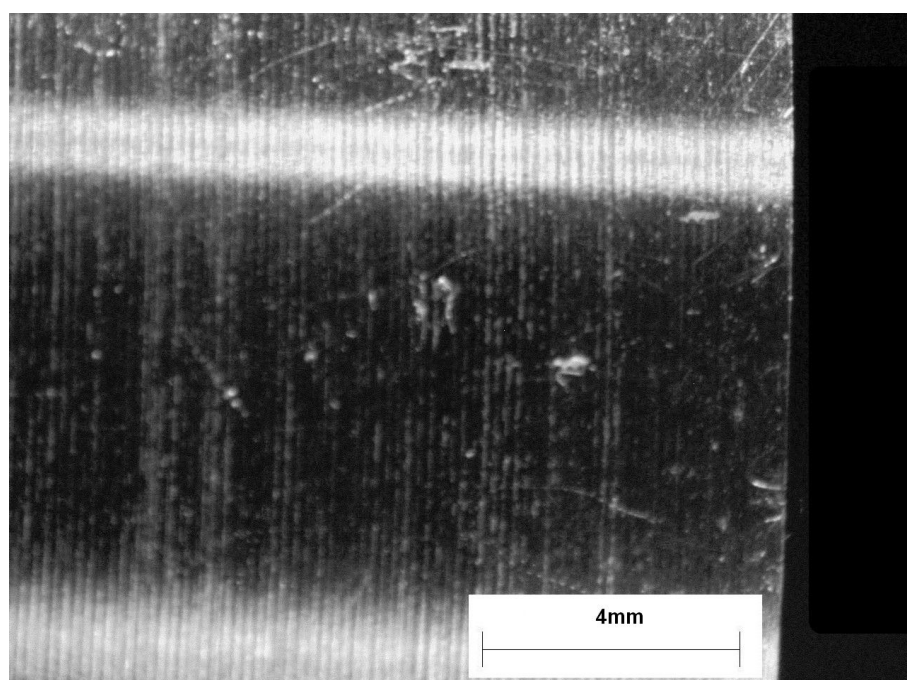


Figura 41 - Foto ampliada 6,6x do canto vivo do Corpo de Prova.

Os parâmetros que foram usados nos ensaios de atrito estático são mostrados nas tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 - Área nominal variável e carga variável para os corpos de provas do grupo A – Ensaio 1

C.P.	ÁREA CONTATO NOMINAL (cm²)	MASSA m (kg)
1	9,62	0,106
2	12,57	0,125
3	15,90	0,145
4	19,64	0,163
5	23,76	0,195
6	28,27	0,210
7	33,18	0,235
8	38,48	0,270

Tabela 9 - Área nominal variável e carga constante para os corpos de provas do grupo A – Ensaio 2

C.P.	ÁREA CONTATO NOMINAL (cm²)	MASSA m (kg)
1	9,62	
2	12,57	
3	15,90	
4	19,64	
5	23,76	0,270
6	28,27	
7	33,18	
8	38,48	

Tabela 10 - Área nominal constante e carga constante para os corpos de provas do grupo B – Ensaio 3

C.P.	ÁREA CONTATO NOMINAL (cm²)	MASSA m (kg)
10 á 18	19,64	0,370

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados estão organizados e mostrados na seguinte ordem: Inicialmente estão listados em tabelas os valores dos parâmetros de rugosidade (Item 4.1) para os corpos de prova do Grupo A e do Grupo B. A seguir são apresentados os parâmetros de rugosidade para os novos grupos formados com base na análise de variância. No Item 4.2 são apresentados os valores do coeficiente de atrito estático para os mesmos grupos do item 4.1.

4.1 RUGOSIDADE

Considerando-se os corpos de prova separados nos dois grupos, A e B, (Item 3.2), tendo como critério apenas o tipo de material da amostra. Foram realizadas medições de rugosidade das superfícies retificadas com um perfilômetro 3-D óptico sem contato, fabricado pela Taylor-Hobson, utilizando ampliação de 20x, onde se coletou dados de três áreas de aproximadamente 3,25 x 3,25mm de cada amostra, em locais aleatórios da superfície, (Figura 42).

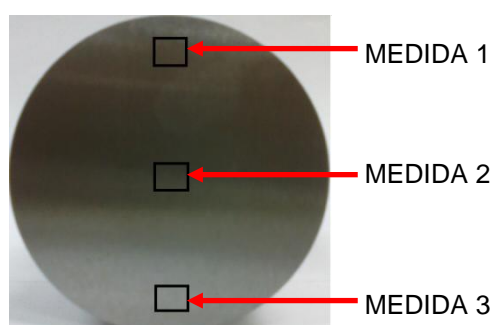


Figura 42 - Áreas aproximadas onde foram realizadas as medições de rugosidade

No Apêndice A as Tabelas 21 e 22 mostram os resultados, de três medições, obtidos para os parâmetros de rugosidade, S_a (desvio médio aritmético), S_q (desvio médio quadrático), S_{dq} (raiz quadrada da inclinação) e S_{ds} (densidade de cumes), para o Grupo A e para o Grupo B respectivamente. Na Tabela 11 são

apresentados os resultados dos parâmetros de rugosidade médios e desvios padrões dos corpos de prova do Grupo A, e os valores calculados para o Parâmetro Alfa (α), (Apêndice B). Esses valores mostram-se compatíveis com os parâmetros de retificação utilizados, especialmente em função da granulometria do rebolo usado (80 *mesh*) e considerando-se que devido à ductilidade do material dos C.P. é de se esperar uma rugosidade maior do que preconiza a literatura. A variação observada nos valores dos parâmetros Sa e Sq é provavelmente devido à diferença de diâmetros dos C.P. que fazem com que solicitações de corte nas entradas e saídas do rebolo sejam diferenciadas. O parâmetro Ra (média de seis medições com *cut-off* de 0,25mm) apresenta-se com uma pequena dispersão quando comparado com os parâmetros Sa e Sq.

O Parâmetro Alfa foi calculado seguindo a rotina apresentada no item 3.4 através da Equações 55, 56, 57 e 58.

Tabela 11 - Resultados médios das medições dos parâmetros de rugosidade dos corpos de provas tipo copo e o Parâmetro Alfa calculado para os C. P. do Grupo A

C.P.	Ra(μm)	Sa (μm)	Sq (μm)	Sdq	Sds (μm^2)	Alfa
1	0,71 \pm 0,06	3 \pm 1	4 \pm 1	0,27 \pm 0,005	13920 \pm 70	93
2	0,67 \pm 0,07	2,2 \pm 0,3	2,7 \pm 0,4	0,27 \pm 0,003	15200 \pm 200	50
3	0,66 \pm 0,13	2 \pm 0,3	2,4 \pm 0,3	0,22 \pm 0,05	13000 \pm 4000	49
4	0,7 \pm 0,04	4 \pm 2	5 \pm 3	0,25 \pm 0,004	12200 \pm 200	164
5	0,89 \pm 0,13	2,5 \pm 0,1	3,1 \pm 0,1	0,31 \pm 0,03	15000 \pm 400	49
6	0,9 \pm 0,14	2,7 \pm 0,5	3,3 \pm 0,6	0,31 \pm 0,04	13800 \pm 600	51
7	0,84 \pm 0,07	5 \pm 2	6 \pm 3	0,28 \pm 0,002	12800 \pm 200	190
8	0,79 \pm 0,18	3,2 \pm 0,4	4 \pm 0,5	0,29 \pm 0,04	12700 \pm 300	80

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos para os parâmetros de rugosidade, Sa (desvio médio aritmético), Sq (rugosidade média quadrática), Sdq (raiz quadrada da inclinação) e Sds (densidade de cumes), 3D com o Interferômetro para os corpos de prova (maciços) do Grupo B e os valores calculados para o Parâmetro Alfa (α), (Apêndice B). Esses valores mostram-se compatíveis com os parâmetros de retificação utilizados. A dispersão observada nos valores dos parâmetros Sa e Sq é menor do que os valores encontrados nos C.P. do grupo A.

Tabela 12 - Médias das medições dos parâmetros de rugosidade dos corpos de provas maciços e o Parâmetro Alfa calculado para os C. P. do Grupo B

C.P.	Ra(μm)	Sa (μm)	Sq (μm)	Sdq	Sds (μm^2)	Alfa
10	0,47 \pm 0,04	1,2 \pm 0,1	1,5 \pm 0,1	0,23 \pm 0,004	14000 \pm 200	19
11	0,51 \pm 0,02	1,8 \pm 0,4	2,2 \pm 0,4	0,25 \pm 0,005	14000 \pm 400	34
12	0,51 \pm 0,04	1,7 \pm 0,2	2,1 \pm 0,3	0,24 \pm 0,001	13400 \pm 500	34
13	0,62 \pm 0,19	1,3 \pm 0,5	1,7 \pm 0,6	0,27 \pm 0,05	14700 \pm 600	20
14	0,46 \pm 0,06	1,2 \pm 0,2	1,5 \pm 0,3	0,24 \pm 0,009	15790 \pm 60	21
15	0,54 \pm 0,08	1,2 \pm 0,1	1,3 \pm 0,1	0,24 \pm 0,003	16020 \pm 70	16
16	0,54 \pm 0,04	2 \pm 0,9	2 \pm 1	0,25 \pm 0,003	13900 \pm 300	45
17	0,53 \pm 0,05	1,2 \pm 0,1	1,5 \pm 0,1	0,24 \pm 0,001	14700 \pm 400	19
18	0,54 \pm 0,02	1,9 \pm 0,4	2,4 \pm 0,1	0,26 \pm 0,001	14800 \pm 100	43

Comparando-se os resultados das medições de rugosidade para os grupos A e B verifica-se que embora tenham sido retificados com os mesmos parâmetros de usinagem ocorrem maiores valores e maior dispersão dos parâmetros de rugosidade para os C.P. do grupo A. Isto é devido a diferença dos materiais dos C.P. e da diferença de diâmetro dos C.P. do grupo A que ocasionam uma variação nas condições de entrada e saída do rebolo de retificação na superfície dos C.P.

A Figura 43 mostra a imagem de rugosidade da superfície retificada dos corpos de provas: a) Corpo de Prova 1, primeira medição; e b) Corpo de Prova 11, segunda medição. Observa-se que o parâmetro Sq é praticamente o mesmo entretanto o parâmetro Ra apresenta uma diferença maior que 25%.

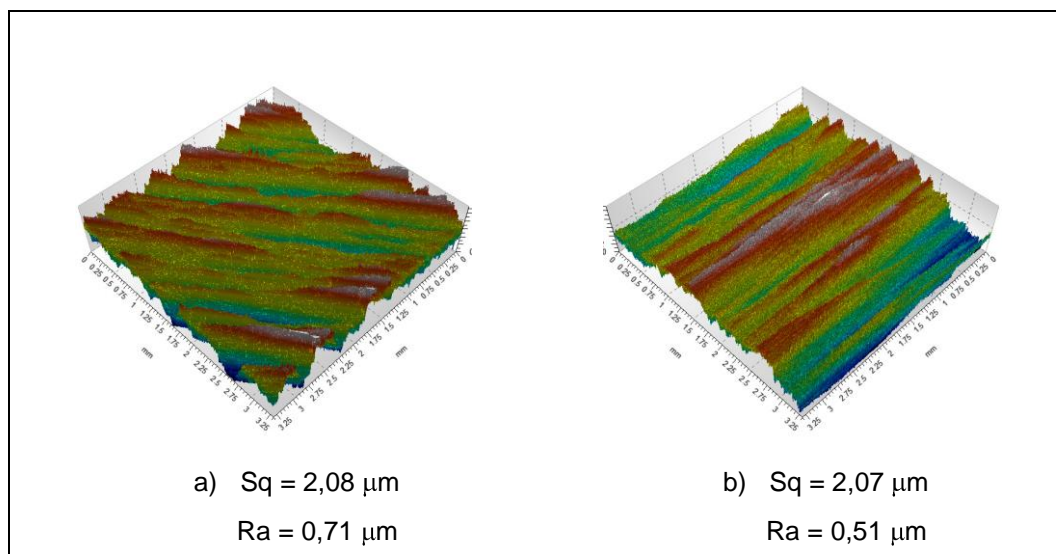


Figura 43 – Imagem da superfície de rugosidade: (a) Corpo de Prova 1, (b) Corpo de Prova 11

A Figura 44 mostra a imagem de rugosidade da superfície retificada dos corpos de prova: a) Corpo de Prova 14, terceira medição; b) Corpo de Prova 6, primeira medição; e c) Corpo de Prova 7, primeira medição. Observa-se que o C.P. 7 que apresenta o valor do parâmetro Sq mais elevado tem um valor de Ra dentro do esperado para os parâmetros de usinagem utilizados no processo de retificação (Stout e Davis, 1986; Klocke e König, 2005; Whitenton, 2006). Este resultado implica que a relação de parâmetros bidimensionais e tridimensionais de rugosidade não é imediata e a análise dos mesmos deve ser de forma cautelosa quando se referencia valores típicos de processos de fabricação.

Em ambas as figuras fica evidente o caráter anisotrópico (Singh *et al.*, 2005) das superfícies obtidas por retificação.

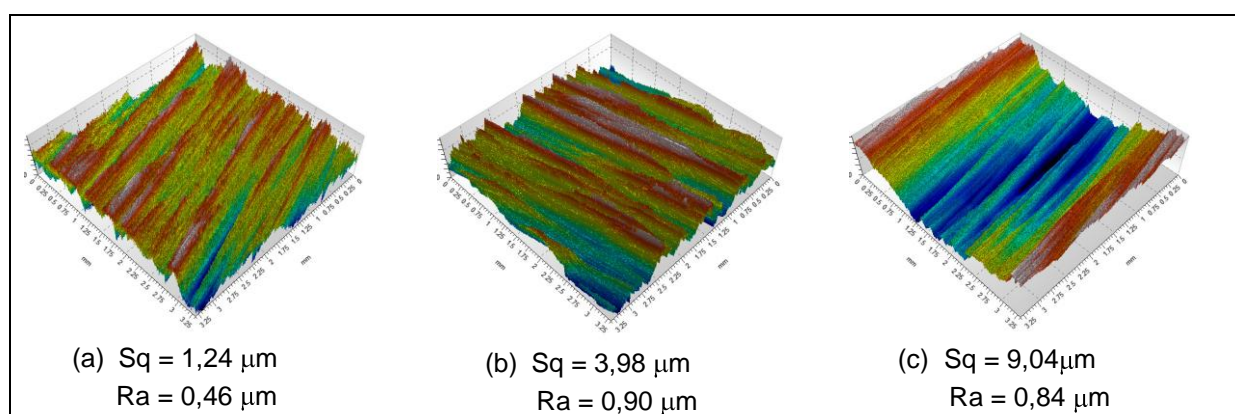


Figura 44 - Imagem da superfície de rugosidade: (a) Corpo de Prova 14, (b) Corpo de Prova 6, (c) Corpo de Prova 7

Uma maneira de verificar se as superfícies têm uma distribuição normal (gaussiana) de alturas é comparando os valores S_a e S_q . Confrontando 17 valores médios de S_a e S_q , encontrou-se uma relação linear (Figura 45), com um coeficiente de determinação igual a 1,2356 o qual é similar ao encontrado por Krundak *et al.*(2008), o que permite concluir que a distribuição das asperezas são gaussianos.

A maioria dos modelos de contato microscópico partem da premissa que a distribuição das alturas das asperezas é guassiana (Zavarise *et al.* 2004). Portanto esta caracterização é importante para verificar a viabilidade de aplicação destes modelos

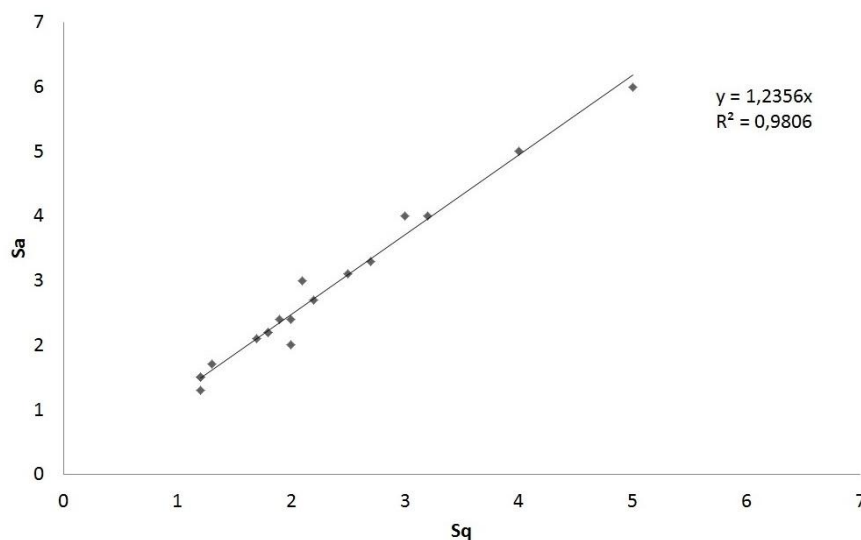


Figura 45 – Relação do Parâmetro S_a com o Parâmetro S_q .

Dentro dos parâmetros analisados: S_q , S_{dq} e S_{ds} , o parâmetro S_q foi o que apresentou a maior discrepância entre os dados coletados. Com base na análise estatística de variância com nível de confiança de 5%,(Apêndice C) do parâmetro S_q , as amostras foram realocadas em 4 grupos denominados Grupo 1 (G1), Grupo 2 (G2), Grupo 3 (G3) e Grupo 4 (G4), (Tabela 13). Estes grupos ficaram compostos de corpos de prova do Grupo A (tipo copo - ABNT1010) e do Grupo B (tipo maciço - ABNT1045). As composições dos novos grupos com os valores, dos parâmetros de rugosidade, média e desvio padrão são mostrados nas Tabelas 23 a 34 do Apêndice A.

Tabela 13 – Corpos de prova que compõem os grupos obtidos em função da variação do Parâmetro Sq

CORPOS DE PROVA				
GRUPO 1	11	12	16	18
GRUPO 2	2	3	5	6
GRUPO 3	1	4	7	8
GRUPO 4	10	13	14	15 17

Na Tabela 14 estão os valores médios e desvio padrão, de três medições para cada corpo de prova dentro dos grupos 1, 2, 3 e 4, dos Parâmetros Sq, Sdq e Sds e o resultado do cálculo do Parâmetro Alfa(α), (Apêndice B).

Tabela 14 - Valores médios e desvio padrão, dos grupos 1, 2, 3 e 4, dos Parâmetros Sq, Sdq, Sds e Alfa

Grupo	Sq(μm)	Sdq	Sds(μm^2)	Alfa
G1	2,3 \pm 0,6	0,25 \pm 0,01	14022 \pm 602	39 \pm 6
G2	2,9 \pm 0,5	0,28 \pm 0,05	14782 \pm 676	52 \pm 4
G3	4,8 \pm 1,9	0,27 \pm 0,02	12933 \pm 662	132 \pm 53
G4	1,5 \pm 0,3	0,24 \pm 0,02	15022 \pm 843	19 \pm 2

Na Tabela 15 são mostrados os valores dos parâmetros de rugosidade Sq, Sdq e Sds para o Contra-Corpo de Vidro.

Tabela 15 — Médias dos parâmetros de rugosidade de 9 medições para o contra-corpo de vidro.

Sq(ηm)	Sdq	Sds (μm^2)
16,6 \pm 5	0,006 \pm 0,002	27067 \pm 2038

A Figura 46 mostra a imagem da superfície de rugosidade do Contra-Corpo de Vidro. Através dessa Figura pode-se observar o caráter isotrópico ((Singh *et al.*, 2005) da superfície do contra-corpo de vidro.

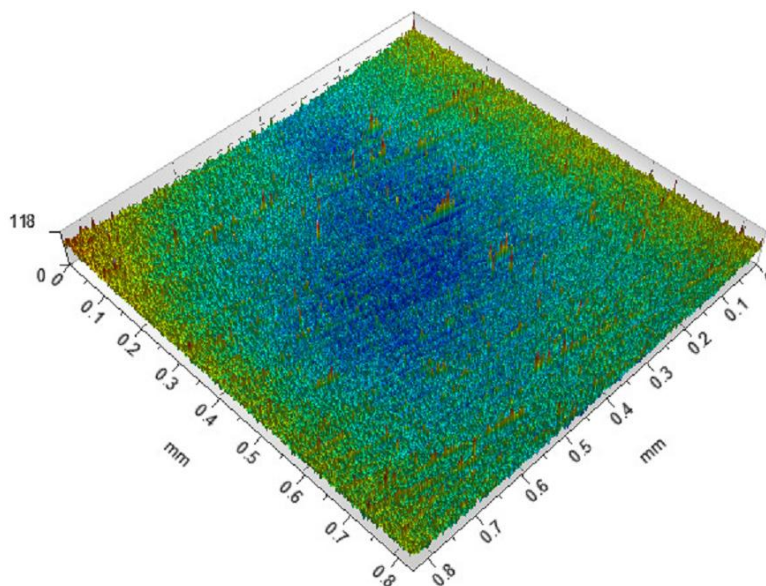


Figura 46 - Imagem da superfície de rugosidade do contra-corpo de vidro.

A Tabela 16 mostra o resultado do cálculo da relação do número de contatos plásticos com o número total de contatos (n_p/n), para os pares tribológicos corpos de prova do grupo A/vidro. Para tanto utilizou-se as equações, 30, 39, 40, 48, 49, 50, 59. O detalhamento dos cálculos encontram-se no Apêndice D.

Tabela 16 – Relação do número de contatos plásticos com o número total de contatos- n_p/n para os C.P. do grupo A/vidro.

C.P.	n_p/n
1	17,9%
2	9,8%
3	3,5%
4	29,1%
5	16,3%
6	18,5%
7	38,2%
8	19,6%

Na Tabela 16 observa-se que a porcentagem de contatos plásticos, considerando-se a média de todos os C.P. do grupo A é menor do que 20%. Portanto pode-se considerar que se tem uma relação de contato predominantemente elástico o que permite associar os ensaios realizados com o parâmetro Alfa que é definido para este tipo de contato.

4.2 ATRITO

As medições do atrito estático, no plano inclinado, dos corpos de prova tipo copo (grupo A) com massa e área nominal variável, a uma temperatura de $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $52\% \pm 1\%$ são mostradas na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores do Ensaio 1 de atrito estático com carga e área nominal variável - GRUPO A

C.P.	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MEDIDA 4	MEDIDA 5	MÉDIA
1	0,19	0,18	0,15	0,19	0,17	$0,17 \pm 0,013$
2	0,15	0,13	0,14	0,14	0,14	$0,14 \pm 0,006$
3	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	$0,16 \pm 0,005$
4	0,18	0,16	0,16	0,17	0,17	$0,17 \pm 0,009$
5	0,18	0,18	0,17	0,15	0,16	$0,17 \pm 0,013$
6	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	$0,16 \pm 0,003$
7	0,20	0,17	0,18	0,16	0,18	$0,18 \pm 0,016$
8	0,19	0,17	0,17	0,17	0,16	$0,17 \pm 0,010$

A Tabela 18 apresenta os valores das áreas e cargas para os C.P. do Grupo A.

Tabela 18 – Valores da Carga Normal e Área Nominal para os C.P. do Grupo A

C.P.	CARGA NORMAL CORRIGIDA (N)	ÁREA NOMINAL (mm^2)
1	1,02	962
2	1,21	1257
3	1,40	1590
4	1,58	1963
5	1,89	2376
6	2,03	2827
7	2,27	3318
8	2,61	3848

A Figura 47 mostra os valores do coeficiente de atrito estático em relação á carga normal corrigida dos C. P. tipo copo (Ensaio 1, Grupo A).

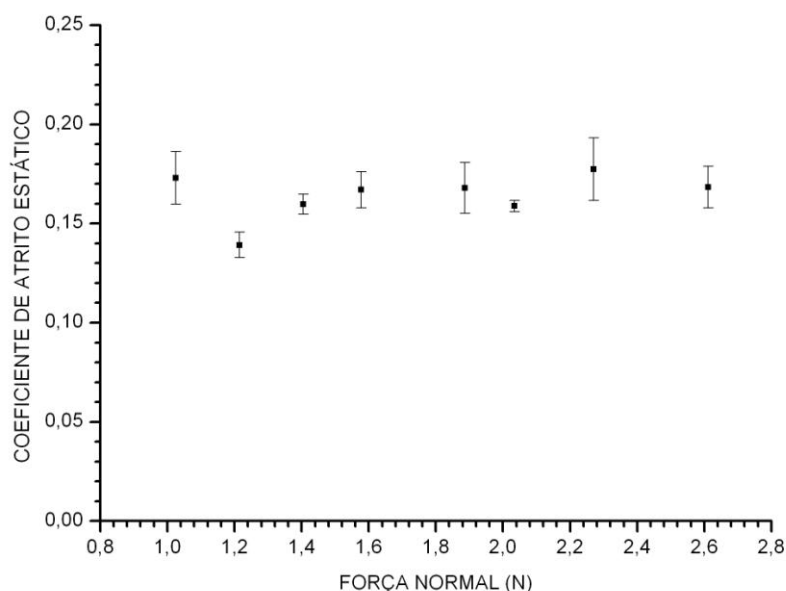


Figura 47 - Relação do coeficiente de atrito estático com a carga normal corrigida para os C.P. do Grupo A

Observa-se (Fig. 47), que ocorre uma variação aleatória nos valores do atrito estático, entretanto não se verifica nenhuma tendência com o aumento ou diminuição da massa dos C.P. estes resultados corroboram os ensaios realizados por outros pesquisadores, como por exemplo, os resultados de ensaios realizados por Rabinowicz (1965) mostrados na Figura 5, Bowden e Tabor (1950 *apud* Hutchings, 2001). mostrados na Figura 4 e especialmente os resultados de Dunkin e Kim, (1995) mostrados na Figura 1 que mostram-se com uma dispersão maior em seus resultados quando comparados com os resultados obtidos nesse trabalho isso devido provavelmente a menores cargas utilizadas por Dunkin e Kim (1995).

As medições do atrito estático, no plano inclinado, dos corpos de prova tipo copo (Ensaio 2, Grupo A) com massa constante de 0,270 kg e área nominal variável, a uma temperatura de $24 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $57 \pm 1\%$ são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores do Ensaio 2 de atrito estático para carga normal constante e área nominal variável – Grupo A

C.P.	MED. 1	MED. 2	MED. 3	MED. 4	MED. 5	MED. 6	MED. 7	MED. 8	MÉDIA
1	0,13	0,15	0,15	0,14	0,13	0,13	0,15	0,15	0,14 ± 0,009
2	0,14	0,16	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16 ± 0,08
3	0,13	0,13	0,13	0,14	0,15	0,14	0,15	0,14	0,14 ± 0,007
4	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14 ± 0,004
5	0,14	0,14	0,15	0,13	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14 ± 0,006
6	0,14	0,14	0,17	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14 ± 0,009
7	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,15 ± 0,011
8	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16	0,16 ± 0,007

A Figura 48 mostra os valores do coeficiente de atrito estático em relação à variação da área nominal dos C. P. tipo copo (Ensaio 2, - Grupo A)

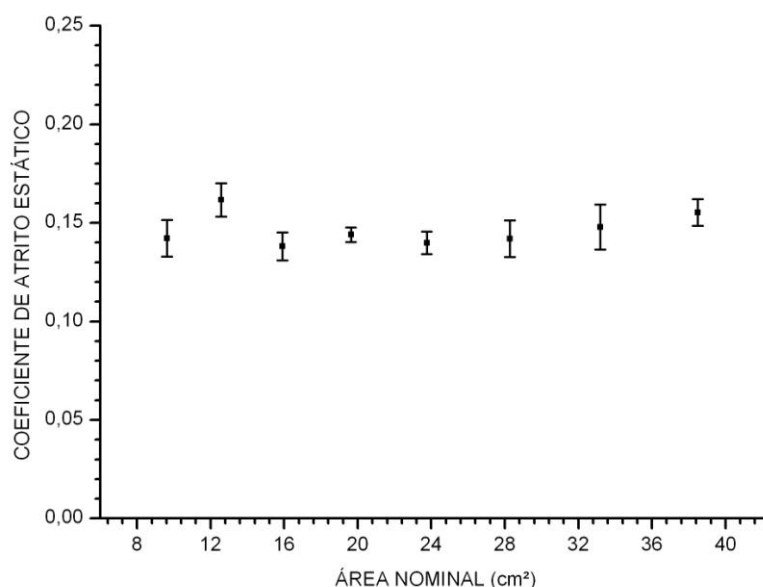


Figura 48 - Relação do atrito estático com a variação da área nominal – Grupo A-

No ensaio 2 executado com massa constante e área nominal variável nota-se uma variação aleatória nos valores do atrito estático, (Fig. 48), entretanto não se verifica nenhuma tendência com o aumento ou diminuição da área nominal dos C.P. Esses resultados estão de acordo com os resultados dos ensaios realizados por Rabinowicz, (1965) mostrados na Figura 5 e nos resultados obtidos por Dunkin e

Kim, (1995) mostrados na Figura 12 sendo que estes apresentam maior dispersão em relação aos obtidos no presente trabalho.

Utilizando-se os resultados das medições do atrito estático obtidos nos ensaios, 1 massa e área nominal variável e 2 massa constante e área nominal variável traçou-se a curva Coeficiente de atrito estático em relação à pressão nominal, (Figura 49).

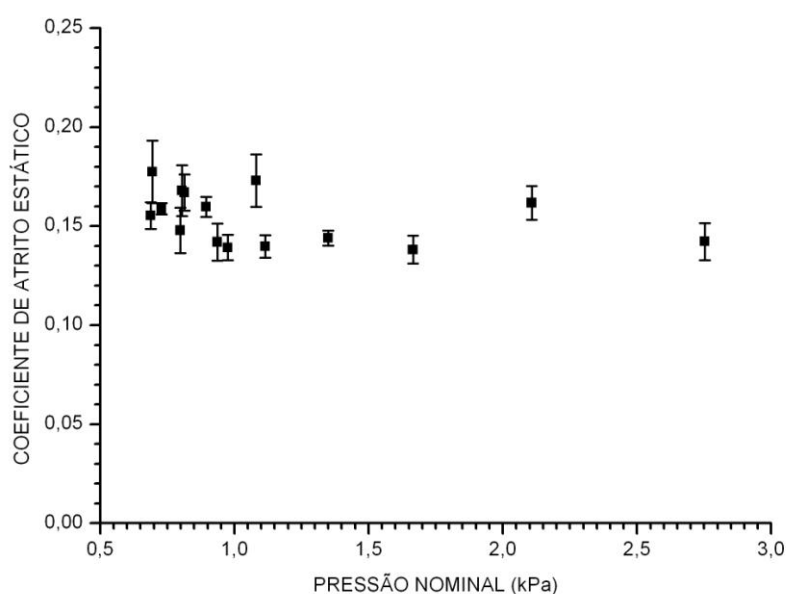


Figura 49 - Relação do coeficiente de atrito estático com a pressão nominal.

Comparando-se os resultados mostrados na Figura 49 com os resultados obtidos por Dunkin e Kim, (1995) mostrados na Figura 13 observa-se que os resultados da Figura 49 apresentam menor variação isso provavelmente, também as menores cargas utilizadas por Dunkin e Kim.

Além das variações nos valores médios, pode-se descrever o comportamento apresentado na Figura 49 como sendo similar ao descrito por Jackson et al (2011). Estes autores verificaram um decréscimo do coeficiente de atrito com a pressão nominal até um determinado valor e a partir de então, o mesmo passa a ser considerado constante. Este comportamento pode estar associado às maiores flutuações nos ensaios conduzidos com baixas pressões de contato.

As medições do atrito estático (Ensaio 3), no plano inclinado, médias e desvios padrões dos corpos de prova tipo maciço em aço ABNT 1045(Grupo B) com massa constante de 0,377 kg e área nominal constante, a uma temperatura de 24°C \pm 1°C e umidade relativa de 51% \pm 1% são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores de atrito estático (Ensaio 3), no plano inclinado, dos corpos de prova tipo maciço (Grupo B) com massa constante de 0,377 Kg e área nominal constante.

C. P.	MED.1	MED.2	MED.3	MED.4	MED.5	MED.6	MED.7	MED.8	MÉDIA
10	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11 \pm 0,007
11	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12 \pm 0,003
12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,12 \pm 0,004
13	0,13	0,13	0,14	0,13	0,13	0,11	0,16	0,13	0,13 \pm 0,015
14	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12 \pm 0,007
15	0,13	0,12	0,13	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,13 \pm 0,003
16	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13 \pm 0,004
17	0,14	0,12	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13 \pm 0,006
18	0,13	0,12	0,13	0,13	0,12	0,14	0,13	0,13	0,13 \pm 0,005

A Figura 50 mostra os resultados dos valores do coeficiente de atrito estático para os Corpos de Prova do Grupo B com massa e área nominal constante.

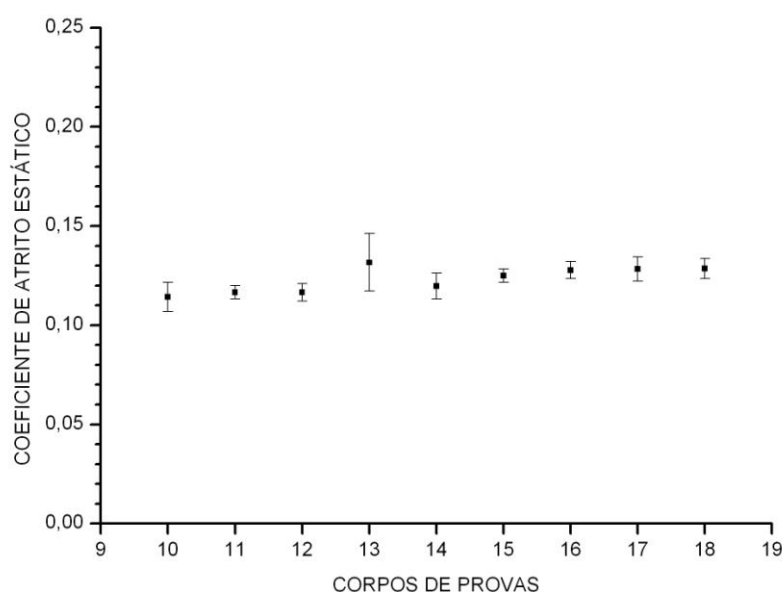


Figura 50 - Coeficiente de atrito estático dos C.P. com massa e área nominal constante- Grupo B.

Como conclusão geral a respeito da variação do coeficiente de atrito com a pressão nominal de contato, pode-se afirmar que os resultados mostrados na Figura 50 apresentam-se com uma variação menor que todos os outros resultados provavelmente devido a menor variação da rugosidade dos C.P. Portanto, as variações são investigadas no sentido de que a rugosidade tenha afetado os valores de atrito.

Correlacionando os resultados médios das medições do coeficiente de atrito estático obtidos nos ensaios 2 e 3 com o Parâmetro α (Alfa) dos grupos G1, G2, G3 e G4 (Tabela 14) observa-se que existe uma tendência ascendente do coeficiente de atrito com o aumento de Alfa.

A Figura 51 mostra a variação do coeficiente de atrito estático com o Parâmetro Alfa. O parâmetro alfa é um indicador da área real de contato em deformações elásticas, conforme McCool (1986).

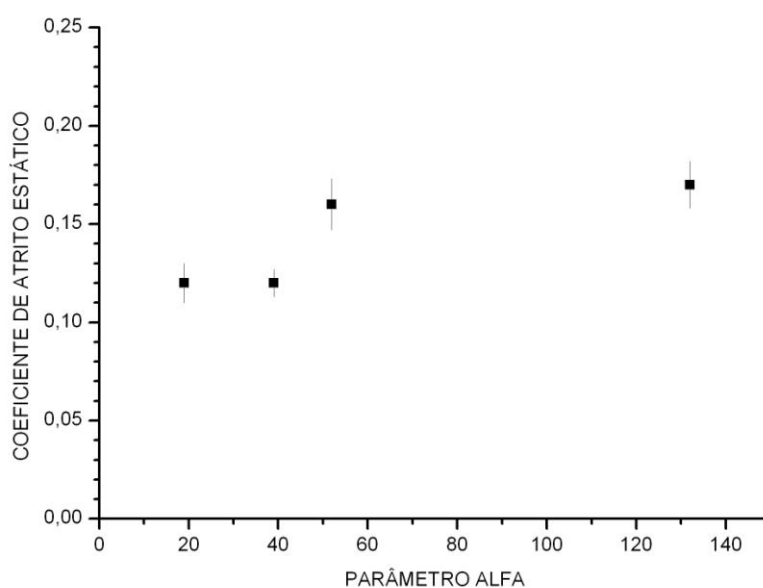


Figura 51 – Relação do coeficiente de atrito estático com o Parâmetro Alfa para os grupos G1, G2, G3, G4.

É possível perceber na Figura 51 dois patamares de valores. O primeiro está associado às amostras do tipo maciço, fabricadas em aço ABNT1045 com valores de Alfa até 40. Por sua vez, o segundo patamar é relativo às amostras do tipo copo, fabricadas em aço ABNT 1010.

O comportamento esperado para a variação do coeficiente de atrito é que o mesmo aumente com a área real de contato (Ghabrial e Zaghlool, 1974; Koura e Omar, 1981; Montanez-Calao, 2011 e Polyakov et al., 2012). No caso dos resultados da Figura 51 este comportamento é verificado de forma parcial. Portanto, outras variáveis associadas à área de contato influenciaram os resultados.

Embora os parâmetros de corte empregados na usinagem dos C.P. tenham sido os mesmos, as condições de fixação (área de contato sobre a mesa magnética da máquina retificadora) para os grupos A e B não foram às mesmas. Estas diferenças podem ter implicado que a área de contato durante a execução dos ensaios foi determinada pela geometria dos corpos de prova e o efeito da rugosidade pode ser considerado como secundário, ou seja, para uma mesma geometria de contato, o atrito não dependeu da rugosidade, contrariamente ao que os resultados da literatura demonstram até então.

5 CONCLUSÕES

Considerando as condições experimentais delimitadas ao longo deste trabalho, ou seja, corpos de prova retificados com áreas nominais entre 962,11mm² e 3848,45mm², contra uma placa de vidro anisotrópica, verificou-se que:

- a pressão nominal de contato afetou os valores médios de coeficiente de atrito estático de aços retificados até um determinado valor, pois maiores variações ocorrem com pressões de contato menores; e

- a rugosidade dos corpos de prova retificados, expressa pelo parâmetro de banda Alfa, não afetou o coeficiente de atrito estático para corpos de mesma geometria e dimensões.

Fica evidente que para o estudo da influência dos parâmetros que podem afetar os valores do atrito estático, em laboratório, deve-se ter um controle preciso do processo de obtenção das superfícies a serem ensaiadas, da metodologia de ensaio e do próprio ambiente laboratorial.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar ensaios, utilizando plano inclinado, em ambiente climatizado, com amostras endurecidas obtidas por diferentes processos de usinagem verificando sua correlação com o parâmetro Alfa.

Realizar ensaios, utilizando plano inclinado, em ambiente climatizado, com amostras endurecidas obtidas pelo mesmo processo de usinagem, porém com variação dos parâmetros de entrada do processo e verificando sua correlação com o parâmetro Alfa.

Realizar ensaios, utilizando plano inclinado, em ambiente climatizado, com amostras endurecidas e obtidas pelo processo de lapidação, com variação de carga e área nominal.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM** D3248-73(1984) Method of Test for Coefficient of Static Friction of Corrugated and Solid Fiberboard (Inclined Plane Method), 1988.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM** D3334-80 Methods of Testing Fabrics Woven from Polyolefin Monofilaments, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G76-95 Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets, **ASTM International**, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G77 – 05 Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test, **ASTM International**, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G99 – 05 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, **ASTM International**, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM Standard G40-92 Terminology relating to wear and erosion. **ASTM International**, West Conshohocken, PA. p. 8. 1992.

BLAU P. J. **Friction science and technology: from concepts applications**. 2.ed., 2008.

BLUNT L. and JIANG X. Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards “SURFSTAND” Elsevier, 2003.

BLUNT L. **The History and Current State of 3D Surface Characterisation**, 2003.

BUCKLEY D.H. Tribological properties of surfaces, **Thin Solid Films**, Elsevier Sequoia, Netherlands, 53 271-283,1978.

BUDINSKI K. G., Laboratory testing methods for solid friction, ASM Handbook,. Friction, Lubrication and Wear Technology. In: **Metals handbook**, Vol 18, 2006.

CHETWYND, D. G., GANSS, M. A. The influence of the nominal contact area planform on friction force, Elsevier, **Wear**, 83. 303 – 309, 1982

CZICHOS H., **Tribology**: a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear, Vol. 1, Elsevier, 1978.

DICKEY, R. D. I., JACKSON, R. L., FLOWERS, G. T., Measurements of the Static Friction Coefficient Between Tin Surfaces and Comparison to a Theoretical Model, **Journal of Tribology**, **ASME**, 133(3), 2011).

DIN 7184 Tolerances of form and position: definitions, indication on drawings,1972.

DONG, W.P., SULLIVAN, P.J. and STOUT, K.J., Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography IV:Parameters for characterising special and hybrid properties, **Wear**, 178, p.45-60,1994.

DONG, W.P., SULLIVAN, P.J., STOUT, K.J., Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties, **Wear**,178, p.29-43,1994.

DOWSON, D., **History of tribology**, 1998.

DUNKIN J. E, KIM D. E., Measurement of static friction coefficient between flat surfaces **Wear** 193 186-192, 1995.

ETSION, I., AMIT M., The effect of small normal loads on the static friction coefficient for very smooth surfaces, **Proc. ASME/TLE Tribology Conf**, San Diego, CA, Oct. 18-21, 1992.

GREENWOOD, J. A., WILLIAMSON, J. B. P., Contact of Nominally Flat Surfaces, **Poc. R. Soc. London, Ser A**, 295 (1966).

GRIFFITHS, B., **Manufacturing Surface Technology**. Penton Press, 2001.

HALLING, J., **Principles of Tribology**, Mc Millan, 1989.

HUTCHINGS, I. M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Butterworth-Heinemann, 2001.

ISO 14460-1, "Geometrical Product Specification (GPS) - Geometric Features Part 1: General terms and definitions".

JIANG, Q., BLUNT L., STOUT, K.J., Development of a lifting wavelet representation for surface characterisation, **Proc. R. Soc. Lond. A**. 456 p. 1-31, 2000.

KLOCKE, F., KÖNIG, W., **Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen** ,VDI-Buch, 2005.

KRUNDRAK, J., GYANI, K.; BANA, V., Roughness of ground and hard-turned surfaces on the basis of 3D parameters. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, v. 38, p. 110–119, 2008.

LONARDO, P. M., TRUMPOLD, H., CHIFFRE, L. D. Progress in 3D surface microtopography Characterization, **Annals of the CIRP**, 45, pp.589-598,1996.

LUDEMA, K. C., **Friction, Wear, Lubrication – A Textbook in Tribology**. CRC Press LLC, 2000.

MCCOOL, J.I., Comparison of Models For The Contact of Rough Surfaces, **Wear**, Vol. 107, p.37 – 60, 1986.

MCCOOL, J.I., Relating Profile Instrument Measurements to the Functional Performance of Rough Surfaces, Tribology Division of the American Society of Mechanical Engineers-**ASME**, Vol. 109, p. 264-270, 1987.

MONTANEZ-CALAU L., Coeficiente de Atrito Estático do Par Aço AISI H13 Temperado e Revenido e Recobrimento de Cromo Duro: Ensaios em Plano Inclinado, Dissertação, **UTFPR**, 2011.

PASSOS, A.G., SILVA, C.H., Desenvolvimento de tribômetro do tipo plano inclinado para medição de coeficiente de atrito estático, **CONEM**, 2012.

PETERS, J., BRYAN, J. B., et al. Contribution of CIRP to the development of metrology and surface quality evaluation during the last fifty years, **Annals of the CIRP**, 50, p.471-488, 2001.

PINTÚDE, G., AMARAL, P.L.F., TAKEHARA, G., Análise estatística de parâmetros funcionais de rugosidade obtidos para superfícies de aço retificadas, **Congresso da ABM**, 2013.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**, Wiley, Y, 1965, Section 6.16.

RABINOWICZ, E. Friction coefficients of noble metals over a range of loads, **Wear**, 159, 89-94, 1992.

RABINOWICZ, E., The determination of the compatibility of metals through Static friction tests, **ASLE Trans.**, 14, 198-205, 1971.

SIKORSKI, M. E., The adhesion of metals and factors that influence it, **Wear**, 7, 144-162, 1964.

SINGH, R., MELKOTE, S. N., HASHIMOTO, F., Frictional response of precision finished surfaces in pure sliding, Elsevier, **Wear**, 258, 1500-1509, 2005

STOLARSKI, T.A., Batchelor, A. W., **Tribology in Machine Design**. Butterworth-Heinemann, 2000.

STOUT K. J., J. DAVIS, The specification of surface finish tolerance for the control of manufacture of engineering surfaces **Wear**, v.109,181-193, 1986.

STOUT, K.J., SULLIVAN, P.J., DONG, W.P., MAINSAH, E., LUO, N., MATHIA, T., ZAHYOUANI, H., The Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions, 1993.

WHEELER D. R., Effect of adsorbed chlorine and oxygen on the shear strength of iron and copper junctions, **J. Appl. Phys.** 47, 1123, 1976.

WHITENTON, E. P., Surface Topography and Image Analysis (Area), **Metals Handbook ASM** Vol.18, 2006.

WOO, K. L. and THOMAS, T. R., Roughness, friction and wear: the effect of contact planform, Elsevier, **Wear**, 57, 357 - 363, 1979.

ZAVARISE G., BORRI-BRUNETTO M., PAGGI M., On the resolution dependence of micromechanical contact models, **Wear**, 262, 42-54, 2007.

APÊNDICE A - PARÂMETROS DE RUGOSIDADE PARA OS GRUPOS

Tabela 21 - Resultados das medições dos parâmetros de rugosidade dos corpos de prova tipo copo(Grupo A).

C.P.	MEDIÇÃO 1				MEDIÇÃO 2				MEDIÇÃO 3			
	Sa1	Sq1	Sdq1	Sds1	Sa2	Sq2	Sdq2	Sds2	Sa3	Sq3	Sdq3	Sds3
1	4,47	2,77	0,28	13849	2,95	5,30	0,27	13921	2,23	3,73	0,27	13990
2	2,15	2,69	0,27	15015	2,53	2,35	0,27	15286	1,88	3,16	0,28	15393
3	1,68	2,10	0,17	15071	2,21	2,71	0,25	15143	2,02	2,48	0,25	15003
4	2,14	2,69	0,26	12491	4,21	4,98	0,25	12127	6,30	7,72	0,25	12129
5	2,41	2,98	0,28	15433	2,52	3,19	0,31	14928	2,60	3,10	0,33	14655
6	3,23	3,98	0,36	13180	2,31	2,80	0,29	13805	2,63	3,23	0,30	14473
7	7,82	9,04	0,28	13056	4,37	3,80	0,28	12636	3,12	5,19	0,28	12812
8	3,52	4,49	0,32	12837	3,21	3,95	0,29	12928	2,81	3,47	0,25	12419

Tabela 22 - Resultados das medições dos parâmetros de rugosidade dos corpos de prova tipo maciço(Grupo B).

C.P.	MEDIÇÃO 1				MEDIÇÃO 2				MEDIÇÃO 3			
	Sa1	Sq1	Sdq1	Sds1	Sa2	Sq2	Sdq2	Sds2	Sa3	Sq3	Sdq3	Sds3
10	1,11	1,42	0,24	14135	1,32	1,45	0,23	13933	1,10	1,67	0,23	13788
11	1,45	1,80	0,26	14137	1,69	2,07	0,25	14235	2,17	2,68	0,25	13540
12	1,51	1,88	0,24	13931	1,93	2,44	0,24	13007	1,65	2,01	0,24	13256
13	0,95	1,23	0,24	14828	1,22	1,55	0,24	15215	1,88	2,39	0,32	14059
14	1,20	1,51	0,23	15728	1,43	1,82	0,25	15808	0,97	1,24	0,24	15835
15	1,08	1,38	0,24	16072	1,31	1,17	0,24	15938	1,15	1,43	0,24	16041
16	1,17	1,48	0,24	14072	3,00	3,70	0,25	13596	1,73	2,20	0,25	14078
17	1,09	1,38	0,24	14273	1,11	1,44	0,24	15018	1,29	1,65	0,24	14663
18	1,98	2,42	0,26	14969	1,48	1,85	0,26	14751	2,35	3,00	0,26	14695

Tabela 23 - Parâmetro Sq, média e desvio padrão para o Grupo 1.

G1	Sq			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
11	1,80	2,07	2,68	
12	1,88	2,44	2,01	2,3 ± 0,6
16	1,48	3,70	2,20	

18	2,42	1,85	3,00
----	------	------	------

Tabela 24 - Parâmetro Sdq, média e desvio padrão para o Grupo 1.

G1	Sdq			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
11	0,26	0,25	0,25	
12	0,24	0,24	0,24	0,25 ± 0,01
16	0,24	0,25	0,25	
18	0,26	0,26	0,26	

Tabela 25 - Parâmetro Sds, média e desvio padrão para o Grupo 1.

G1	Sds			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
11	14137	14235	13540	
12	13931	13007	13256	14022 ± 602
16	14072	13596	14078	
18	14969	14751	14695	

Tabela 26 - Parâmetro Sq, média e desvio padrão para o Grupo 2.

G2	Sq			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
2	2,69	2,35	3,16	
3	2,10	2,71	2,48	2,9 ± 0,5
5	2,98	3,19	3,10	
6	3,98	2,80	3,23	

Tabela 27 - Parâmetro Sdq, média e desvio padrão para o Grupo 2.

G2	Sdq			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
2	0,27	0,27	0,28	
3	0,17	0,25	0,25	0,28 ± 0,05
5	0,28	0,31	0,33	
6	0,36	0,29	0,30	

Tabela 28 - Parâmetro Sds, média e desvio padrão para o Grupo 2.

G2	Sds			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
2	15015	15286	15393	
3	15071	15143	15003	14782 ±676
5	15433	14928	14655	
6	13180	13805	14473	

Tabela 29 - Parâmetro Sq, média e desvio padrão para o Grupo 3.

C.P.	Sq			MÉD.
G3	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
1	2,77	5,30	3,73	
4	2,69	4,98	7,72	4,8 ± 1,9
7	9,04	3,80	5,19	
8	4,49	3,95	3,47	

Tabela 30 - Parâmetro Sdq, média e desvio padrão para o Grupo 3.

G3	Sdq			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
1	0,28	0,27	0,27	
4	0,26	0,25	0,25	0,27 ± 0,02
7	0,28	0,28	0,28	
8	0,32	0,29	0,25	

Tabela 31 - Parâmetro Sds, média e desvio padrão para o Grupo 3.

C.P.	Sds			MÉD.
G3	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
1	13849	13921	13990	
4	12491	12127	12129	12933 ± 662
7	13056	12636	12812	
8	12837	12928	12419	

Tabela 32 - Parâmetro Sq, média e desvio padrão para o Grupo 4.

G4	Sq			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
10	1,42	1,45	1,67	
13	1,23	1,55	2,39	
14	1,51	1,82	1,24	1,5 ± 0,3
15	1,38	1,17	1,43	
17	1,38	1,44	1,65	

Tabela 33 - Parâmetro Sdq, média e desvio padrão para o Grupo 4.

G4	Sdq			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
10	0,24	0,23	0,23	
13	0,24	0,24	0,32	
14	0,23	0,25	0,24	0,24 ± 0,02
15	0,24	0,24	0,24	
17	0,24	0,24	0,24	

Tabela 34 - Parâmetro Sds, média e desvio padrão para o Grupo 4.

G4	Sds			MÉD.
C.P.	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	
10	14135	13933	13788	
13	14828	15215	14059	
14	15728	15808	15835	15022 ± 843
15	16072	15938	16041	
17	14273	15018	14663	

APÊNDICE B - CÁLCULO DO MOMENTO ESPECTRAL E LARGURA DE BANDA (ALFA) E RAIÓ MÉDIO

Tabela 35 – Valores médios medidos de Sq, Sdq, Sps e valores calculados de m₀, m₂, m₄, Raio e Alfa para os corpos de Prova do Grupo A.

Parâmetros	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
Sq = raiz quadrada da Altura média	3,93	2,73	2,43	5,13	3,09	3,34	6,01	3,97
Sdq = raiz quadrada média da inclinação	0,27	0,27	0,22	0,25	0,31	0,31	0,28	0,29
m ₀ = Sq ² ; Altura média quadrada	15,47	7,47	5,90	26,31	9,56	11,14	36,12	15,73
Sps = Dsum; Densidade de cumes	13920	15231	15072	12249	15005	13819	12835	12728
m ₂ momento espectral = Sdq ²	0,08	0,07	0,05	0,06	0,09	0,10	0,08	0,08
m ₄ momento espectral	0,03	0,04	0,02	0,03	0,05	0,04	0,03	0,03
Raio médio = $(3\sqrt{\pi})/(8\sqrt{m_4})$	3,59	3,45	4,22	4,15	3,08	3,15	3,64	3,60
Alfa - largura de banda (α)	93,3	49,8	57,6	163,7	49,3	50,8	189,8	79,6

Tabela 36 - Valores médios medidos de Sq, Sdq, Sps e valores calculados de m₀, m₂, m₄, Raio e Alfa para os corpos de Prova do Grupo B.

Parâmetros	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16	CP17	CP18
Sq	1,51	2,18	2,11	1,72	1,52	1,32	2,46	1,49	2,42
Sdq	0,23	0,25	0,24	0,27	0,24	0,24	0,25	0,24	0,26
Sq ² = m ₀ ;	2,29	4,76	4,44	2,97	2,32	1,75	6,06	2,21	5,86
Sps = Dsum;	13952	13971	13398	14701	15790	16017	13915	14651	14805
m ₂ = Sdq ²	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07
m ₄	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Raio médio	4,20	3,87	4,21	3,57	3,92	3,82	4,00	4,03	3,73
Alfa	18,97	33,51	34,11	19,73	21,46	15,82	45,16	18,60	43,16

APÊNDICE C - ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Tabela 37 – Análise de Variância com um nível de confiança de 5% em relação ao Parâmetro Sq para os Corpos de Prova do Grupo1.

Anova: fator único GRUPO 1

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C.P.18	3	7,264	2,421	0,329
C.P.16	3	7,383	2,461	1,287
C.P.12	3	6,322	2,107	0,085
C.P.11	3	6,544	2,181	0,204

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,275	3	0,092	0,192	0,899	4,066
Dentro dos grupos	3,809	8	0,476			
Total	4,084	11				

Tabela 38 - Análise de Variância com um nível de confiança de 5% em relação ao Parâmetro Sq para os Corpos de Prova do Grupo2.

Anova: fator único GRUPO 2

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C.P.3	3	7,287	2,429	0,094
C.P.5	3	9,278	3,093	0,011
C.P.6	3	10,011	3,337	0,358
C.P.2	3	8,197	2,732	0,164

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,434	3	0,478	3,050	0,092	4,066
Dentro dos grupos	1,254	8	0,157			
Total	2,688	11				

Tabela 39 - Análise de Variância com um nível de confiança de 5% em relação ao Parâmetro Sq para os Corpos de Prova do Grupo3.

Anova: fator único GRUPO 3

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C.P.1	3	11,800	3,933	1,635
C.P.4	3	15,388	5,129	6,350
C.P.7	3	18,029	6,010	7,381
C.P.8	3	11,897	3,966	0,261

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	9,037	3	3,012	0,771	0,542	4,066
Dentro dos grupos	31,254	8	3,907			
Total	40,292	11				

Tabela 40 - Análise de Variância com um nível de confiança de 5% em relação ao Parâmetro Sq para os Corpos de Prova do Grupo4.

Anova: fator único GRUPO 4

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C.P.13	3	5,173	1,724	0,360
C.P.14	3	4,568	1,523	0,082
C.P.15	3	3,974	1,325	0,019
C.P.10	3	4,539	1,513	0,018
C.P.17	3	4,462	1,487	0,020

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,243	4	0,061	0,607	0,667	3,478
Dentro dos grupos	0,999	10	0,100			
Total	1,242	14				

APÊNDICE D - DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA RELAÇÃO DO NÚMERO DE CONTATOS PLÁSTICOS COM O NÚMERO TOTAL DE CONTATOS (np/n)

Tabela 41 – Valores do Parâmetro Sp obtidos com o perfilometro para os CP do Grupo A.

C.P.	MEDIÇÃO1	MEDIÇÃO2	MEDIÇÃO3	MÉDIA
	Sp	Sp	Sp	
1	15,15	12,87	7,73	11,92 ± 3,8
2	7,39	9,04	6,64	7,69 ± 1,20
3	5,87	7,69	7,25	6,94 ± 0,94
4	11,41	14,34	7,80	11,18 ± 3,30
5	9,67	8,97	8,15	8,93 ± 0,76
6	9,71	8,12	10,86	9,56 ± 1,37
7	20,70	12,55	9,21	14,15 ± 5,91
8	9,73	14,24	9,40	11,12 ± 2,70

Tabela 42 – Dados para obter o Módulo de Elasticidade Equivalente E.'

v_1 do vidro	v_2 do aço	E_1 do Vidro(GPa)	E_2 do aço(GPa)	$E' = \left(\frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \right)^{-1}$ (GPa)
0,2	0,3	70	207	55,2

Tabela 43 - Dados para obter wp*.

CP	$R = \frac{3\sqrt{\pi}}{8\sqrt{m_4}}$ (mm)	$Y = Hv.0,35.10^3$ (MPa)	E' (MPa)	$\sigma_s = Sq$ (mm)	$wp^* = 6.4 \frac{R}{\sigma_s} \left(\frac{Y}{E'} \right)^2$
1	0,003591	686	55200	0,003933	0,536539
2	0,003454	686	55200	0,002732	0,742888
3	0,00422	686	55200	0,002429	1,021012
4	0,004146	686	55200	0,005129	0,475051
5	0,003082	686	55200	0,003093	0,585582
6	0,003148	686	55200	0,003337	0,55442
7	0,003636	686	55200	0,006010	0,355567
8	0,003598	686	55200	0,003966	0,533283

Tabela 44 - Dados para obter d.

CP	$m_0 (\mu\text{m}^2)$	α	$\bar{z}_s = 4(m_0/\pi\alpha)^{1/2}$ (μm)	$h=Sp (\mu\text{m})$	$d = h - \bar{z}_s (\mu\text{m})$
1	15,4711	93	0,920459	11,915	10,995
2	7,4656	50	0,872035	7,689	6,817
3	5,9000	49	0,783095	6,935	6,152
4	26,3101	164	0,903908	11,182	10,278
5	9,5646	49	0,997057	8,931	7,934
6	11,1356	51	1,054523	9,563	8,509
7	36,1161	190	0,983917	14,152	13,168
8	15,7265	80	1,000590	11,123	10,122

Tabela 45 - Dados para obter a relação de contatos plásticos pelo número de contatos.

CP	$\frac{d}{\sigma_s}$	$\frac{d}{\sigma_s} + wp^*$	$F_0\left(\frac{d}{\sigma_s}\right)$	$F_0\left(\frac{d}{\sigma_s} + wp^*\right)$	$\frac{n_p}{n} = \frac{F_0\left(\frac{d}{\sigma_s} + wp^*\right)}{F_0\left(\frac{d}{\sigma_s}\right)}$	n_p/n
1	2,80	3,33	0,002555	0,000456386	0,178624772	17,9%
2	2,49	3,24	0,006313	0,000621105	0,098379926	9,8%
3	2,53	3,55	0,005706	0,000200381	0,035117577	3,5%
4	2,00	2,48	0,02275	0,006629408	0,291402568	29,1%
5	2,57	3,15	0,005197	0,00085000	0,163470001	16,3%
6	2,55	3,10	0,005438	0,001004435	0,184706763	18,5%
7	2,19	2,55	0,014253	0,005438007	0,381543637	38,2%
8	2,55	3,09	0,005438	0,001065912	0,196011831	19,6%

Tem-se o valor de t com o qual se obtém o valor de F_0 da Tabela 13, com isso calcula-se a relação do número de contatos plásticos com o número total de contatos (n_p/n) com a equação (40).