

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

LUIS FERNANDO MONTAÑEZ CALAO

COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO DO PAR AÇO AISI H13
TEMPERADO E REVENIDO E RECOBRIMENTO DE CROMO DURO:
ENSAIOS EM PLANO INCLINADO

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2011

LUIS FERNANDO MONTAÑEZ CALAO

**COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO DO PAR AÇO AISI H13
TEMPERADO E REVENIDO E RECOBRIMENTO DE CROMO DURO:
ENSAIOS EM PLANO INCLINADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde

CURITIBA

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M764 Montañez Calao, Luis Fernando
Coeficiente de atrito estático do par aço AISI H13 temperado e revenido e recobrimento de cromo duro: ensaios em plano inclinado / Luis Fernando Montañez Calao. — 2011.
89 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Giuseppe Pintaúde.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2011.
Bibliografia: f. 81-83.

1. Aço – Propriedades mecânicas. 2. Atrito. 3. Aspereza de superfície. 4. Desgaste mecânico. 5. Tribologia. 6. Engenharia mecânica – Dissertações. I. Pintaúde, Giuseppe, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIS FERNANDO MONTAÑEZ CALAO

COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO DO PAR AÇO AISI H13 TEMPERADO E REVENIDO E RECOBRIMENTO DE CROMO DURO: ENSAIOS EM PLANO INCLINADO.

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Engenharia Mecânica e de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

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

Banca Examinadora

Prof. Carlos Henrique da Silva, Dr.Eng.
(UTFPR)

Prof. Deniol Tanaka, Dr. Eng.
(Poli-USP)

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

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

Curitiba, 29 de Setembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Giuseppe Pintaúde pela orientação, paciência e confiança neste trabalho.

Ao Prof. Julio Klein pelo acompanhamento no processo de formação e contribuições no trabalho

Ao Prof. Deniol Tanaka pelas contribuições no trabalho

Ao Prof. Carlos Henrique pelo acompanhamento no processo de formação, contribuições no trabalho e por ser o principal responsável de minha chegada ao Brasil.

Agradeço aos meus amigos e compatriotas Juan, Jairo e Sara pelo acompanhamento e as palavras nos momentos necessário.

Ao Prof. Marco Luersen pelo espaço de trabalho dentro do laboratório e pelo ajuda sempre que foi necessário.

Ao laboratório de usinagem da UTFPR e ao Prof. Pedro Amaral pela ajuda na preparação na máquina de ensaios

Ao aluno de engenharia mecânica Adriano Gonçalves pela ajuda no desenvolvimento do equipamento de ensaios.

A todos os meus amigos e familiares que, torceram por mim durante todo este tempo e que ainda torcem.

A minha mãe, Gloria Calao Perez pelo apoio incondicional e por acreditar sempre nas minhas decisões.

A empresa Tecno Plating pela doação de serviços de tratamento superficiais.

Finalmente, agradeço a CAPES pela bolsa durante estes dois anos que fizeram possível minha formação.

RESUMO

Neste trabalho estudou-se a influência de parâmetros de rugosidade e propriedades mecânicas de um aço AISI H13 no coeficiente de atrito estático, ensaiado no sistema plano inclinado. Como contra corpo foi utilizado um recobrimento de cromo duro, considerado idealmente liso. O coeficiente de atrito foi relacionado com a área real de contato, tendo como dados de entrada parâmetros de rugosidade bidimensionais. A rotina de cálculo proposta por McCool (1987) foi aplicada para obtenção de uma estimativa de área de contato, utilizando os parâmetros R_q (rugosidade média quadrática) e RD_q (inclinação média quadrática). Foram estudados três conjuntos de amostras, com acabamento superficial produzido por retificação plana e durezas distintas, produzidas por tratamentos térmicos aos corpos de prova. A variação da dureza foi obtida por meio de diferentes temperaturas de duplo revenimento: 540, 600 e 640 °C. Os ensaios de plano inclinado foram conduzidos em uma velocidade de 0,33°/s e uma carga aplicada produzida pelo peso próprio da amostra. Um sensor de movimento é acoplado ao equipamento para detectar o início do deslizamento e permitir a medida de ângulo neste instante. Para análise dos resultados, cada conjunto de amostras foi considerado como sendo diferente em função do tratamento térmico. Além disso, subconjuntos de amostras foram distinguidos em função do parâmetro R_q , por se tratar de um parâmetro médio e que é utilizado diretamente no cálculo da área real de contato. Dessa forma, para cada condição metalúrgica, pode-se verificar a variação do coeficiente de atrito estático com as propriedades mecânicas e superficiais. Foi verificado que, a dureza não apresentou influência no coeficiente de atrito estático, porém, a combinação das propriedades mecânicas e superficiais representada pelo índice de plasticidade apresenta uma relação direta.

Palavras Chaves: Coeficiente de atrito estático; rugosidade; aço AISI H13

ABSTRACT

In this work was studied the influence of roughness parameters and mechanical properties of the steel AISI H13 in the coefficient of static friction tested in the inclined plane method. The counterbody used was a coating of hard chrome, considered ideally smooth. The coefficient of friction was related to the real area of contact, taking as input bi-dimensional roughness parameters. The routine calculation proposed by McCool (1987) was applied to obtain an estimate of contact area, using the parameters R_q (root mean square roughness) and R_dq (mean square slope). Three sets of samples were studied, with surface finish produced by grinding flat and different hardness, produced by heat treatments to the samples. The variation of hardness was obtained by different double tempering temperatures: 540, 600 and 640 ° C. The inclined plane tests were conducted at a speed of 0.33 °/s and an applied load produced by the self weight of the body. A motion sensor is attached to the equipment to detect the onset of slip and allow the measure of angle instantly. To analyze the results, each set of samples was considered different depending on the heat treatment. In addition, subsets of samples were distinguished in accordance with R_q parameter, because it is an average parameter and it is used directly to calculate the real area of contact. Thus, for each metallurgical condition was possible to see, the variation of the coefficient of static friction with mechanical and surface properties. It was verified that the hardness had no effect on the coefficient of static friction, however, the combination of mechanical and surface properties represented by the plasticity index has a direct relationship.

Keywords: Coefficient of friction, roughness, steel AISI H13

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	14
1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Contexto da Pesquisa	14
1.2. Objetivo	16
1.3. Estrutura do Projeto	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. Atrito	17
2.2. Componentes microscópicas do atrito	21
2.3. Rugosidade	22
2.3.1 Medição de rugosidade em 2D.	24
2.3.2 Parâmetros de Rugosidade Bidimensionais	25
2.3.2.1 Parâmetro Ra.	26
2.3.2.2 Parâmetro Rq	28
2.3.2.3 Parâmetro Rdq	28
2.3.2.4 Parâmetro Assimetria Rsk (Skewness)	29
2.3.2.5 Parâmetro Kurtosis Rku	29
2.4. Contato entre superfícies	30
2.5. Modelo de Greenwood e Williamson (G-W)	32
2.6. Parâmetros que influenciam o coeficiente de atrito estático.	46
3 MATERIAIS E METODOS	52
3.1. Ensaio de plano inclinado	52
3.2. Preparação de corpos-de-prova	56
3.3. Análise de corpos de prova	57
3.3.1. Análise Metalográfica	57
3.3.2. Análise Topográfica	59
3.4. Caracterização do contra-corpo	64
3.5. Estimativa da área de contato	65

3.6. Estimativa do índice de plasticidade.....	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
4.1. Coeficiente de atrito estático.	68
4.2. Efeito da Dureza no coeficiente de atrito estático.	74
4.3. Efeito da Rugosidade no coeficiente de atrito estático.....	69
4.4. Efeito da área de contato estimada no coeficiente de atrito estático.	75
4.5. Efeito combinado entre dureza e rugosidade no coeficiente de atrito estático.....	76
5 CONCLUSÕES	79
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	80
7 REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A - Cálculo dos momentos espectrais.....	84
APÊNDICE B. Resultados por direção.....	88

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1 TRAJE DA SPEEDO PARA MELHORA NO DESEMPENHO DOS NADADORES. (HTTP://EDUCACAO.UOL.COM.BR/FISICA/ULT1700U19.JHTM)	15
FIGURA 2-1 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO COM A ÁREA DE CONTATO APARENTE (HUTCHING, 1992).....	18
FIGURA 2-2 CURVA TÍPICA DA EVOLUÇÃO DA FORÇA DE ATRITO COM O TEMPO.	19
FIGURA 2-3 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO COM A FORÇA NORMAL EXTERNA PARA O CASO DE CONTATO ENTRE DUAS PEÇAS DE MEMS DEPOSITADO EM UMA SUPERFÍCIE DE POLYSILICON POLICARPOU (2004)	20
FIGURA 2-4 REPRESENTAÇÃO DA AMPLIAÇÃO HORIZONTAL DE UM PERFIL DE RUGOSIDADE (HUTCHINGS,1992).....	23
FIGURA 2-5 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA INTERCEPÇÃO DO PLANO COM A SUPERFÍCIE, QUE GERA O PERFIL DE RUGOSIDADE. [ISO 4287]	23
FIGURA 2-6 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CÁLCULO DE RA. (THE PARAMETER TREE OF ROUGHNESS SURFACE, 2000)	26
FIGURA 2-7 SUPERFÍCIES TOPOGRAFICAMENTE DIFERENTES QUE APRESENTAM O MESMO VALOR DE RA.....	27
FIGURA 2-8 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CALCULO DE RDQ. (THE PARAMETER TREE OF ROUGHNESS SURFACE, 2000)	28
FIGURA 2-9 VARIAÇÃO DO PARÂMETRO R _{KU} COM A FORMA DA SUPERFÍCIE. (THE PARAMETER TREE OF ROUGHNESS SURFACE, 2000)	30
FIGURA 2-10 PONTOS DE CONTATO DE SUPERFÍCIES RUGOSAS (ADAPTADO A. POLYCARPOU ET AL 2004).....	31
FIGURA 2-11 VARIÁVEIS PRESENTES NUM TRIBOSSISTEMA.	31
FIGURA 2-12 PLANOS MEIOS E DISTRIBUIÇÃO DA SUPERFÍCIE E OS PICOS. (MCCOOL J.I, 1986) .	33
FIGURA 2-13 DISTRIBUIÇÃO DE ALTURAS DOS PICOS. (MCCOOL 1986)	34
FIGURA 2-14 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CONTATO GEOMÉTRICO NOS PICOS. (MCCOOL, 1986).....	36
FIGURA 2-15 SIMPLIFICAÇÃO DAS DUAS SUPERFÍCIES RUGOSAS EM CONTATO PARA UMA RUGOSA EQUIVALENTE E UMA SUPERFÍCIE LISA. (WHITEHOUSE, 1999).....	42
FIGURA 2-16 VARIAÇÃO DE A_c/A_0 COM A. ADAPTAÇÃO EQ 42	43
FIGURA 2-17 RELAÇÃO ENTRE OS PLANOS MEIOS DOS PICOS E A SUPERFÍCIE. (MCCOOL, 1987).....	44
FIGURA 2-18 DENSIDADE DE PROBABILIDADE DAS ALTURAS DE PICOS. NAYAK (1971 APUD POLICARPOU ET AL 2004).....	45
FIGURA 2-19 PREDIÇÃO ANALÍTICA DE ASSIMETRIA E KURTOSIS DAS ALTURAS DOS PICOS. POLICARPOU (2004).....	45

FIGURA 2-20 EFEITO DA CARGA NORMAL SOBRE O COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO COM CONTRA-CORPO DE ALUMÍNIO.....	47
FIGURA 2-21 EFEITO DA CARGA NORMAL SOBRE O COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO COM CONTRA-CORPO DE AÇO.....	47
FIGURA 2-22 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO COM A FORÇA EXTERNA E O ÍNDICE DE PLASTICIDADE. A) VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO COM UMA ENERGIA SUPERFICIAL DE 5J/M ² . B) VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO COM UMA ENERGIA SUPERFICIAL DE 2.5J/M ² . C) VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO COM UMA ENERGIA SUPERFICIAL DE 0.5J/M ²	49
FIGURA 2-23 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO COM O ÂNGULO INICIAL DAS ASPEREZAS PARA DIFERENTES PROCESSOS DE USINAGEM.....	50
FIGURA 2-24 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO COM RA PARA DIFERENTES PROCESSOS DE USINAGEM.....	51
FIGURA 3-1. ESQUEMA DO PLANO INCLINADO E ANÁLISE DE FORÇAS USADAS PARA CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO.....	52
FIGURA 3-2 EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE ATRITO ESTÁTICO DE PLANO INCLINADO.....	53
FIGURA 3-3 CORPO DE PROVA PARA ENSAIOS DE ATRITO ESTÁTICO MEDIANTE PLANO INCLINADO.....	55
FIGURA 3-4 CORPO DE PROVA E CONTRA-CORPO ENSAIADOS.....	55
FIGURA 3-5 MEDIDAS DO CORPO DE PROVA UTILIZADO PARA ENSAIOS DE ATRITO ESTÁTICO MEDIANTE PLANO INCLINADO.....	56
FIGURA 3-6 MICROESTRUTURA RESULTANTE APÓS TEMPERA A 1050°C E DOIS REVENIMENTOS. A) TEMPERATURA DE REVENIMENTO 540°C. B) TEMPERATURA DE REVENIMENTO 600°C. C) TEMPERATURA DE REVENIMENTO 640°C.....	59
FIGURA 3-7 PERFIS DE RUGOSIDADE. SEQUÊNCIA DESDE O PERFIL BRUTO ATÉ O PERFIL 'SEM ERROS', SENDO O PRIMEIRO PERFIL O PERFIL BRUTO.....	60
FIGURA 3-8. APARÊNCIA DO RECOBRIMENTO DE CROMO-DURO. CONTRA-CORPO.....	64
FIGURA 3-9. MICROESTRUTURA DO CONTRA CORPO USADO NOS ENSAIOS DE ATRITO ESTÁTICO.....	65
FIGURA 3-10 VARIAÇÃO DE M_q/M_0 COM RQ/RDQ . ADAPTAÇÃO (MCCOOL 1987).....	66
FIGURA 4-1 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO COM A DUREZA.....	74
FIGURA 4-2 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO COM ALPHA PARA 540°C.....	70
FIGURA 4-3 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO COM O ÍNDICE DE PLASTICIDADE.....	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 VALORES DAS FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRONIZADA (MCCOOL)	35
TABELA 2. MASSA E FORÇA NORMAL MÁXIMA DAS AMOSTRAS ENSAIADAS PARA CADA TEMPERATURA DE REVENIMENTO.	54
TABELA 3 DUREZAS DOS MATERIAIS DE ENSAIO.	57
TABELA 4. PARÂMETRO DE RUGOSIDADE RQ. TEMPERATURA DE REVENIMENTO 540°C.....	61
TABELA 5 PARÂMETRO DE RUGOSIDADE RQ. TEMPERATURA DE REVENIMENTO 600°C.....	61
TABELA 6 PARÂMETRO DE RUGOSIDADE RQ. TEMPERATURA DE REVENIMENTO 640°C.....	61
TABELA 7. RESULTADO DO TESTE DE HIPOTESE	63
TABELA 8. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO SISTEMA TRIBOLÓGICO: AÇO H13-CROMO DURO .67	
TABELA 9 RESULTADOS DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO	69
TABELA 10 MOMENTOS ESPECTRAIS E PARÂMETRO A, CALCULADO SEGUNDO GREENWOOD E WILLIANSOM.....	70
TABELA 11 VALORES DO DESVIO PADRÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS PICOS (Σ , μ M), RAIOS (R,10-2MM) E DENSIDADE DOS PICOS (DSUM,104 PICOS/MM2)	71
TABELA 12. PARÂMETRO DE RUGOSIDADE RP, VALOR CALCULADO DE ZS E 'D.'	75
TABELA 13. NUMERO DE CONTATOS (N, MM-2), RELAÇÃO DE ÁREAS (AC/A0,10-6) E ÁREA REAL CALCULADA (AC, MM2).....	76
TABELA 14. ÍNDICE DE PLASTICIDADE (Ψ), NUMERO DE POSSÍVEIS CONTATOS PLÁSTICOS (NP, MM-2), RELAÇÃO ENTRE NUMERO DE CONTATOS TOTAIS E NUMERO DE CONTATOS PLÁSTICOS E RESULTADO DE COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO (% NP/N).	78
TABELA A. 1 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE PARA CADA CONJUNTO DE RESULTADOS DISTINGUIDOS NA TEMPERATURA DE REVENIMENTO 540°C	84
TABELA A. 2 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE PARA CADA CONJUNTO DE RESULTADOS DISTINGUIDOS NA TEMPERATURA DE REVENIMENTO 600°C	85
TABELA A. 3 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE PARA CADA CONJUNTO DE RESULTADOS DISTINGUIDO NA TEMPERATURA DE REVENIMENTO 540°C	86
TABELA A. 4 MOMENTOS ESPECTRAIS NAS DIREÇÕES DE MEDIÇÃO E MOMENTOS RESULTANTES, PARA AS AMOSTRAS REVENIDAS A 540°C.....	86
TABELA A. 5 MOMENTOS ESPECTRAIS NAS DIREÇÕES DE MEDIÇÃO E MOMENTOS RESULTANTES, PARA AS AMOSTRAS REVENIDAS A 600°C E 640°C	87
TABELA B. 1. RESULTADOS POR PEÇAS DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO NAS DIREÇÕES TRANSVERSAL E LONGITUDINAL. PEÇAS COM DUPLO REVENIMENTO A 540°C	88
TABELA B. 2. RESULTADOS POR PEÇAS DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO NAS DIREÇÕES TRANSVERSAL E LONGITUDINAL. PEÇAS COM DUPLO REVENIMENTO A 600°C	88

TABELA B. 3 RESULTADOS POR PEÇAS DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO NAS DIREÇÕES
TRANSVERSAL E LONGITUDINAL. PEÇAS COM DUPLO REVENIMENTO A 640°C

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Área nominal de contato
A_c	Área real de contato
D_{sum}	Densidade de picos na superfície
d	Distancia entre o plano liso e o plano meio dos picos
E	Módulo de elasticidade
E^*	Módulo de elasticidade reduzido
F	Força Tangencial
F_s	Força de adesão total
h	Distancia entre o plano liso e a linha central da superfície rugosa
l	Comprimento amostral de um perfil de rugosidade
m_0	Momento espectral zero
m_2	Segundo momento espectral
m_4	Quarto momento espectral
n	Numero total de contatos
n_p	Numero total de contatos plásticos.
P_0	Pressão máxima de contato
Q	Força de atrito
R	Raio das asperezas
Ra	Rugosidade média
RDq	Inclinação quadrática média das asperezas
Rsk	Assimetria
Rku	Kurtosis
Rq	Rugosidade quadrática média
s	Esforço Tangencial
S_1	Desvio padrão associado a μ_G
S_2	Desvio padrão associado a μ_P
t_0	Parâmetro do teste de hipotese
W	Força normal (P)
Y	Tensão de escoamento.
\bar{Z}_s	Distancia entre o plano meio da superfície e o plano meio dos Picos

μ	Coeficiente de atrito estatico
σ_s	Desvio padrão da distribuição de probabilidade gaussiana
Ψ	Índice de plasticidade
$\Delta\gamma$	Energia de superfície
α'	Constante da teoria do crescimento de junções
α	Parâmetro de rugosidade no modelo de Greenwood-Williansom
μ_G	Coeficiente de atrito estático geral
μ_P	Coeficiente de atrito estático por peça
$\alpha/2$	Nível de confiança do teste de hipotese
ν	Graus de liberdade do teste de hipotese

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto da Pesquisa

A força de atrito é um fenômeno superficial que descreve a resistência de um ‘corpo’ a se movimentar em relação a outro, é uma força de importância indiscutível, ela está presente em praticamente todos os momentos do nosso dia-a-dia, por exemplo, quando andamos ou corremos há presença da força de atrito entre as solas dos sapatos e o pavimento. Outro exemplo do dia-a-dia é o contato dos pneus (carros, motos, bicicletas, etc) com o pavimento. No nível de competição esportiva a engenharia desenvolve um papel importante no estudo do atrito. O desenho de novas superfícies e a utilização de novos materiais na roupa de nadadores olímpicos é um exemplo da importância no estudo do atrito.

<http://educacao.uol.com.br/fisica/ult1700u19.jhtm>

A Figura 1-1 apresenta um traje criado pela Speedo que visa melhorar o desempenho dos nadadores. A criação é conhecida como fastskin. A Speedo buscou nos mares a inspiração para o novo maiô. O fastskin imita trechos da pele do tubarão. A pele do animal possui características específicas para diminuir o atrito. Pequenas estruturas em forma de "V", chamadas de denticulos dermais, direcionam o fluxo da água sobre o corpo, reduzindo o arrasto, obtendo como resultado mais velocidade.

<http://galileu.globo.com/edic/108/olimpicos.htm>



Figura 1-1 Traje da Speedo para melhora no desempenho dos nadadores.

(<http://educacao.uol.com.br/fisica/ult1700u19.ihtm>)

No campo da engenharia mecânica, aperfeiçoar projetos de componentes como: engrenagens, anéis, camisas, etc é um caminho arduamente perseguido pelos engenheiros de projetos de motores para reduzir o atrito. Os químicos concentram-se no desenvolvimento de óleos cada vez menos resistentes ao movimento. Os que se dedicam à engenharia dos materiais buscam novos revestimentos com baixo atrito. (INES, 2010)

O coeficiente de atrito estático é uma variável importante em muitas aplicações industriais e até mesmo cotidianas, como foi citado antes. Atrito existe em qualquer processo de conformação de metais, o efeito do atrito é tão importante quanto o de parâmetros mensuráveis independente, (ASM Handbook VOL 18, 1992). Algumas vezes o atrito é uma condição desejada, por exemplo, em sistemas de frenagem de automóveis, aeronaves, motocicletas, trens ferroviários e muitas outras aplicações industriais. (HÖGANÄS, 2010)

Usualmente o coeficiente de atrito estático é tratado de forma macroscópica, enquanto as variáveis de superfície que são de fato microscópicas são as que efetivamente comandam o fenômeno. Irregularidades de superfície e seu comportamento durante o deslizamento são fatores fundamentais para a caracterização do atrito e desgaste. Mediante medições de rugosidade e cálculo do índice de plasticidade podem-se caracterizar o contato entre as irregularidades superficiais e o nível de deformação após a aplicação de uma carga

externa respectivamente que finalmente refletem na área real de contato, parâmetro de interesse para a caracterização tribológica.

1.2. Objetivo

A fim de acrescentar no conhecimento das variáveis que influenciam no coeficiente de atrito estático, o presente trabalho tem como objetivo determinar a influência do acabamento superficial e propriedades mecânicas no coeficiente de atrito estático de um aço H13 contra um recobrimento de cromo duro.

1.3. Estrutura do Projeto

Dentro do Grupo de Materiais, Tribologia e Superfícies (GrMaTS) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná que tem como objetivo desenvolver e otimizar processos; estudar o comportamento e o desempenho em condições de solitação extrema de atrito, de corrosão, de fadiga e de desgaste; estabelecer correlações entre processamento, microestrutura e as propriedades físicas e mecânicas, foi desenvolvido o presente trabalho que está estruturado em 7 capítulos. Após a introdução apresenta-se a revisão da literatura com assuntos como parâmetros superficiais, área real de contato, modelo de contato, conceito de atrito e crescimento de junções. O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho e o Capítulo 4 contém os Resultados e Discussões. Finalmente é apresentado o Capítulos 5, com as conclusões, o Capítulo 6, com Sugestões para Trabalhos Futuros e o Capítulo 7 das Referências.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Atrito

A força de atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo em movimento sobre outro. Esta ampla definição abrange dois casos importantes de movimento relativo: deslizamento e rolamento. A distinção entre atrito por deslizamento e rolamento é útil, mas as duas não são mutuamente excludentes, e apesar de poder existir rolamento ‘puro’, geralmente há algum deslizamento na prática. (HUTCHING, 1992)

A relação entre essa força de atrito (F) e a força normal (W) é conhecida como o coeficiente de atrito, e usualmente denotada pelo símbolo μ

$$\mu = F/W \quad \text{Eq.1}$$

É importante reconhecer que a equação 1 é uma definição e não uma lei ou um modelo de atrito. A equação simplesmente define a proporcionalidade entre as duas forças. Em qualquer sistema de deslizamento, especialmente na ausência de lubrificação efetiva, o coeficiente de atrito varia com o tempo de deslizamento.

A grandeza da força de atrito é convenientemente descrita pelo valor do coeficiente de atrito, o qual pode variar numa ampla gama: de 0,001 em um rolamento com força ‘moderada’ até maiores que 10 para metais deslizando, no vácuo. Para a maioria dos materiais comuns em deslizamento no ar, o valor de μ encontra-se na faixa de 0,1 a 1.

Em algumas situações particulares de deslizamento, μ para alguns pares de materiais permanece praticamente constante. Esta observação levou a formulação de duas leis empíricas, Leis do Atrito de Deslizamento, chamadas de leis de Amontons, que as redescobriu em 1699, embora Leonardo da Vinci descrevesse esse fenômeno 200 anos antes. As leis do atrito podem ser indicadas como segue (HUTCHING, 1992):

- A força de atrito é proporcional à força normal.
- A força de atrito é independente da área de contato aparente.

Na Figura 2-1 se mostra o coeficiente de atrito de madeira deslizando sem lubrificação sobre a superfície de um aço. A força normal foi mantida constante, enquanto a área aparente de contato varia em um fator em até 250, e o valor de μ permanece constante.

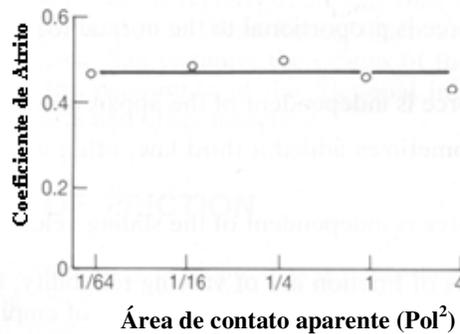


Figura 2-1 Variação do coeficiente de atrito com a área de contato aparente (HUTCHING, 1992).

A estas duas leis adiciona-se uma terceira lei, freqüentemente atribuída a Coulomb (1785)

- A força de atrito é Independente da velocidade de deslizamento. (Para atrito cinético)

Amontons (HUTCHINGS, 1992), em seus experimentos a partir dos quais as leis foram deduzidas, usou muitos metais e madeira, todos lubrificados com gordura de porco. Nestes casos, portanto, o sistema estava sobre condições de lubrificação 'limítrofe'. A primeira lei, contudo, é também freqüentemente obedecida para deslizamento não lubrificado, exceto para polímeros.

Dois tipos de coeficientes de atrito podem ser distinguidos: um que está relacionado com a força de oposição ao início do movimento relativo (movimento iminente), e aquele que está relacionado com a força de oposição à continuação do movimento relativo, uma vez que o movimento já começou e são conhecidos como coeficiente de atrito estático e cinético respectivamente. A força de atrito necessária para iniciar o deslizamento é normalmente maior do que a força necessária para mantê-lo e, portanto, o coeficiente de atrito estático é maior que o coeficiente de atrito cinético.

O coeficiente de atrito é definido na norma ASTM G 40, como "a razão adimensional da força de atrito entre dois corpos e a força normal que está pressionando os corpos". Quando a força de atrito é monitorada continuamente, durante um ensaio de deslizamento, uma curva força-tempo similar à mostrada na Figura 2-2 é produzida. (ASM Handbook VOL 18, 1992)

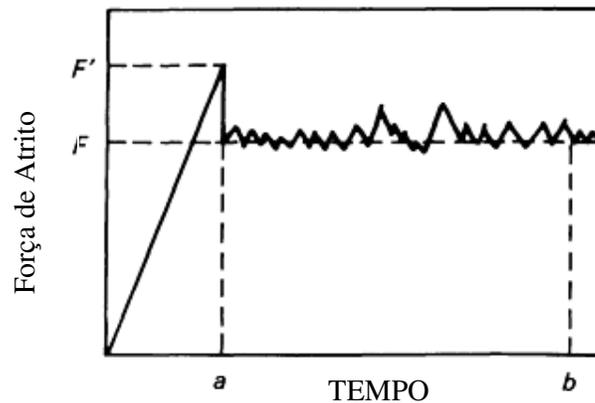


Figura 2-2 Curva típica da evolução da força de atrito com o tempo.

A força F' atingida no início do ensaio e mostrada na Figura 2-2, é usada para calcular o coeficiente de atrito estático. O coeficiente de atrito é característico de um sistema tribológico, mas não é característico do material. Como consequência da mudança nos parâmetros do sistema tribológico se obtém valores diferentes no coeficiente de atrito estático.

O atrito estático também foi estudado por POLICARPOU e YU (2004) que simularam o contato em um sistema microeletromecânico (MEMS) depositado em polysilícônio usando distribuição Gaussiana e assimétrica. A definição de atrito estático proposto por CHANG *et al* (1988) representado na equação 2 é usado para o cálculo do coeficiente de atrito estático.

$$\mu = \frac{Q}{W} = \frac{Q}{P - F_s} \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo Q a força de atrito necessária para o cisalhamento das junções entre as asperezas em contato, W é a força normal externa, P é a atual força normal de contato e F_s é a

força de adesão total. O modelo é baseado em análise de elementos finitos para um contato elasto-plástico, adesão e deslizamento de intercepção de uma simples aspereza, a qual é incorporada em uma representação estatística da rugosidade da superfície para calcular as forças interfaciais. A assimetria da altura dos picos é descrita usando uma distribuição normalizada tipo Weibull proposta por YU e POLICARPOU (2002 *apud* POLICARPOU e YU 2004).

A Figura 2-3 apresenta a influência da força externa F no coeficiente de atrito estático usando as duas representações de altura de picos.

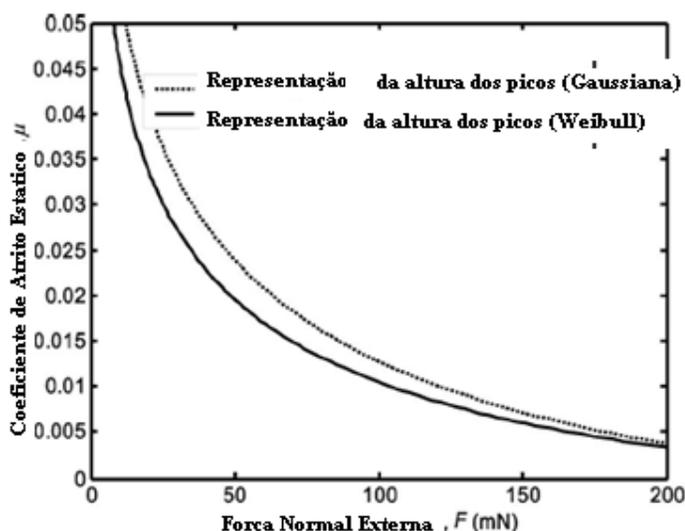


Figura 2-3 Variação do Coeficiente de atrito estático com a força normal externa para o Caso de contato entre duas peças de MEMS depositado em uma superfície de polysilicon POLICARPOU (2004)

Pode-se ver na Figura 2-3 o valor do coeficiente de atrito estático apresenta uma queda na medida em que a força normal externa aumenta, enquanto o valor previsto pela distribuição Weibull assimétrica é sempre menor do que o valor previsto pela distribuição Gaussiana. O erro relativo da distribuição Gaussiana pode ser de até 20% para valores de força menores.

O atrito apresenta componentes microscópicas que fazem parte do valor geral de atrito, algumas de estas componentes serão mencionadas a seguir:

2.2. Componentes microscópicas do atrito

Os mecanismos microscópicos envolvidos, em diferentes graus, na geração de atrito são: (1) Adesão, (2) interação mecânica entre as asperezas das superfícies, (3) arado de uma superfície pelas asperezas da outra, (4) deformação e/ou fratura de camadas superficiais, tais como óxidos e (5) interferência e deformação plástica local causada por três corpos, inicialmente aglomerados de partículas de desgaste, preso entre as superfícies em movimento.

Desaguliers na apresentação para a Royal Society em 1724 (ASM Handbook VOL 18, 1992) introduz o conceito de força coesiva (atualmente chamada de adesão). Desaguliers notou que se duas bolas de chumbo eram pressionadas com um esforço 'leve', elas ficavam juntas e era preciso uma força significativa para separar-las. Desaguliers considerou esta força coesiva como um fenômeno universal e sugeriu que o atrito pode ser atribuído a esta força de adesão.

No ponto de vista da engenharia, alta adesão entre superfícies em deslizamento torna-se importante só para superfícies muito limpas em um alto nível de vácuo. A quantidade de adesão depende da natureza da superfície e sua afinidade com a outra. O coeficiente de atrito também depende das propriedades superficiais do material, porque é onde a deformação se apresenta e o deslizamento ocorre, (ASM Handbook VOL 18, 1992).

Bowden e Tabor (ASM Handbook VOL 18, 1992) dividiram a força de atrito em duas componentes: um termo de arado, F_p , e um termo de adesão, F_a . O termo de arado é devido à energia dissipada na deformação plástica, quando as asperezas interagem uma com outra. Se um metal é mais dúctil do que o outro, as asperezas mais duras produziram estrias visíveis na superfície do material dúctil. A componente de adesão no atrito, F_a , é discutível, devido à dificuldade na medição da força de adesão entre duas superfícies de engenharia 'normais', quando são juntadas em condições 'normais'. Tem sido sugerido que isto pode ser devido a dois fatores:

- Grande parte da superfície está coberta com filmes de óxidos e poucas asperezas são capazes de penetrar este filme e entrar em contato metal com metal, condição necessária para que ocorra adesão.
- Uma região elasticamente deformada varia para uma pequena região deformada plasticamente, que está associada com a adesão de poucos pontos em contato. À medida que a força aumenta, há um alívio elástico sobre esta região, que causa ruptura dos pontos aderidos, conseqüentemente, adesão significativa não é vista em qualquer medida de força.

A deformação plástica pode ser de vital importância mesmo quando a área total de contatos plásticos seja bastante trivial. Os contatos plásticos serão os pontos onde ocorra a condução elétrica e térmica, e também serão regiões de origem de muito atrito.

Continuando com as variáveis microscópicas na seqüência será apresentada uma revisão da rugosidade, medição e alguns parâmetros bidimensionais que serão usados posteriormente no modelo de contato proposto por Greenwood e Williamson.

2.3. Rugosidade

Inicialmente, é interessante esclarecer que a rugosidade, ou o perfil linear de uma superfície que é designado por este nome, é normalmente representado em escalas distintas para a direção vertical e horizontal, isso para evidenciar a mudança do perfil de maior interesse na análise de uma superfície, já que as escalas de variação para dimensões perpendiculares à superfície analisada são, em geral, menores que as dimensões paralelas à superfície. (HUTCHINGS,1992)

Desta forma, como em grande parte das vezes deseja-se saber mais sobre a variação do perfil perpendicular à superfície, é comum ampliar as variações de um perfil de rugosidade nesta direção, e em uma escala menor de ampliação as variações na direção paralela à superfície.

Na Figura 2-4 se apresenta graficamente a ampliação da superfície como resultado do instrumento de medição.

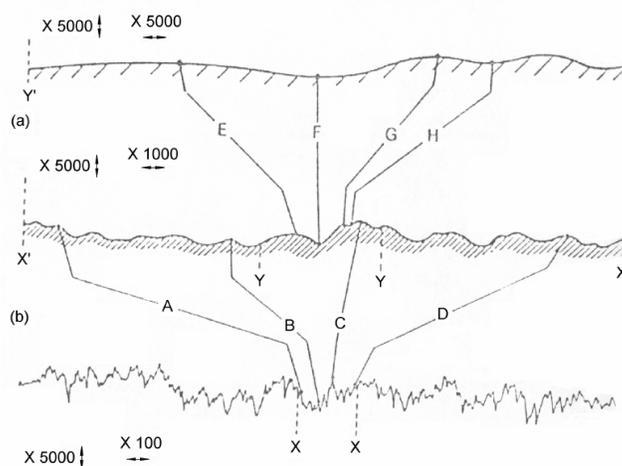


Figura 2-4 Representação da ampliação horizontal de um perfil de Rugosidade (HUTCHINGS,1992)

O perfil da uma superfície é definido pela norma ISO 4287 como o perfil que resulta da interseção da superfície real com um determinado plano, Figura 2-5.

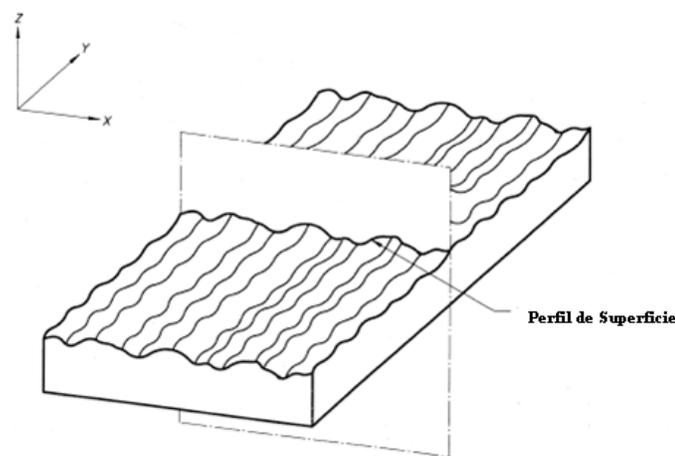


Figura 2-5 Representação gráfica da intercepção do plano com a superfície, que gera o perfil de rugosidade. [ISO 4287]

O anteriormente dito refere-se à rugosidade num sistema 2D, porém, para o estudo de superfícies de natureza isotrópica ou anisotrópica é de fundamental importância o sistema de três dimensões (3D). O objetivo em qualquer caracterização em 3D é integrar as características superficiais da maneira mais próxima possível. Os parâmetros de rugosidade

em duas dimensões (2D) são denotados pela letra R, em quanto que os parâmetros em 3D são denotados com a letra S, (Smith). Embora para as superfícies de natureza anisotrópica seja necessário o estudo em três dimensões, no modelo de contato proposto por G-W usa-se uma combinação de medidas em duas dimensões nos sentidos transversal e longitudinal e é calculado um valor equivalente para cada parâmetro usado no modelo. Devido à importância da rugosidade no modelo, a seguir serão apresentados alguns detalhes da medição da rugosidade em 2D.

2.3.1 Medição de rugosidade em 2D.

A primeira razão para medir uma superfície é conhecer a forma do componente. Como um exemplo, a superfície da pista de um rolamento precisa de um nível de rugosidade que permita reter lubrificante em pequenas quantidades e ao mesmo tempo permitir o deslizamento com um atrito mínimo. Se a superfície é muito rugosa, o desgaste pode se desenvolver rapidamente, se a superfície é muito lisa, podem ocorrer lubrificação inadequada e adesão. Outra razão para medir a superfície é ajustar o processo de manufatura. Através da medida da superfície durante o processo, um operador pode detectar mudanças na superfície e ajustar o processo para se assegurar que o processo permaneceu no limite.

A topografia de uma superfície é criada a partir da combinação de três características. (ASM Handbook VOL 5, 1992)

- Forma da superfície é a forma geral da superfície, desprezando a rugosidade e a ondulação, os quais são causados principalmente por erros na máquina ferramenta e deformação devido a os padrões de esforços no componente. (ASM Handbook VOL 5, 1992)
- Ondulação da superfície refere-se às irregularidades de frequência media sob a superfície na qual a rugosidade da superfície é superposta.

- Rugosidade da superfície refere-se às irregularidades de alta frequência sob a superfície causada pela interação da microestrutura do material e a ação da ferramenta de corte.

Um dos métodos mais comuns para avaliação da topografia da superfície é o perfilômetro de contato. Uma agulha fina é arrastada de forma suave e constante em toda a superfície em análise. Como o deslocamento da agulha sobre a superfície é de sobe e desce, esse deslocamento vertical é convertido por um transdutor como um sinal elétrico, que é amplificado e representado num gráfico.

A representação gráfica do perfil da superfície gerada pelo perfilômetro difere da forma original da superfície por vários motivos. A maior diferença é devido às diferentes ampliações usadas pelo instrumento na direção vertical e horizontal (Fig. 2-10). A extensão vertical das irregularidades na superfície é geralmente mais baixa que a escala horizontal.

Como resultados da medição são apresentados valores numéricos que caracterizam a superfície, conhecidos como parâmetros de rugosidade e que serão apresentados na seqüência.

2.3.2 Parâmetros de Rugosidade Bidimensionais

Os parâmetros de rugosidade existentes são valores numéricos resultantes de integrações ou operações matemáticas simples de perfis amostrais de superfícies. Logo, são representações sujeitas a diversos erros de medição e interpretação.

Contudo, sua praticidade é inegável: é extremadamente útil dispor de valores numéricos para comparação e análise da superfície, ou mesmo para separar e classificar superfícies distintas, geradas por diferentes processos de fabricação.

O propósito de usar parâmetros de rugosidade é usar um número que caracterize certo aspecto da superfície e, portanto, eliminar a necessidade de apreciação subjetiva do operador. Não é possível caracterizar a superfície com um simples parâmetro, portanto, a combinação de parâmetros é normalmente usada.

Os parâmetros podem ser separados em quatro tipos básicos:

- Parâmetros de amplitude: são medidas de características verticais da variação da superfície.
- Parâmetros de espaçamento: são medidas do espaçamento das irregularidades ao longo da superfície.

Os seguintes parâmetros de rugosidade: Ra, Rq e Rdq serão descritos sucintamente quanto as suas aplicações e limitações, devido a sua utilidade no modelo de contato proposto por G-W.

2.3.2.1 Parâmetro Ra.

A rugosidade média Ra é o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade da linha média dentro de um comprimento amostral " l_r " ou a integral do valor absoluto da altura do perfil de rugosidade através do comprimento. A Figura 2-6 apresenta a determinação do parâmetro Ra a partir de um perfil de rugosidade idealizado.

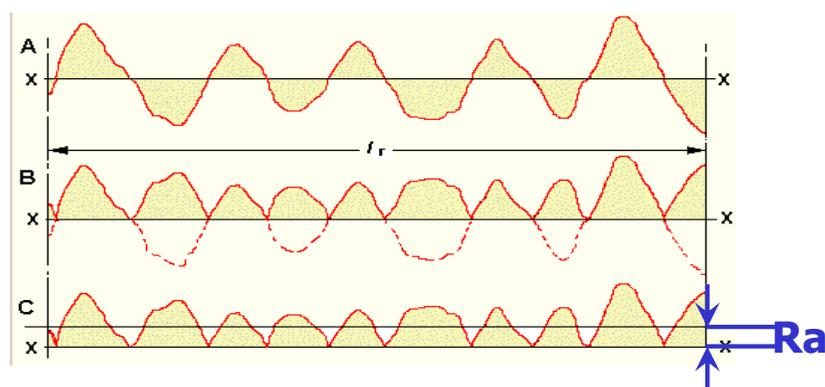


Figura 2-6 Representação gráfica do cálculo de Ra. (The Parameter Tree of Roughness Surface, 2000)

A equação 3 apresenta a definição matemática do parâmetro Ra

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad \text{Eq. 3}$$

$Z(x)$ é a ordenada do perfil de rugosidade. Este parâmetro é muito usado na indústria pela simplicidade e rapidez na sua determinação e porque todos os instrumentos utilizados são relativamente baratos e disponibilizados por todos os fabricantes.

Uma das limitações deste parâmetro é que o mesmo não consegue distinguir o efeito mais acentuado de picos e vales. Isto está apresentado na Figura 2-7, que mostra perfis diferentes, mas que possuem a mesma rugosidade Ra. (ASME B46.1-1995)

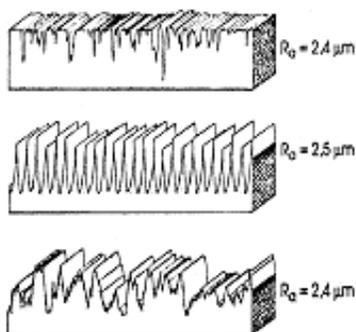


Figura 2-7 Superfícies topograficamente diferentes que apresentam o mesmo valor de Ra.

2.3.2.2 Parâmetro Rq

A rugosidade média Rq é o valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade a partir de uma linha média dentro do comprimento amostral “l”, sendo expressa pela equação 4.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad \text{Eq. 4}$$

O parâmetro Rq é mais sensível a picos e vales e pode ser usado nas mesmas aplicações onde o parâmetro Ra é utilizado. No entanto, quando o perfil obtido é tratado estatisticamente, esse parâmetro equivale ao desvio padrão da distribuição das alturas do perfil, quanto menor Rq mais pontos de contato, ou seja, mais área real de contato para peças com a mesma área nominal.

2.3.2.3 Parâmetro Rdq

O parâmetro Rdq representa a raiz quadrada média da inclinação do perfil, dentro do comprimento de amostragem. A Figura 2-8 apresenta a representação gráfica do parâmetro Rdq.

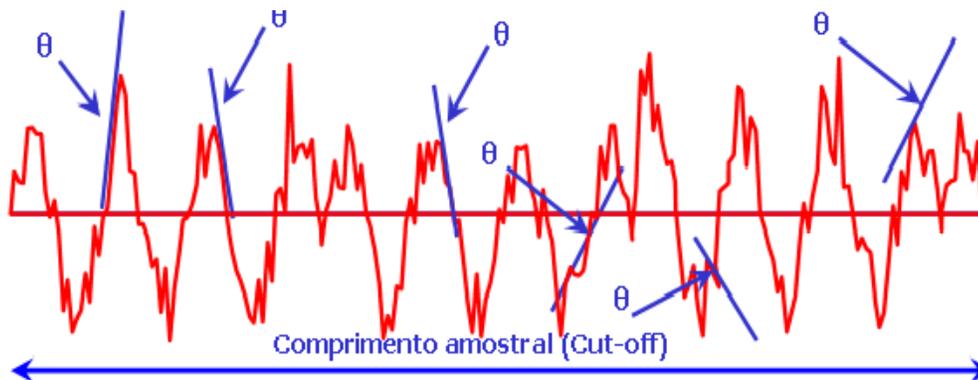


Figura 2-8 Representação gráfica do cálculo de Rdq. (The Parameter Tree of Roughness Surface, 2000)

A inclinação é um parâmetro muito útil e tem estreita correlação com:

Elasticidade da superfície: quanto maior a inclinação maior a chance de deformação após o carregamento.

Desgaste: quanto maior a inclinação maior a taxa de desgaste.

Adesão: Maiores inclinações geram uma melhor superfície a qual resiste ao cisalhamento.

A raiz quadrada média da inclinação é muito sensível a qualquer valor excepcional da inclinação local e, portanto, mais adequado ao analisar superfícies extremamente finas, onde mesmo pequenas mudanças são importantes e precisam ser destacadas. Um valor de inclinação maior gera uma maior área de contato.

2.3.2.4 Parâmetro Assimetria Rsk (Skewness)

Rsk é a medida da simetria do perfil tendo como referência a linha média. Esse parâmetro indica se os pontos na superfície são predominantemente positivos ou negativos, ou se o perfil tem uma distribuição uniforme de picos e vales. Rsk indica a natureza da superfície, produzida pelo processo de fabricação - se ele tem a maioria dos picos, vales ou um equilíbrio entre os dois. A superfície com maior quantidade de picos tem uma assimetria positiva, enquanto a predominância de vales significa uma assimetria negativa.

2.3.2.5 Parâmetro Kurtosis Rku

Rku é um parâmetro que está relacionado com a distribuição da superfície. Se a curva da distribuição da amplitude tem uma forma equilibrada o valor de Rku é aproximadamente 3. Uma superfície irregular gera um valor inferior a 3 e uma superfície pontiaguda gera um valor superior a 3. Na Figura 2-9 se apresenta 3 exemplos de superfícies com diferentes Rku.

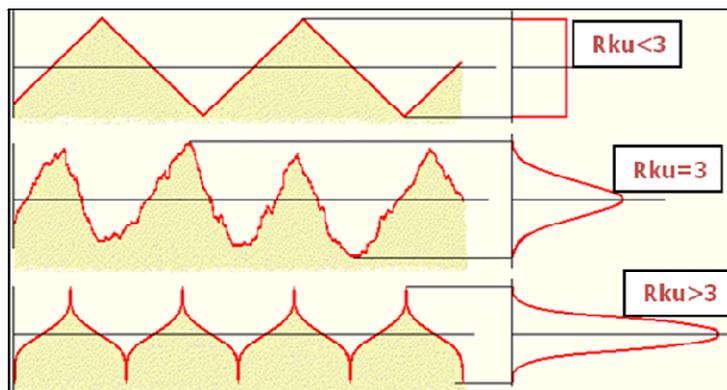


Figura 2-9 Variação do parâmetro Rku com a forma da superfície.
(The Parameter Tree of Roughness Surface, 2000)

O parâmetro Rku é geralmente utilizado em conjunto com Rsk (skewness) para monitorar o desgaste. A eficácia de óleos lubrificantes e aditivos pode ser monitorada com a mudança do perfil da superfície por longos períodos.

2.4. Contato entre superfícies

Quando duas superfícies planas e paralelas são colocadas em contato apenas por meio de sua força peso, e considerando que a mesma não seja suficiente para ultrapassar a tensão de escoamento, o contato inicial ocorre só em poucos pontos (Figura 2-10). Quando a força normal é aumentada, a aproximação das superfícies é maior e uma grande quantidade de asperezas entra em contato.

Uma vez que estas asperezas forneçam os pontos em que a superfície esteja em contato, elas são as responsáveis para suportar a força normal na superfície e por gerar qualquer força tangencial que atue entre as mesmas. O entendimento da forma que interagem as asperezas de duas superfícies carregadas é essencial para qualquer estudo de atrito ou desgaste.

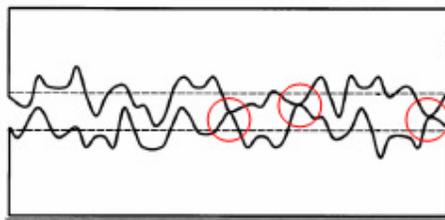


Figura 2-10 Pontos de contato de superfícies rugosas (ADAPTADO A. POLYCARPOU et al 2004)

Para o cálculo de atrito ter sentido é preciso pelo menos dois corpos interagindo. O sistema de análise para o estudo da transformação das entradas em saídas úteis tecnologicamente na tribologia é conhecido como tribossistema. A Figura 2-11 apresenta os elementos que devem ser identificados num tribossistema.

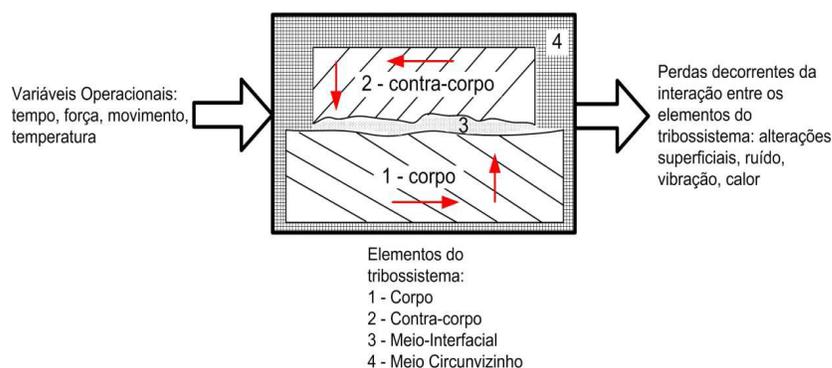


Figura 2-11 Variáveis presentes num tribossistema.

Os elementos do tribossistema são definidos da seguinte forma:

Corpo : elemento do tribossistema que é o objetivo de estudo.

Contra-corpo: elemento com força e movimento relativo em relação ao corpo.

Meio interfacial: elemento sólido, líquido ou gasoso presente entre o corpo e contra-corpo.

Meio circunvizinho: ambiente que envolve o corpo e contra-corpo.

Depois de conhecer alguns dos parâmetros principais na caracterização de uma superfície e visando esclarecer o que acontece nas superfícies em contato, será apresentado a seguir, o modelo de contato ao nível microscópico proposto por Greenwood e Williamson, (1966), que supõe uma distribuição estatística para a representação dos picos da superfície, é apoiado na teoria de Hertz e que chamaremos de modelo de G-W.

2.5. Modelo de Greenwood e Williamson (G-W)

GREENWOOD e WILLIAMSON (1966) desenvolveram um dos primeiros modelos de contato de superfícies reais que especificamente representam a natureza aleatória ou estocástica de fenômenos interfaciais. O modelo de microcontato aplicado para uma superfície rugosa e uma superfície lisa, que é facilmente adaptado para o caso de duas superfícies rugosas é baseado nas seguintes simplificações:

- As asperezas têm forma esférica na parte mais alta, com raio constante R , independentes de sua altura.
- As asperezas são mecanicamente independentes, ou seja, a carga que elas suportam depende de sua altura e não da carga suportada pelas asperezas vizinhas.
- As asperezas se deformam elasticamente de acordo com a teoria de Hertz entre deflexão, carga e área de contato.
- 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 2-12. A Figura 2-13 mostra a forma assumida pela distribuição de alturas ou função de densidade de probabilidade PDF (Probability Density Function) $f(z_s)$. A função é simétrica com relação a 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 5 é a equação da PDF.

$$f(z_s) = \frac{1}{\sigma_s(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{z_s^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad \text{Eq. 5}$$

Portanto, a probabilidade que um pico selecionado aleatoriamente exceda a altura d é representada pela equação 6:

$$P(z_s > d) = \int_d^{\infty} f(z_s) dz_s \quad \text{Eq. 6}$$

Esta integração não pode ser realizada de forma fechada. Felizmente, o cálculo pode ser relacionado às áreas sob a curva normal padrão tabulados cuja média é 0 e o desvio padrão é 1.

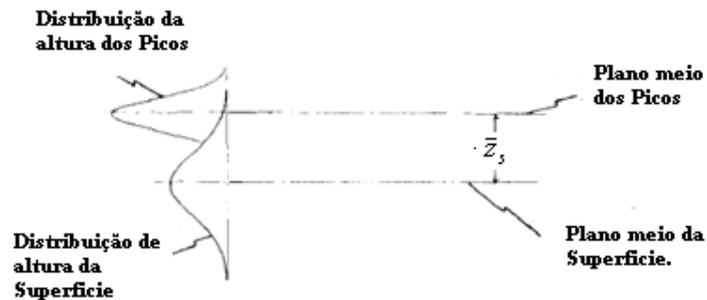


Figura 2-12 Planos meios e distribuição da superfície e os picos.

(McCOOL J.I, 1986)

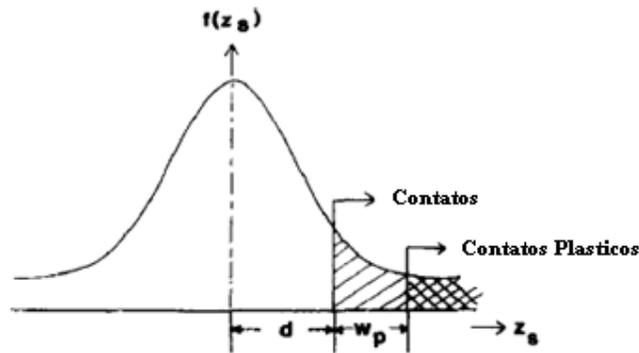


Figura 2-13 Distribuição de alturas dos picos. (McCOOL 1986)

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 7.

$$P(z_s > d) = \int_{d/\sigma_s}^{\infty} \phi(x) dx = F_0\left(\frac{d}{\sigma_s}\right) \quad \text{Eq. 7}$$

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 0 até 4, são apresentados na Tabela 1, na segunda coluna. 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 meio da superfície rugosa e o plano meio da superfície plana são separados por uma distancia d , a equação 8 da a probabilidade de que selecionando um pico aleatoriamente esteja em microcontato:

$$P(z_s > d) = F_0\left(\frac{d}{\sigma_s}\right) \quad \text{Eq. 8}$$

Tabela 1 Valores das Funções de distribuição normal padronizada (McCool)

t	$F_0(t)$	$F_1(t)$	$F_{3/2}(t)$
0.0	0.5000	0.3989	0.4299
0.1	0.4602	0.3509	0.3715
0.2	0.4207	0.3069	0.3191
0.3	0.3821	0.2668	0.2725
0.4	0.3446	0.2304	0.2313
0.5	0.3085	0.1978	0.1951
0.6	0.2743	0.1687	0.1636
0.7	0.2420	0.1429	0.1363
0.8	0.2119	0.1202	0.1127
0.9	0.1841	0.1004	0.9267×10^{-1}
1.0	0.1587	0.8332×10^{-1}	0.7567×10^{-1}
1.1	0.1357	0.6862×10^{-1}	0.6132×10^{-1}
1.2	0.1151	0.5610×10^{-1}	0.4935×10^{-1}
1.3	0.9680×10^{-1}	0.4553×10^{-1}	0.3944×10^{-1}
1.4	0.8076×10^{-1}	0.3667×10^{-1}	0.3129×10^{-1}
1.5	0.6681×10^{-1}	0.2930×10^{-1}	0.2463×10^{-1}
1.6	0.5480×10^{-1}	0.2324×10^{-1}	0.1925×10^{-1}
1.7	0.4457×10^{-1}	0.1829×10^{-1}	0.1493×10^{-1}
1.8	0.3583×10^{-1}	0.1428×10^{-1}	0.1149×10^{-1}
1.9	0.2872×10^{-1}	0.1105×10^{-1}	0.8773×10^{-2}
2.0	0.2275×10^{-1}	0.8490×10^{-2}	0.6646×10^{-2}
2.1	0.01786×10^{-2}	6.468×10^{-3}	0.4995×10^{-2}
2.2	0.01390×10^{-2}	4.887×10^{-3}	0.3724×10^{-2}
2.3	0.01072×10^{-2}	3.662×10^{-3}	0.2754×10^{-2}
2.4	0.8198×10^{-2}	2.720×10^{-3}	0.2020×10^{-2}
2.5	0.6210×10^{-2}	2.004×10^{-3}	0.1469×10^{-2}
2.6	0.4661×10^{-2}	1.464×10^{-3}	0.1060×10^{-2}
2.7	0.3467×10^{-2}	1.060×10^{-3}	0.7587×10^{-3}
2.8	0.2555×10^{-2}	7.611×10^{-4}	0.5380×10^{-3}
2.9	0.1866×10^{-2}	5.417×10^{-4}	0.3784×10^{-3}
3.0	0.1350×10^{-2}	3.822×10^{-4}	0.2639×10^{-3}
3.2	6.871×10^{-4}	1.852×10^{-4}	0.1251×10^{-3}
3.4	3.369×10^{-4}	8.666×10^{-5}	0.5724×10^{-4}
3.6	1.591×10^{-4}	3.911×10^{-5}	0.2529×10^{-4}
3.8	7.235×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.1079×10^{-4}
4.0	3.167×10^{-5}	7.145×10^{-6}	0.4438×10^{-5}

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 9:

$$n = D_{sum} F_0 \left(\frac{d}{\sigma_s} \right) \quad \text{Eq.9}$$

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 2-14. 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 10:

$$A = \pi R w (z - d) = \pi a^2 \quad z > d \quad \text{Eq.10}$$

Sendo a o raio de contato.

A equação 11 representa a carga correspondente à aspereza:

$$P = \frac{4}{3} E' R^{1/2} w^{3/2} = \frac{4}{3} E' R^{1/2} (z - d)^{3/2} \quad z > d \quad \text{Eq. 11}$$

Na qual,

$$E' = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad \text{Eq. 12}$$

E E_i e ν_i ($i = 1, 2$) 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 13:

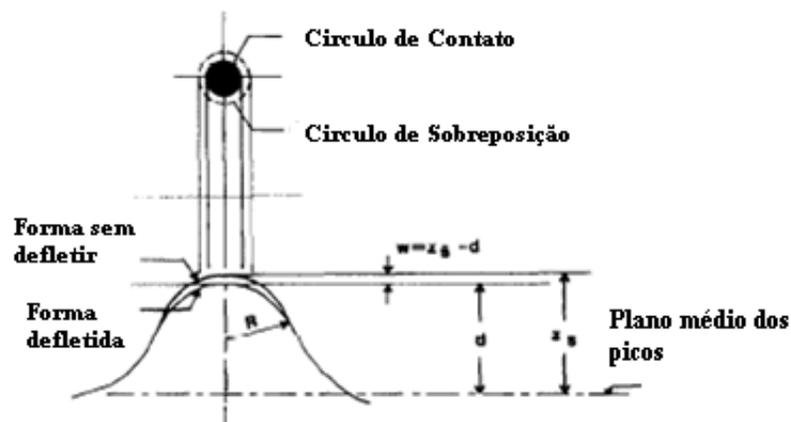


Figura 2-14 Representação Gráfica do contato geométrico nos Picos.

(McCOOL, 1986)

$$p_0 = 1.5 \frac{P}{A} = \frac{2E^*}{\pi R^{1/2}} w^{1/2} = \frac{2E^*}{\pi R^{1/2}} (z-d)^{1/2} \quad \text{Eq. 13}$$

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 14

$$A = \int_d^{\infty} \pi R (z-d) f(z) dz \quad \text{Eq. 14}$$

Substituindo na equação 14 chega-se à equação 15

$$A = \pi R \sigma_s \int_d^{\infty} \frac{x-d}{\sigma_s} \phi(x) dx = \pi R \sigma_s F_1 \left(\frac{d}{\sigma_s} \right) \quad \text{Eq. 15}$$

Sendo $F_1(t)$ a integral

$$F_1(t) = \int_d^{\infty} (x-t) \phi(x) dx \quad \text{Eq. 16}$$

$F_1(t)$ é também apresentado na Tabela 1.

A área total de contato esperada como uma fração da área aparente de contato é obtida como o produto da área de contato média contribuída por uma aspereza por simples seleção aleatória do pico e a densidade dos picos e é representada pela equação 17.

$$\frac{A_c}{A_0} = \pi R \sigma_s D_{SUM} F_1 \left(\frac{d}{\sigma_s} \right) \quad \text{Eq. 17}$$

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:

$$\tau_{\max} = 0.31p_0 \quad \text{Eq. 18}$$

Usando equação 13 tem-se:

$$0.31 \frac{2E(z-d)^{1/2}}{\pi R^{1/2}} > \frac{Y}{2}, \quad \text{Eq. 19}$$

Ou

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

$$z > d + wp$$

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:

$$n_p = D_{SUM} F_0 \left(\frac{d}{\sigma_s} + wp^* \right) \quad \text{Eq. 20}$$

Sendo;

$$wp^* \equiv \frac{wp}{\sigma_s}$$

Ou

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

A relação de contatos plásticos com o numero total de contatos é dada pela equação 21:

$$\frac{n_p}{n} = \frac{F_0\left(\frac{d}{\sigma_s} + wp^*\right)}{F_0\left(\frac{d}{\sigma_s}\right)} \quad \text{Eq. 21}$$

A seguir serão descritos os três parâmetros de entrada do modelo de G-W

Dados de entrada para o modelo de Greenwood-Williamson

O modelo de G-W tem três parâmetros de entrada: R, que é considerado o radio constante do pico esférico, σ_s , o desvio padrão da distribuição de altura dos picos (assumindo Gaussiana), Dsum, a densidade de área dos picos.

Para uma superfície isotrópica, por exemplo, uma esfera, na qual as características da superfície são similares em todas as direções, a densidade de picos, a distribuição conjunta de curvatura e altura e a distância entre o plano médio dos picos e o plano médio da superfície dependem do parâmetro α , conhecido como parâmetro ‘bandwidth’ e é definido pela equação 22 como:

$$\alpha = \frac{m_0 m_4}{m_2^2} \quad \text{Eq. 22}$$

Onde m_0 , m_2 , e m_4 são conhecidos como o momento espectral do perfil de primeira, segunda e quarta ordem e são representados pelas equações 23, 24 e 25 respectivamente. Eles são equivalentes ao quadrado da altura média, a inclinação e segunda derivada de um perfil em uma direção arbitrária, ou seja,

$$m_0 = E(z^2) \quad \text{Eq. 23}$$

$$m_2 = E\left\{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right\} \quad \text{Eq. 24}$$

$$m_4 = E\left\{\left(\frac{d^2z}{dx^2}\right)^2\right\} \quad \text{Eq. 25}$$

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 Rq e a inclinação dos picos $(m_2)^{1/2}$ fazem parte da saída de um perfilômetro de contato.

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

A densidade de picos pode ser definida (L-H *apud* McCool 1987) como:

$$D_{sum} = \frac{m_4}{6\pi m_2 \sqrt{3}} \quad \text{Eq. 26}$$

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

$$R = 0.375(\pi / m_4)^{1/2} \quad \text{Eq. 27}$$

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

$$\sigma_s = (1 - 0.8968/\alpha)^{1/2} m_0^{1/2} \quad \text{Eq. 28}$$

Para o cálculo dos momentos espectrais segundo McCool (1987) baseado no espectro do perfil da superfície, que é uma função que diz como as frequências presentes num perfil aleatório contribuem ao perfil geral, é usada a equação 29. O espectro é da forma $S(f) \sim f^{-k}$, onde k é o expoente espectral.

$$m_n = (2\pi)^n \int_{f_1}^{f_2} f^n * s(f) d_f \quad \text{Eq. 29}$$

Resolvendo a equação 29 para $n = 0, 2,$ e 4 e obtemos:

$$\begin{aligned}
 m_0 &= c \ln(f_2 / f_1), k = 1 \\
 m_0 &= [c / (1 - k)] [f_2^{1-k} - f_1^{1-k}], k \neq 1
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 30}$$

$$\begin{aligned}
 m_2 &= c(2\pi)^2 \ln(f_2 / f_1), k = 3 \\
 m_2 &= [c(2\pi)^2 / (3 - k)] [f_2^{3-k} - f_1^{3-k}], k \neq 3
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 31}$$

$$\begin{aligned}
 m_4 &= c(2\pi)^4 \ln(f_2 / f_1), k = 5 \\
 m_4 &= [c(2\pi)^2 / (5 - k)] [f_2^{5-k} - f_1^{5-k}], k \neq 5
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 32}$$

Sendo f_1 a baixa frequência associada com o comprimento de onda do Cut-off do perfil do instrumento de medida e f_2 alta frequência determinada pelos filtros eletrônicos da agulha do instrumento de medida ou o radio finito da agulha.

Sabendo que

$$\begin{aligned}
 R_q &= m_0^{1/2} \\
 \Delta q &= m_2^{1/2}
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 33}$$

Obten-se a seguinte relação

$$R_q / \Delta q = 1 / 2\pi \left\{ \frac{(3-k) (f_2^{1-k} - f_1^{1-k})}{(1-k) (f_2^{3-k} - f_1^{3-k})} \right\}^{1/2}, K \neq 1 \text{ ou } 3
 \tag{Eq. 34}$$

Para valores definidos de f_1 e f_2 mais os valores medidos de R_q e R_{dq} pode-se desenvolver uma equação numerica para k . Com o valor de k determinado, pode-se expressar a relação entre m_4/m_0 ,

$$m_4 = (2\pi)^4 \frac{(1-k)}{(5-k)} \left\{ \frac{(f_2^{5-k} - f_1^{5-k})}{(f_2^{1-k} - f_1^{1-k})} \right\}^* m_0, \quad K \neq 1 \text{ ou } 5 \quad \text{Eq. 35}$$

Com os valores de m_0 , m_2 e m_4 definidos e conhecendo $F_1(d/\sigma_s)$ pode se calcular a fração da área aparente que está em contato, usando a equação 25.

O procedimento é aplicado para superfícies isotrópicas ou anisotrópicas transformada em uma superfície isotrópica equivalente. (MCCOOL 1986)

Quando as duas superfícies são rugosas (Fig. 2-15), superfícies equivalentes são utilizadas, uma superfície lisa e uma superfície rugosa, na qual os valores de m_0 , m_2 , m_4 são combinados das duas superfícies rugosas.

$$\begin{aligned} m_0 &= (m_0)_1 + (m_0)_2 \\ m_2 &= (m_2)_1 + (m_2)_2 \\ m_4 &= (m_4)_1 + (m_4)_2 \end{aligned} \quad \text{Eq. 36}$$

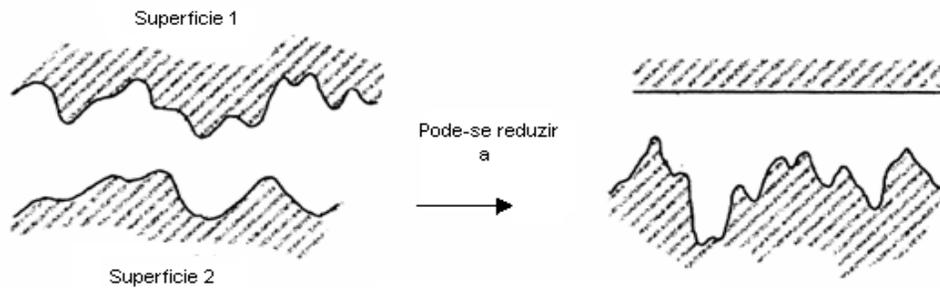


Figura 2-15 Simplificação das duas superfícies rugosas em contato para uma rugosa equivalente e uma superfície lisa. (WHITEHOUSE, 1999)

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 de a média harmônica, como mostra a equação 37.

$$(m_2)_e = (m_{2\max} * m_{2\min})^{1/2} \quad \text{Eq. 37}$$

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 .

Depois do calculo dos momentos espectrais é possível reescrever a equação 17 assim:

$$\frac{A_c}{A_0} = 0.0640(\alpha - 0.8968)^{1/2} F_1\left(\frac{d}{\sigma_s}\right) \quad \text{Eq. 38}$$

Esta equação é representada graficamente a seguir. A Figura 2-16 apresenta a variação de A_c/A_0 com α .

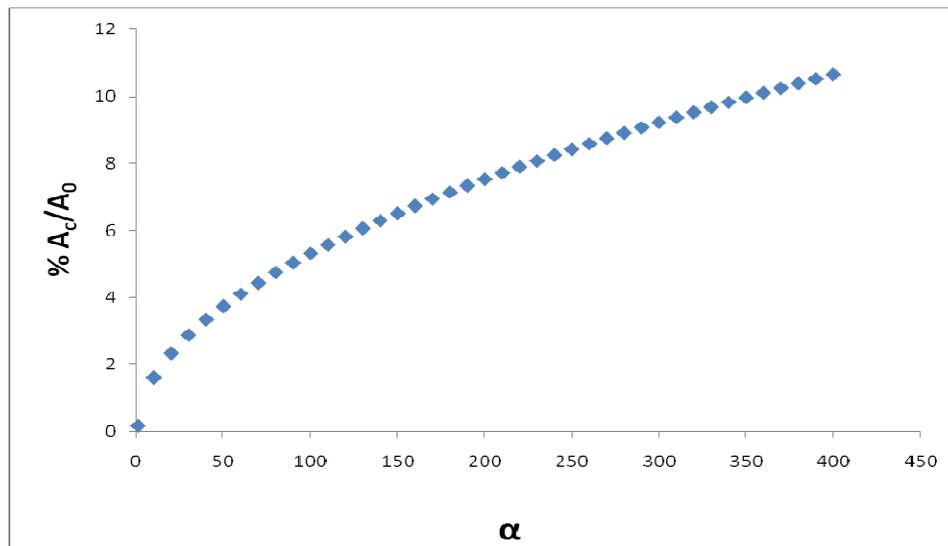


Figura 2-16 Variação de A_c/A_0 com α . Adaptação Eq 42

A equação 38 é resultado da substituição das equações 26, 27 e 28 na equação 17. Os cálculos da Figura 2-16 foram feitos para um valor de $d/\sigma_s = 1$. Na Figura pode-se notar que à medida que α aumenta o valor de A_c/A_0 também aumenta, note-se também que a variação de A_c/A_0 para valores menores de α ($\alpha < 100$) é maior do que para valores maiores de α .

A Figura 2-17 apresenta as distancias representativas nas superficies de contato no modelo proposto por G-W.

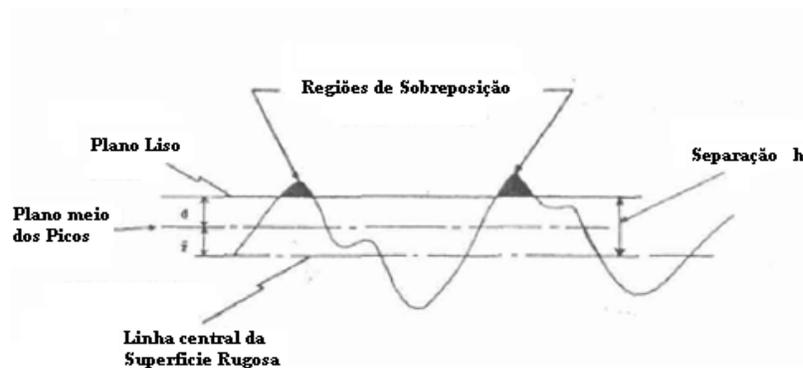


Figura 2-17 Relação entre os planos meios dos picos e a superfície.
(McCOOL, 1987)

Para um dado valor de h (Figura. 2-17) conhecido, temos que a distancia 'd' pode ser encontrada utilizando a equação 39

$$d = h - \bar{z}_s \quad (x) \quad \text{Eq. 39}$$

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

$$\bar{z}_s = 4(m_0 / \pi\alpha_{GW})^{1/2} \quad \text{Eq. 40}$$

Obtendo o valor de d é possível calcular o parâmetro $t = d / \sigma_s$ que é o parâmetro de entrada na Tabela 1 para assim obter os valores de F_0 , F_1 e $F_{3/2}$.

Um critério para determinar a natureza do contato entre uma superfície lisa e uma rugosa é o índice de plasticidade, definido por Greenwood e Williamson (1966) e que é mostrado na Eq. 41:

$$\psi = \frac{E'}{H} \sqrt{\frac{\sigma}{\beta}} \quad \text{Eq 41}$$

Sendo H a dureza da superfície rugosa, σ o desvio padrão da distribuição da altura das asperezas e β o raio das pontas das asperezas. O índice de plasticidade combina

propriedades mecânicas (E' e H) com propriedades da superfície (σ e β). G-W encontraram que enquanto ψ varia entre 0.1-100 para superfícies reais, na prática cai a uma faixa estreita. Tipicamente, se $\psi > 1$, há um fluxo plástico significativo; se $0.6 > \psi > 1$, há deformação elástica e plástica, e se $\psi < 0.6$ o fluxo plástico é improvável.

O parâmetro α descrito no modelo de G-W foi usado por POLYCARPOU (2004) relacionando-o com parâmetros superficiais como a assimetria, kurtosis, raio das asperezas, entre outros.

A Figura 2-18 apresenta a altura média dos picos (Z_s) que varia com a função densidade de probabilidade ($F(Z_s)$) para diferentes valores de α .

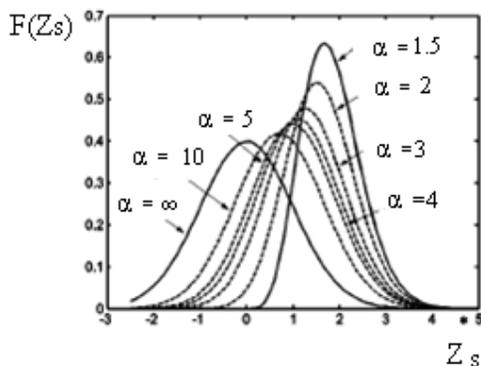


Figura 2-18 Densidade de probabilidade das alturas de picos. NAYAK (1971 APUD POLICARPOU et al 2004)

Na Figura 2-19 apresenta a variação dos parâmetros R_{sk} e R_{ku} com α .

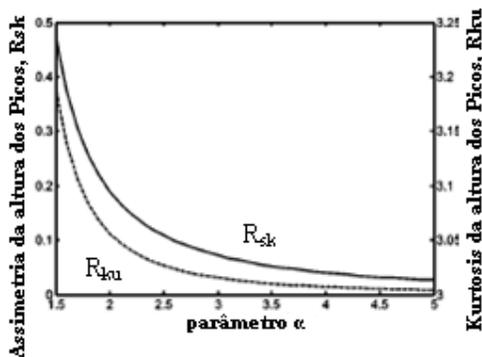


Figura 2-19 Predição analítica de Assimetria e Kurtosis das alturas dos picos. Policarpou (2004)

As Figuras 2-18 e 2-19 mostram que à medida que o parâmetro α aumenta, a superfície passa a ter características de uma distribuição Gaussiana. A distribuição centra-se em zero (Fig. 2-18), a assimetria (R_{sk}) e a Kurtosis (R_{ku}) tende a zero e a três respectivamente.

Após apresentar definições de atrito e algumas teorias que estudam fenômenos presentes na interface das superfícies em contato, serão apresentados vários parâmetros que influenciam o coeficiente de atrito estático.

2.6. Parâmetros que influenciam o coeficiente de atrito estático.

Dentro os parâmetros que influenciam o atrito estático têm a carga, processos de usinagem e propriedades do material.

PASLAY e PLUNKETT (1953 *apud* CHANG *et al* 1988) estudaram o efeito da carga de contato e a qualidade da superfície sobre o coeficiente de atrito estático, foi encontrado que para superfícies mais rugosas o coeficiente de atrito estático é baixo e para uma superfície rugosa dada o coeficiente de atrito decresce quando a pressão de contato incrementa.

HABIB (2007) também testou a influência da carga normal. Neste estudo, foi examinado o comportamento do atrito estático de quatro termoplásticos de engenharia. Na Figura 2-20 e 2-21 se apresenta os resultados do efeito da carga normal sobre o coeficiente de atrito estático para os termoplásticos estudados em contato com alumínio e aço respectivamente.

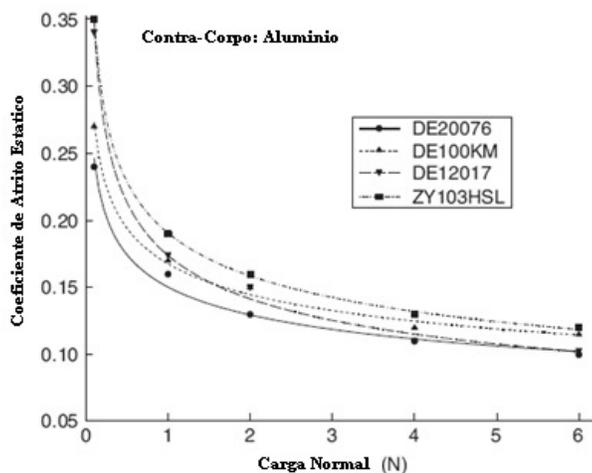


Figura 2-20 Efeito da carga normal sobre o coeficiente de atrito estático com contra-corpo de alumínio.

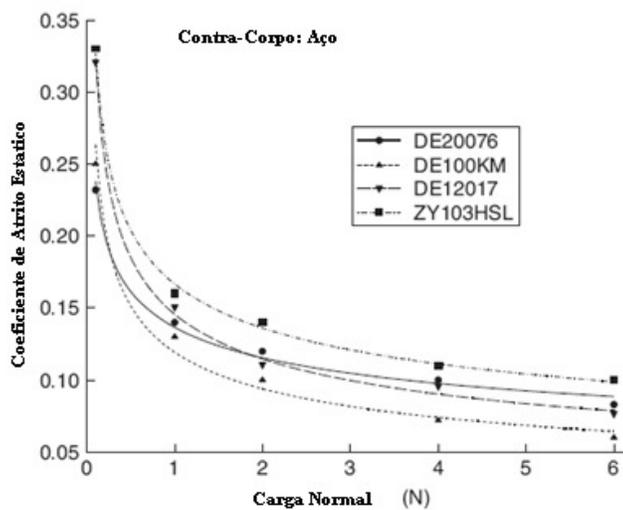


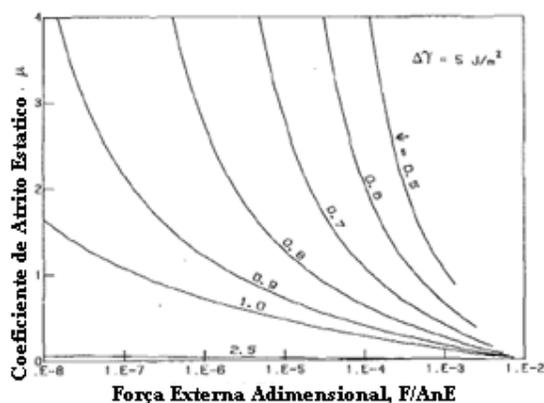
Figura 2-21 Efeito da carga normal sobre o coeficiente de atrito estático com contra-corpo de Aço.

Nos ensaios feitos com contra-corpo de aço a queda no primeiro aumento de carga foi maior do que para os ensaios com contra-corpo de alumínio, por exemplo, pode-se ver que quando a carga é 1N os valores de coeficiente de atrito estático são maiores quando foi usado contra-corpo de alumínio.

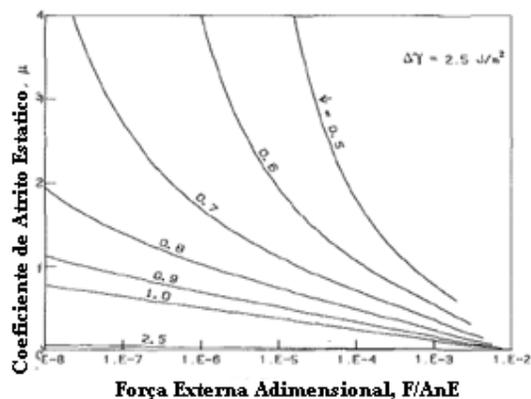
Como conclusão do trabalho se tem que o atrito estático varia com o tipo de plástico, e decresce acentuadamente com o aumento em cargas baixas, depois, permaneceram praticamente constantes.

Outra contribuição no estudo do atrito em função da carga foi fornecida por CHANG *et al*, (1988), os resultados são apresentados na Figura 2-22, além da carga foram estudados o índice de plasticidade (ψ) em uma faixa entre 0.5-2.5 e a energia de superfície ($\Delta\gamma$). Nos resultados é dividida a carga por a área nominal de contato (A_n) e o modulo de Young (E), e assim obter uma força adimensional.

a)



b)



c)

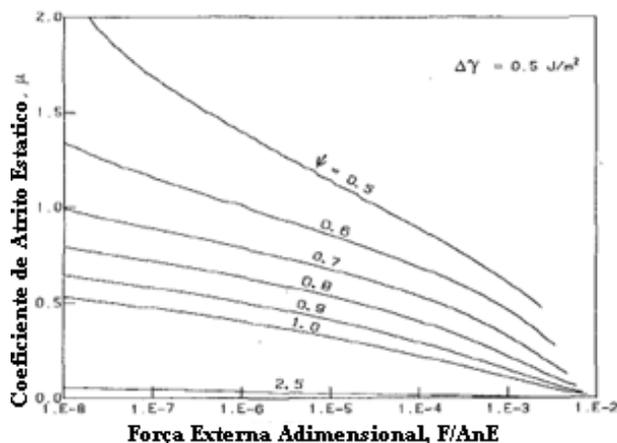


Figura 2-22 Variação do coeficiente de atrito estático com a Força externa e o índice de plasticidade. a) variação do coeficiente de atrito com uma energia superficial de 5J/m^2 . b) variação do coeficiente de atrito com uma energia superficial de 2.5J/m^2 . c) variação do coeficiente de atrito com uma energia superficial de 0.5J/m^2 .

Os resultados mostram que para uma força externa dada o coeficiente de atrito estático incrementa quando o índice de plasticidade decresce (superfícies duras e lisas), e quando a energia de superfície incrementa (superfícies limpas).

Para um dado índice de plasticidade o coeficiente de atrito estático decresce quando a força externa incrementa.

O incremento na energia de superfície leva a um incremento na força de adesão, e conseqüentemente o coeficiente de atrito estático. Por outro lado, altos índices de plasticidade (superfícies macias e rugosas) significam um grande desvio padrão das alturas das asperezas e raios pequenos. Para altos índices de plasticidade mais asperezas são deformadas plasticamente. (CHANG *et al.* 1987), então uma força tangencial baixa pode ser suportada antes do início do deslizamento. Pequenos raios de asperezas e/o baixa energia de superfície levam a uma queda na força de adesão. Conseqüentemente uma queda no coeficiente de atrito estático.

Quando a separação dos corpos decresce devido à aplicação de uma força externa, a relação do número de asperezas deformadas plasticamente e as asperezas deformadas elasticamente incrementa. A carga de contato incrementa mais rapidamente que a força

tangencial e a força de adesão tornam-se depreciável comparada com a carga de contato. Por isso, o coeficiente de atrito estático decresce quando a força externa aumenta. Quando as superfícies são fortemente carregadas mais asperezas estão em contato plástico e a força tangencial permissível é menor comparada com a carga de contato. Por isso, o coeficiente de atrito estático torna-se muito pequeno.

Continuando com a influência das propriedades RABINOWICZ (1971 *apud* CHANG *et al* 1988) avaliou o coeficiente de atrito estático de 210 combinação de vários metais abarcando uma grande gama de energias de superfície e valores de dureza. Foi mostrado que os valores do coeficiente de atrito obtidos com combinações que incluem índio, o qual é um metal extremadamente dúctil, são maiores do que os obtidos com outros metais. Isto foi atribuído à maior razão de energia de superfície sobre a dureza, característica de metais dúcteis.

As influências do processo de usinagem e o ângulo inicial das asperezas em aço no coeficiente de atrito foram estudados por GHABRIAL E ZAGHLOOL (1974), os resultados apresentados na Figura 2- 23 mostram uma relação direta entre o coeficiente de atrito estático e o ângulo inicial das asperezas, na medida em que o ângulo das asperezas aumenta o coeficiente de atrito também apresenta um aumento e dependendo do processo na superfície o coeficiente de atrito também apresenta valores diferentes. Os processos estudados foram torneamento (shaping, SH), fresado (milling, M), retifica (grinding, G), lapidação (lapping, LP) e polimento (polishing, PO), tendo como parâmetro de controle, o parâmetro superficial Ra.

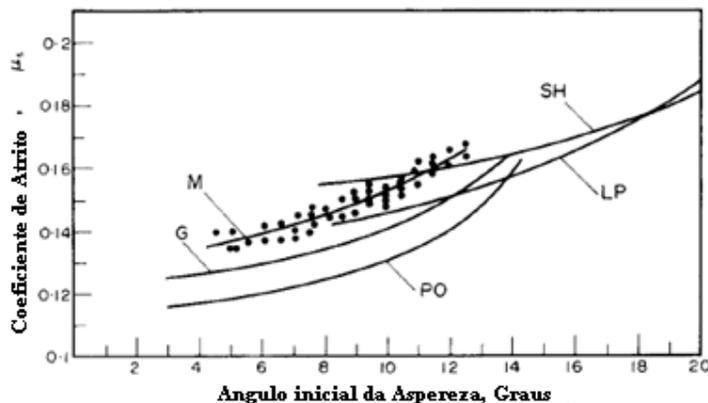


Figura 2-23 Variação do Coeficiente de atrito com o ângulo inicial das asperezas para diferentes processos de usinagem

Na Figura 2-24 se apresenta a influência do parâmetro de rugosidade Ra no coeficiente de atrito para dois processos, a relação entre Ra e o coeficiente de atrito é linear.

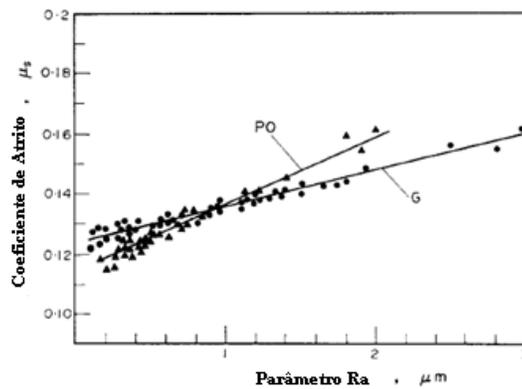


Figura 2-24 Variação do Coeficiente de atrito com Ra para diferentes processos de usinagem.

Deste resultado pode-se fazer uma transição para o uso de parâmetros de rugosidade em área de contato.

3. MATERIAIS E METODOS

Para determinar a influência do acabamento superficial e propriedades mecânicas no coeficiente de atrito estático de um aço H13 foram feitos ensaios de plano inclinado sob peças tratadas termicamente e retificadas.

Sabendo que o coeficiente de atrito estático é a variável que representa a proporcionalidade entre a força de atrito estático e a força normal, e fazendo somatório de força no sistema de plano inclinado tem-se que, o coeficiente de atrito estático é representado pela tangente do ângulo de deslizamento iminente. A Figura 3.1 apresenta um esquema do plano inclinado e as forças atuantes no corpo de prova.

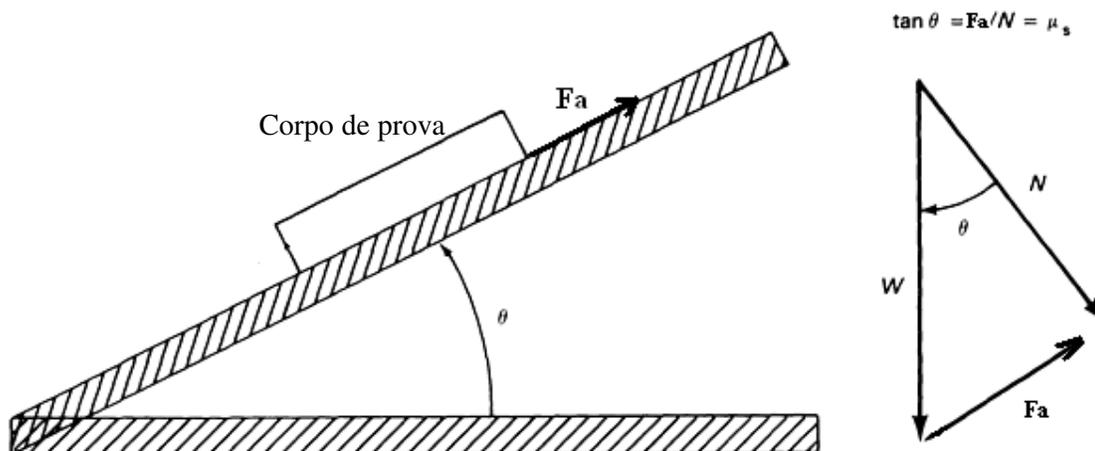


Figura 3-1. Esquema do plano inclinado e análise de forças usadas para cálculo do coeficiente de atrito estático

3.1. Ensaio de plano inclinado

Como citado anteriormente, para o cálculo de atrito estático foram feitos ensaios de plano inclinado. A Figura 3-2 apresenta o equipamento localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), composto de uma placa superior, na qual se posiciona o sistema tribológico. O movimento desta placa é acompanhado por um dispositivo eletrônico que mede o ângulo a partir da horizontal. O movimento da placa superior é

transmitido através de polias sincronizadas desde um motor de passo situado na última placa, que será chamada de placa base. A finalização do ensaio é quando o corpo de prova é deslocado da posição original, sendo que o movimento é detectado por um sensor a laser que comanda a parada do ensaio. A partir disso, pode ser feita a medição do ângulo atual e o cálculo do coeficiente de atrito estático.

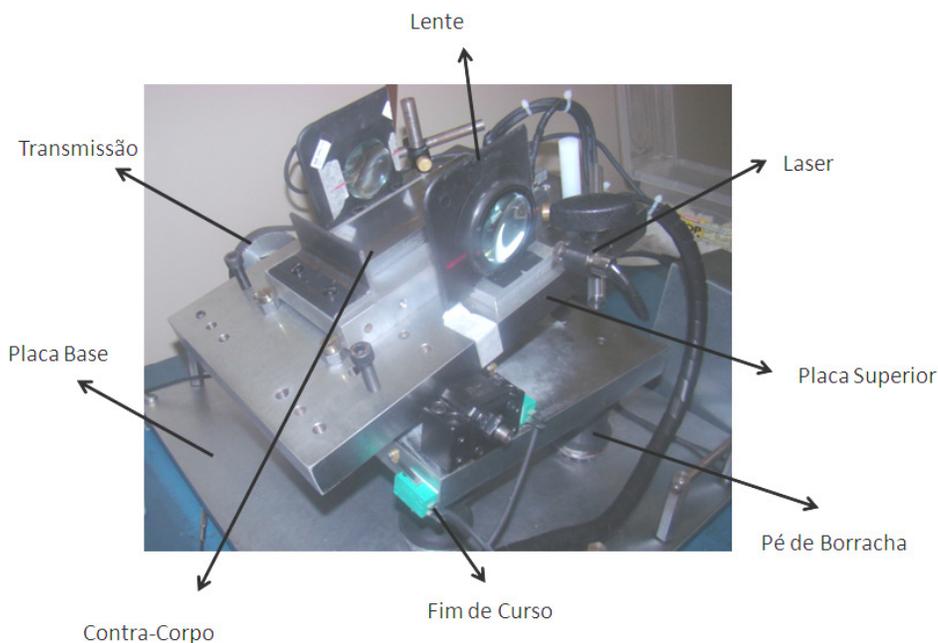


Figura 3-2 Equipamento para ensaio de atrito estático de plano inclinado

Os parâmetros de ensaios e seus respectivos valores foram determinados em ensaios preliminares e são descritos a seguir:

- i. Taxa de inclinação: 0,33 °/s.
- ii. Meio interfacial: a seco
- iii. Numero de ensaios: 10 Ensaios/Peça
- iv. Meio Ambiente: 22°C e Umidade relativa de 65%
- v. Morfologia do contato: contato do tipo conforme, típico de peças planas.
- vi. Tempo de lavagem: os tempos de lavagem e secagem foram 15 min. e 1 min. respectivamente.

vii. Área nominal de contato: 707 mm^2

Os parâmetros da norma mais próxima encontrada na literatura são apresentados a seguir:

ASTM D4518-90 - Standard Method for Measuring Static Friction of Coatings Surfaces

Parâmetros: Massa do corpo de prova = 820 g

Área de contato = $75 \times 75 \text{ mm}^2 = 5.625 \text{ mm}^2$

Resolução angular = $0,5^\circ$

Temperatura de ensaio = $23 \pm 2^\circ\text{C}$

Taxa de inclinação = $1,5 \pm 0,5^\circ/\text{s}$

Ensaio a seco com indicação de temperatura e umidade relativa.

Fazer a média de três medidas.

A força normal em cada corpo de prova só depende do peso do mesmo, na Tabela 2 são apresentadas as massas e a força normal aplicada, calculada a partir da massa.

Tabela 2. Massa e força normal máxima das amostras ensaiadas para cada temperatura de revenimento.

	Peça 1		Peça 2		Peça 3		Peça 4		Peça 5	
	g	N	g	N	g	N	g	N	g	N
540	65,093	0,6379	65,093	0,6379	65,12	0,6381	65,757	0,6444	65,075	0,6377
600	66,048	0,6472	65,597	0,6428	65,327	0,6402	64,92	0,6362	65,527	0,6421
640	65,527	0,6421	65,406	0,6409	65,514	0,6420	64,966	0,6366	65,432	0,6412

Os ensaios foram feitos em duas direções de deslizamento, transversal e paralela aos riscos da retificação, visando observar o efeito da anisotropia da superfície no coeficiente de atrito estático. A Figura 3-3 apresenta uma visão geral do acabamento superficial dos corpos de prova.

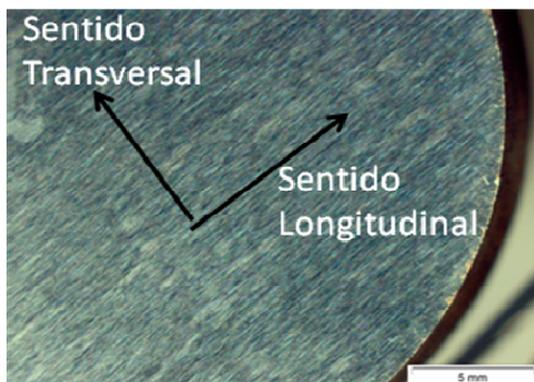


Figura 3-3 Corpo de prova para ensaios de atrito estático mediante plano inclinado.

Após o processo de lavagem e secagem, os corpos-de-prova foram posicionados um a um, sendo realizados 5 ensaios para cada direção. Para a aquisição dos dados foi usado o software labview. Na Figura 3-4 é apresentado o sistema tribológico na placa móvel do ensaio. Dos cinco ensaios feitos em cada direção, foram utilizados três resultados, foram descartados os valores de atrito maior e menor, ou seja, dos dez resultados obtidos por peça, utilizaram-se seis valores de atrito, o descarte de valores foi feito segundo a teoria de intervalos de tolerância, os valores que tiverem uma diferença maior a um desvio padrão foram descartados.



Figura 3-4 Corpo de prova e contra-corpo ensaiados

3.2. Preparação de corpos-de-prova

A Figura 3-5 apresenta as dimensões dos corpos-de-prova do aço H13, que foram tratados termicamente para se obter diferenças na dureza.

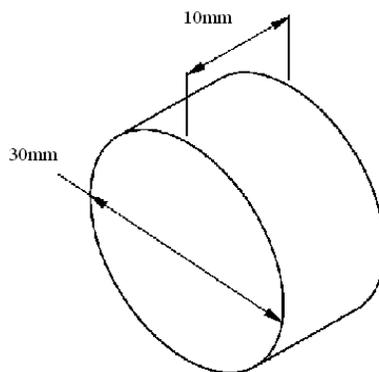


Figura 3-5 Medidas do corpo de prova utilizado para ensaios de atrito estático mediante plano inclinado.

Os tratamentos térmicos feitos foram: têmpera a 1050°C seguido de duplo revenimento de 2h a 540°C, 600°C ou 640°C. Estas temperaturas foram baseadas na curva de revenido apresentada por Smith (1981). O duplo revenimento tem como objetivo, além da diferença nas durezas, garantir uma microestrutura homogênea (mais isenta possível de austenita retida) e assim descartar a influência da mesma nos ensaios. Depois dos tratamentos térmicos, as peças revenidas a 600°C tiveram que ser submetidas a mais 2h de tratamento nesta temperatura, pois a diferença na dureza para as peças revenidas a 540°C não foi significativa.

Os 5 ensaios citados anteriormente foram feitos para cada temperatura de tratamento térmico, no total foram 50 ensaios por tratamento térmico. Todos os corpos-de-prova foram retificados nas mesmas condições, visando assim que o processo de fabricação não fosse uma variável para os ensaios.

A medição de dureza foi feita numa sexta peça de material que acompanhou todo o processo de tratamento para cada temperatura, ou seja, além das cinco peças que foram usadas para os ensaios de atrito cada tratamento teve uma sexta usada para ensaios de dureza e metalografia. A dureza foi feita no durômetro EMCO-TEST universal para medições em

escala Rockwell C. Na Tabela 3 são apresentados os valores médios da dureza obtidos de cinco medições feitas.

Tabela 3 Durezas dos materiais de ensaio.

	540°C	600°C	640°C
HRC	57±2	48±3	41±1

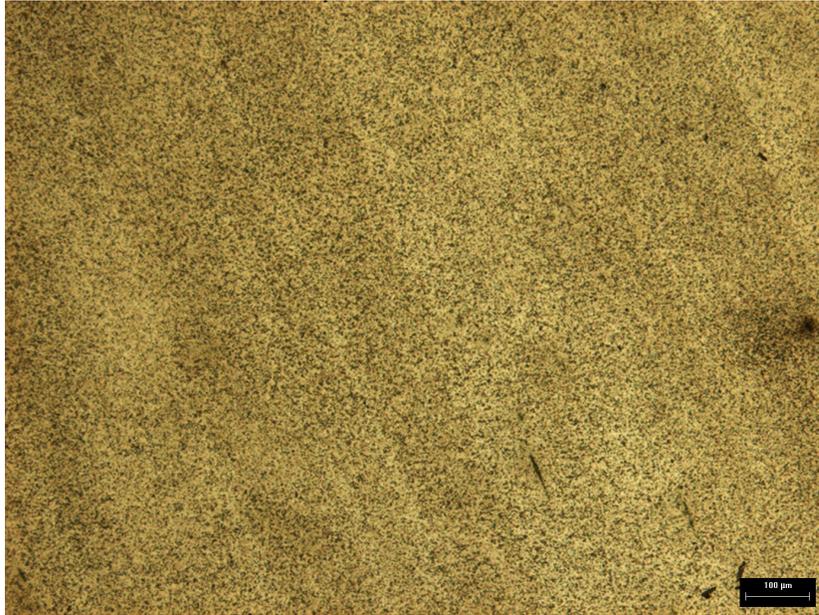
3.3. Análise de corpos de prova

3.3.1. Análise Metalográfica.

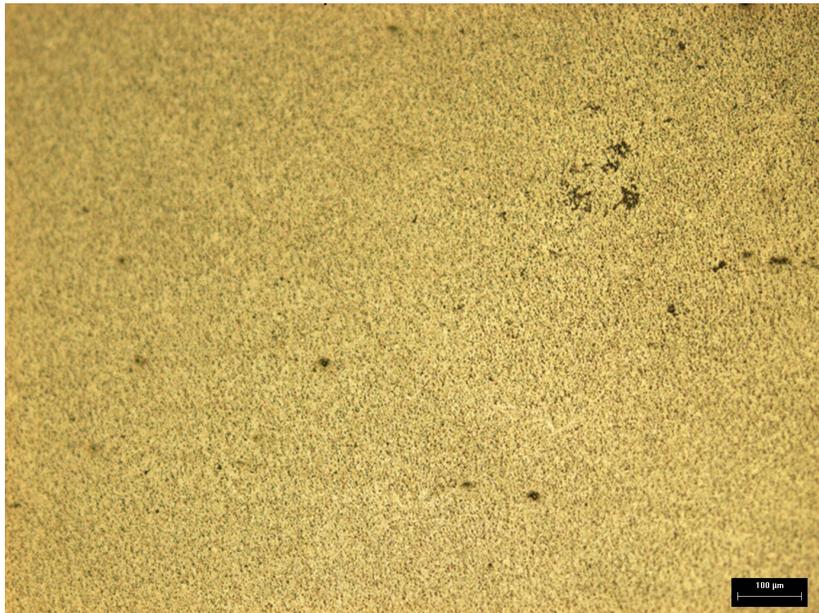
Para a caracterização metalografica do material foram utilizadas as ferramentas do laboratório de metalografia da UTFPR. Para este tipo de material a preparação de amostras metalograficas consistiu em uma preparação inicial com lixas de grana ASTM 220, 320, 400 e 600 respectivamente, seguido de um polimento com alumina de 1 µm. O ataque das amostras para revelar a microestrutura foi Nital 2%.

Na Figura 3-6 são apresentadas as micrografias do H13 após a tempera e os revenimentos.

a)



b)



c)

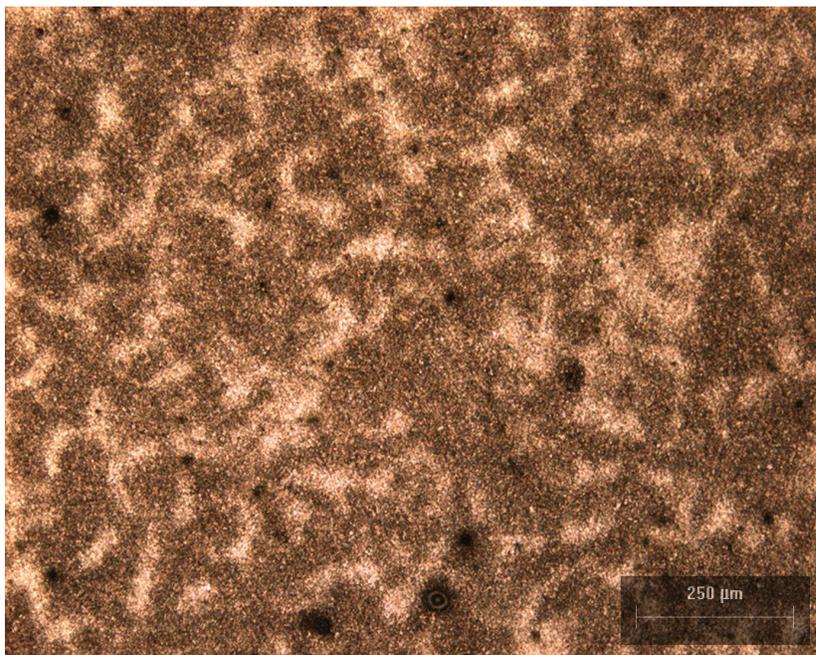


Figura 3-6 Microestrutura resultante após tempera a 1050°C e dois revenimentos. a) Temperatura de revenimento 540°C. b) Temperatura de revenimento 600°C. c) Temperatura de revenimento 640°C

3.3.2. Análise Topográfica

A medição da rugosidade foi feita com o rugosímetro modelo Surtronic 25 da Taylor Hobson da UTFPR com raio do apalpador de 5μm e utilizando comprimento total de medição de 4 mm. Os perfis obtidos foram analisados no Software Talyprofile3.1.10, no qual a rotina de tratamento para obtenção dos parâmetros de rugosidade inclui a remoção do erro de forma e aplicação de um filtro de ondulação com comprimento de 0,8 mm.

Todas as medidas de rugosidade foram feitas nas duas direções de deslizamento do ensaio. Na Figura 3-7 é apresentada a seqüência desde o perfil bruto ate o perfil final depois da remoção dos erros.

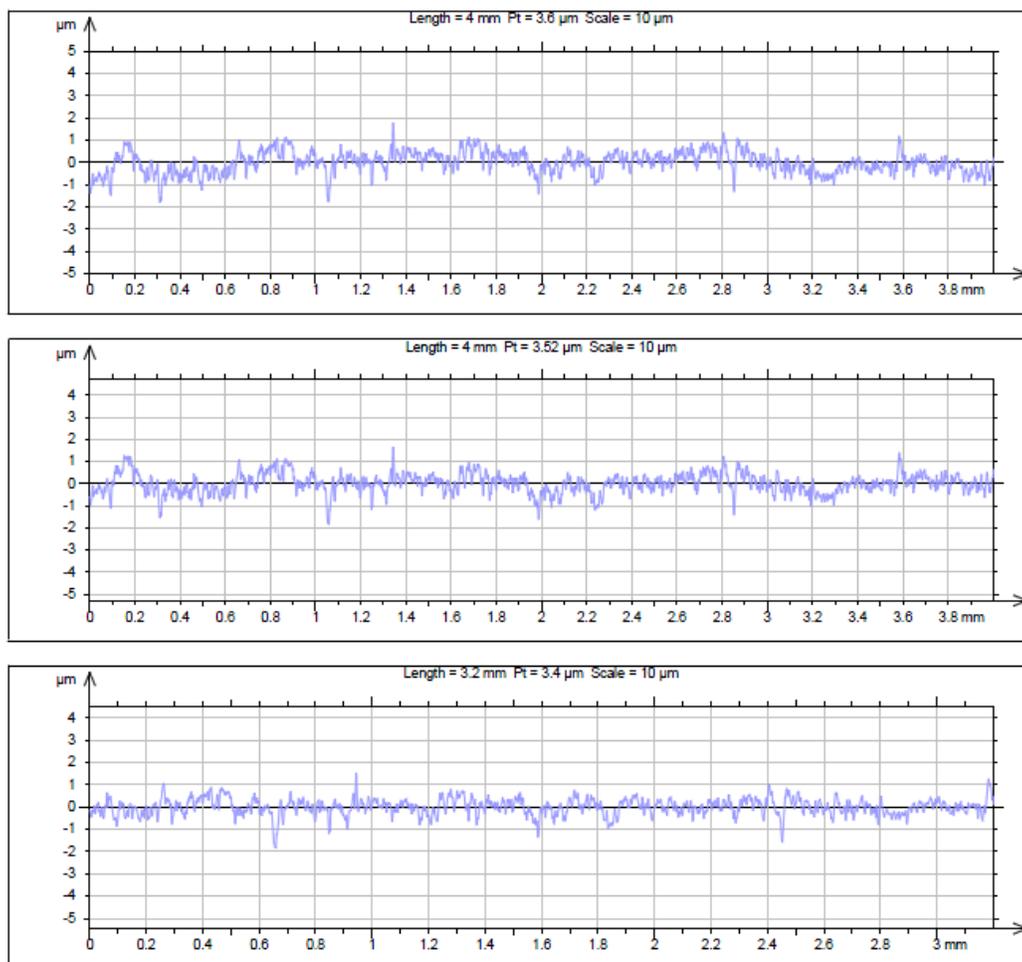


Figura 3-7 Perfis de rugosidade. Seqüência desde o perfil bruto até o perfil 'sem erros', sendo o primeiro perfil o perfil bruto.

Nas Tabelas 4, 5 e 6 são apresentados os parâmetros de rugosidade R_q medido em cada peça e cada tratamento.

Devido à diferença das médias entre cada peça do mesmo tratamento térmico foi feito um teste de hipótese para a diferença de médias. As médias gerais de todas as medidas de R_q foram comparadas com as médias por peça para cada tratamento.

Tabela 4. Parâmetro de rugosidade Rq. Temperatura de revenimento 540 °C

540 °C							
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Media	Desvio
	Rq	Rq	Rq	Rq	Rq	Geral	
	0,383	0,316	0,395	0,246	0,264		
	0,4	0,26	0,322	0,256	0,318	0,31173	0,05766
	0,401	0,306	0,291	0,249	0,269		
Media	0,3947	0,2940	0,3360	0,2503	0,2837		
Desvio	0,0101	0,0299	0,0534	0,0051	0,0298		

Tabela 5 Parâmetro de rugosidade Rq. Temperatura de revenimento 600 °C

600 °C							
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Media	Desvio
	Rq	Rq	Rq	Rq	Rq	Geral	
	0,344	0,289	0,267	0,318	0,254		
	0,265	0,327	0,269	0,332	0,333	0,30193	0,03401
	0,261	0,28	0,318	0,316	0,356		
Media	0,2900	0,2987	0,2847	0,3220	0,3143		
Desvio	0,0468	0,0249	0,0289	0,0087	0,0535		

Tabela 6 Parâmetro de rugosidade Rq. Temperatura de revenimento 640 °C

640 °C							
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Media	Desvio
	Rq	Rq	Rq	Rq	Rq	Geral	
	0,271	0,272	0,264	0,508	0,324		
	0,319	0,422	0,303	0,381	0,325	0,33633	0,06551
	0,313	0,291	0,308	0,374	0,37		
Media	0,3010	0,3283	0,2917	0,4210	0,3397		
Desvio	0,0262	0,0817	0,0241	0,0754	0,0263		

A hipótese nula H_0 e a alternativa H_1 do teste são apresentadas a seguir:

$$H_0: \mu_G = \mu_P$$

$$H_1: \mu_G \neq \mu_P$$

Sendo μ_G a media de todos os dados por temperatura e μ_P a media por peça.

A estatística do teste segue a seguinte equação.

$$t_0 = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - \Delta_0)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Sendo;

$$\bar{x}_1 = \mu_G,$$

S_1 : o desvio padrão associado a μ_G

$$\bar{x}_2 = \mu_P$$

S_2 : o desvio padrão associado a μ_P

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 = \Delta_0$$

Com grau de liberdade v e numero de dados n :

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$$

Para rejeitar a hipótese nula, deve-ser cumprir que:

$$t_0 > t_{\alpha/2, \nu}$$

$$t_0 < -t_{\alpha/2, \nu}$$

A Tabela 7 apresenta os valores de ν , t_0 e $\pm t_{\alpha/2, \nu}$ para cada tratamento térmico. Os valores de $t_{\alpha/2, \nu}$ são achados em qualquer Tabela da distribuição t-student.

Tabela 7. Resultado do teste de hipótese

N° Peça	540			600			640		
	ν	t_0	$\pm t_{\alpha/2, \nu}$	ν	t_0	$\pm t_{\alpha/2, \nu}$	N	t_0	$\pm t_{\alpha/2, \nu}$
1	5	-5,186	-2,015	2	0,420	2,92	6	1,558	1,943
2	5	0,778	2,015	4	0,194	2,132	3	0,160	2,353
3	3	-0,709	-2,353	3	0,916	2,353	6	2,040	1,943
4	4	4,045	2,132	6	-1,983	-1,943	3	-1,812	-2,353
5	5	1,233	2,015	2	-0,386	-2,92	6	-0,147	1,943

Com os dados da Tabela 7 pode-se concluir que a hipótese nula é rejeitada para as peças 1 e 4 no caso da temperatura de revenimento de 540°C, a peça 4 para 600°C e a peça 3 para 640°C, para os dados restantes pode se concluir com um nível de significância de 0,05 que as médias por peças são iguais a média geral para cada tratamento térmico, por exemplo, para o tratamento térmico feito a 540°C temos três populações diferenciadas pelo valor de Rq, a peça 1 com um Rq = 0,395, a peça 4 com um Rq = 0,2503 e as peças 2, 3 e 5 que são representadas com a média 0,3117.

Após a análise estatística, podem-se dividir os dados de 640°C em duas populações (dois valores de Rq), igualmente para 600°C e finalmente 540°C tem três populações (três valores de Rq).

3.4. Caracterização do contra-corpo

O contra-corpo usado nos ensaios de plano inclinado foi um aço ao carbono, com recobrimento de cromo duro. Como o atrito é um fenômeno de superfície, o recobrimento de cromo duro, é o contra-corpo a caracterizar e não o material base.

A Figura 3-8 apresenta o sistema tribológico, no qual é sinalizado o contra-corpo.

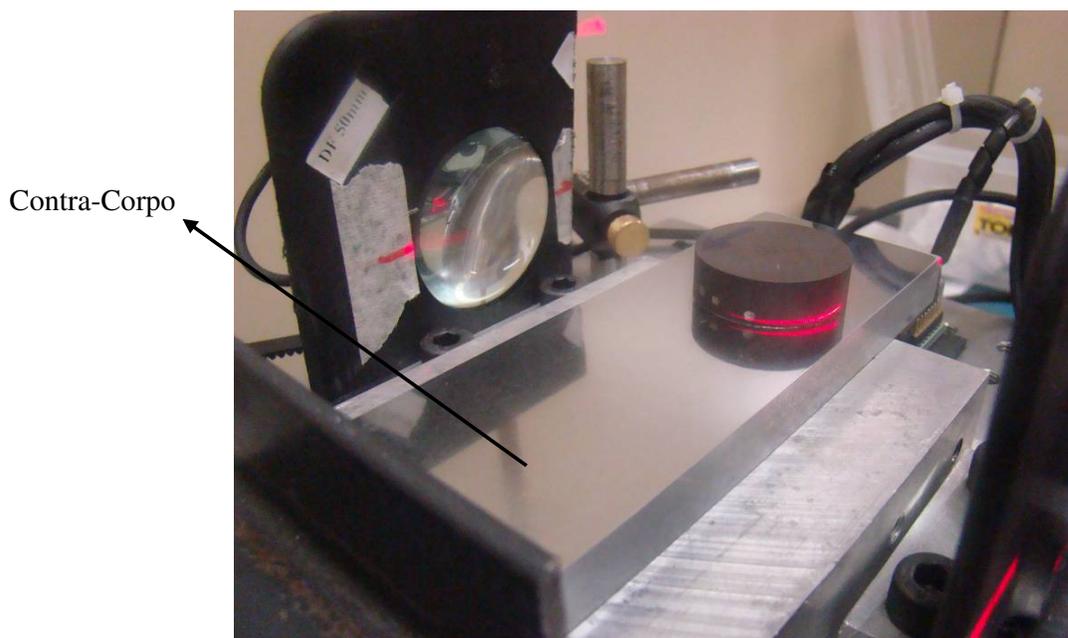


Figura 3-8. Aparência do recobrimento de cromo-duro. Contra-corpo.

Nota-se na Figura 3-8 que o contra-corpo tem uma aparência brilhante típico de materiais polidos, que devido a sua baixa rugosidade refletem grande parte da luz que chega a superfície.

A dureza média do contra-corpo ensaiado é 1072 ± 30 HV e a rugosidade R_q média é $0,068 \pm 0.003$. A rugosidade foi medida nos sentidos transversal e longitudinal, o resultado foram iguais nas duas direções, assim o resultado apresentado é a média de seis valores, sendo três em cada sentido.

A Figura 3-9 apresenta a microestrutura do contra corpo, pode se ver que é um aço de baixo carbono e fica em evidencia a espessura do camada de cromo, que é a quem está em contato direto com o corpo de prova.

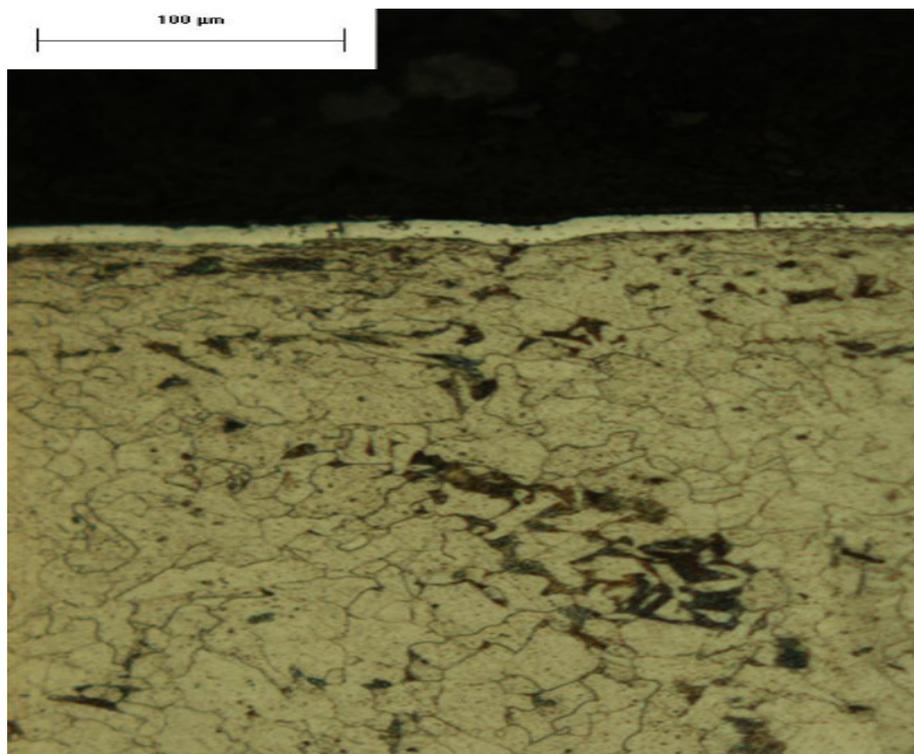


Figura 3-9. Microestrutura do contra corpo usado nos ensaios de atrito estático.

3.5. Estimativa da área de contato

Logo após da distinção dos conjuntos de resultados no corpo de prova, considerando o parâmetro R_q , foram calculados os parâmetros necessários ao modelo proposto por G-W. Lembrando que para o cálculo de m_0 e m_2 é só elevar ao quadrado os valores de R_q e R_{dq} , respectivamente, e combinar os resultados das duas direções segundo o descrito no modelo de G-W. Para o cálculo de m_4 é preciso conhecer os valores de f_1 , f_2 e a relação R_q/R_{dq} . Para este trabalho foram usados os valores de $f_1 = 3,3E-3$ e $f_2 = 0,2$ do equipamento de medição de rugosidade e foi construída a curva apresentada na Fig. 3-10.

A Figura 3-10 apresenta a variação de m_4/m_0 em função de Rq/Rdq .

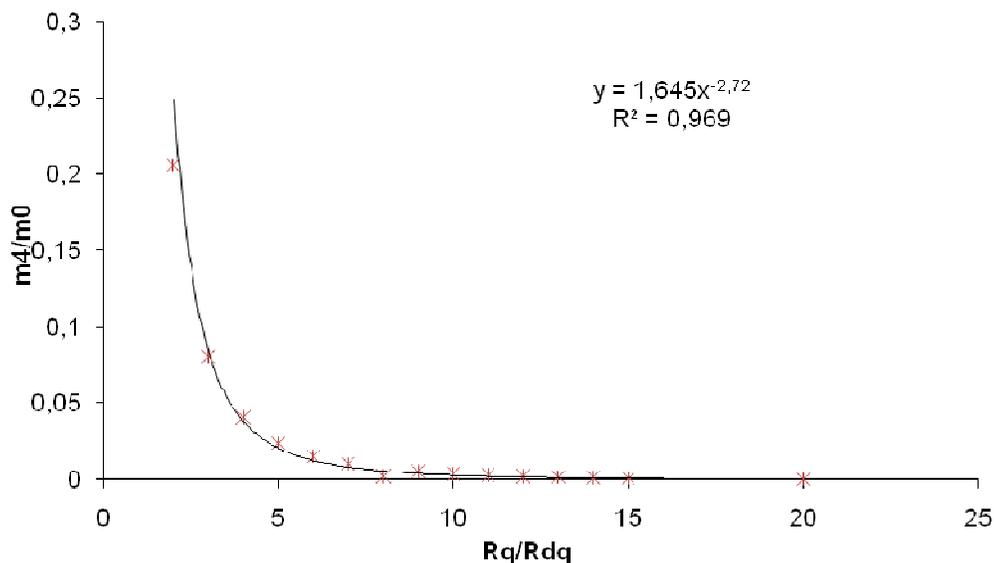


Figura 3-10 Variação de m_4/m_0 com Rq/Rdq . Adaptação (McCool 1987)

Todos os valores de rugosidade utilizados para os cálculos serão apresentados no Apêndice A. Sendo os momentos espectrais conhecidos, são calculados finalmente os parâmetros que servirão para o cálculo da relação entre a área de contato A_C e a área nominal A_0 (A_C/A_0). O parâmetro 'd', importante para o cálculo de 't' do modelo proposto por G-W, foi calculado a partir da equação 43, supondo que o valor de h é equivalente ao valor do parâmetro R_p de cada superfície medida. Além dos cálculos mencionados anteriormente, foi feito o cálculo do número total de contatos, segundo a equação 9 e o número de possíveis contatos plásticos, usando a equação 20.

3.6. Estimativa do índice de plasticidade.

Com os valores de dureza citados anteriormente e a análise dos parâmetros de rugosidade, pode-se estabelecer uma relação com os resultados de atrito estático. Visando

observar o efeito combinado das propriedades e a topografia, foi calculado o índice de plasticidade para nosso sistema tribológico. O cálculo foi feito mediante a equação 45 proposta por Greenwood e Williansom. A Tabela 8 apresenta as propriedades mecânicas do aço H13 (Lima *et al*, 2008), o recobrimento de cromo duro (TECNOCROM...,2011) e o módulo combinado E' , utilizadas no cálculo do índice de plasticidade.

Tabela 8. Propriedades mecânicas do sistema tribológico: Aço H13-Cromo Duro

	Aço H13	Cromo Duro
E N/mm ²	209E3	147E3
Coefficiente de Poisson	0,28	0,27
E' N/mm ²	119E3	

A seguir serão apresentados os resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Coeficiente de atrito estático: Resultados gerais

Na Tabela 9 são apresentados os resultados do coeficiente de atrito estático para as temperaturas de revenimento de 540, 600 e 640 °C. Como apresentado no capítulo 3, para cada corpo de prova foram feitos ensaios na direção transversal e longitudinal aos riscos da retifica. Entre tanto, como os resultados do coeficiente de atrito estático para os corpos-de-prova não apresentaram diferenças nas direções de ensaio, conseqüentemente foram agrupados todos os resultados e calculado um valor médio. Os resultados para cada direção de ensaio serão apresentados no Apêndice B. Para uma mesma temperatura de revenimento foram distinguidos conjuntos de resultados a partir do parâmetro Rq, explicada no capítulo 3, os quais serão chamados de C1, C2 e C3 para indicar o conjunto 1, 2 e 3, respectivamente.

Pode-se observar na Tabela 9 que para as amostras revenidas a 540°C o conjunto de resultados C2 apresentou o maior valor de atrito estático, seguido de C1 e C3, que apresentaram valores estatisticamente semelhantes. Essa mesma ordem se apresenta nos valores de Rq para esta temperatura, para C2, C1 e C3 os valores de Rq são 0,3947, 0,3117 e 0,2503; respectivamente, indicando uma provável proporcionalidade entre atrito e rugosidade, que será discutida posteriormente.

Para as temperaturas de 600°C e 640°C foram distinguidos dois conjuntos de resultados, sendo que, ao se verificar os desvios padrões, pode-se afirmar que os mesmos apresentam valores médios do coeficiente de atrito estático similares. Em ambos os casos a diferença no parâmetro Rq foi menor que a apresentada em 540°C.

Tabela 9 Resultados do coeficiente de atrito estático

μ_e									
540°C			600°C				640°C		
C1	C2	C3	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C3
0,1964	0,1839	0,2604	0,1965	0,2173	0,1888	0,1677	0,2561	0,2672	0,2353
0,1811	0,1973	0,2497	0,1812	0,2068	0,1739	0,1732	0,2373	0,2117	0,1963
0,1653	0,1913	0,2472	0,1653	0,2173	0,1839	0,1756	0,2625	0,2687	0,1934
0,1727	0,1784	0,2128	0,1727	0,2172	0,1834	0,2174	0,2625	0,2465	0,2460
0,1781	0,1759	0,2284	0,1781	0,2947	0,1918	0,2037	0,2379	0,2117	0,2038
0,1658	0,1735	0,2122	0,1658	0,2334	0,1789	0,2119	0,2585	0,2067	0,2123
0,1993	0,1968			0,2098	0,1930		0,2436	0,2073	
0,1884	0,1809			0,1993	0,1880		0,2864	0,2072	
0,1863	0,2203			0,1988	0,2071		0,2561	0,2086	
				0,2037	0,2865		0,2170	0,2434	
				0,2117	0,2548		0,2038	0,2228	
				0,2112	0,2242		0,1959	0,2122	
Media	0,19	0,24	0,18	0,21	0,19	0,23	0,23	0,22	
Desvio	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	

4.2. Efeito da Rugosidade no coeficiente de atrito estático.

Para analisar o efeito da rugosidade no coeficiente de atrito estático será utilizada a condição das amostras revenidas a 540°C, ou seja, para uma mesma dureza pode-se comparar três valores de rugosidade.

Os momentos espectrais apresentado por McCool (1986) são parâmetros relacionados com a rugosidade, e o parâmetro α é uma combinação entre os mesmos. A Tabela 10 apresenta os momentos espectrais calculados para cada temperatura de revenimento e o parâmetro α calculado a partir dos momentos.

Tabela 10 Momentos espectrais e parâmetro α , calculado segundo Greenwood e Williansom

Temp. de Revenimento	540°C			600°C		640°C	
	C1	C2	C3	C1	C2	C1	C2
$m_0 (10^{-2} \mu\text{m}^{-2})$	5.6	9.6	3.8	5.6	6.1	6.8	5.3
$m_2 (10^{-3})$	1.8	1.8	1.4	1.6	1.6	1.8	1.5
$m_4 (10^2 \mu\text{m}^{-2})$	9.1	7.5	7.8	7.9	7.5	9.2	7.4
α	16	22	14	18	19	18	18

A Figura 4-1 apresenta a variação do coeficiente de atrito estático com α para a condição de revenimento a 540 °C.

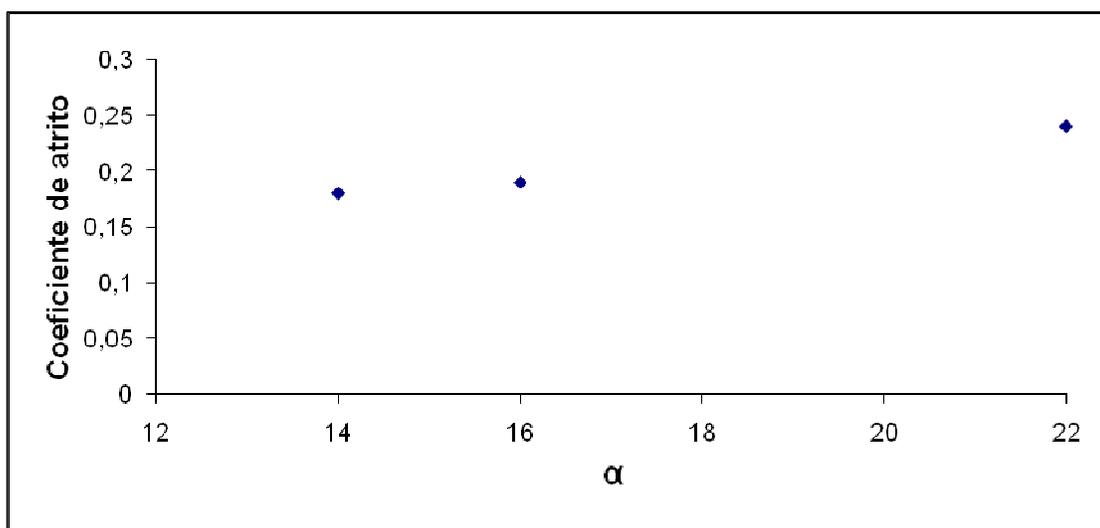


Figura 4-1 Variação do coeficiente de atrito com α para as amostras revenidas a 540°C

Nota-se na Figura 4-1 que para um mesmo material e uma mesma dureza se obtém diferença no coeficiente de atrito estático com a variação dos parâmetros de rugosidade. Quanto maior o parâmetro α , maior o coeficiente de atrito estático.

Para as demais temperaturas de revenimento (600°C e 640°C) o coeficiente de atrito praticamente não é sensível as variações do parâmetro α .

Após a análise da rugosidade e, com os momentos espectrais conhecidos, é possível calcular os outros parâmetros apresentados no modelo G-W, seguindo a rotina de cálculo apresentada por McCool (1986). A Tabela 11 apresenta os valores da densidade e raio dos picos e o desvio padrão da distribuição dos picos para cada temperatura de revenimento e seus conjuntos de amostras.

Tabela 11 Valores do desvio padrão da distribuição dos picos (σ , μm), raio ($R, 10^{-2}\text{mm}$) e densidade dos picos ($D_{\text{sum}}, 10^4 \text{Picos}/\text{mm}^2$)

Temp. de revenimento	540°C			600°C		640°C	
	C1	C2	C3	C1	C2	C1	C2
R (10^{-2}mm)	2,2	2,4	2,4	2,4	2,4	2,2	2,4
D_{sum} ($10^4 \text{Picos}/\text{mm}^2$)	1,5	1,3	1,7	1,5	1,5	1,5	1,5
σ (μm)	0,23	0,30	0,19	0,23	0,24	0,25	0,22

A Tabela 11 mostra que para todas as temperaturas o raio das asperezas e a densidades dos picos apresentam valores similares entre si, o que é esperado, considerando-se o mesmo material e os mesmos processos de fabricação. Além disso, a constancia em R e D_{sum} são premissas do modelo G-W. O parâmetro σ apresenta variação nos resultados das amostras revenidas a 540°C, enquanto para as amostras revenidas a 600°C e 640°C os valores são próximos entre si. Este resultado confirma que a distinção dos conjuntos de amostras por meio do parâmetro Rq é adequada, visto que σ é reflexo direto dos valores deste parâmetro.

Considerando-se cada aspereza individualmente como uma esfera em contato, o mapa de regimen de deformação proposto por Park e Pharr (2004) será utilizado para avaliar a natureza do contato.

A figura 4.2 mostra a variação da relação P_m / σ_r com $E^*a / \sigma_r R$ estudada por Park e Pharr (2004) mediante uma simulação em elementos finitos da deformação no regime de transição elasto-plástico.

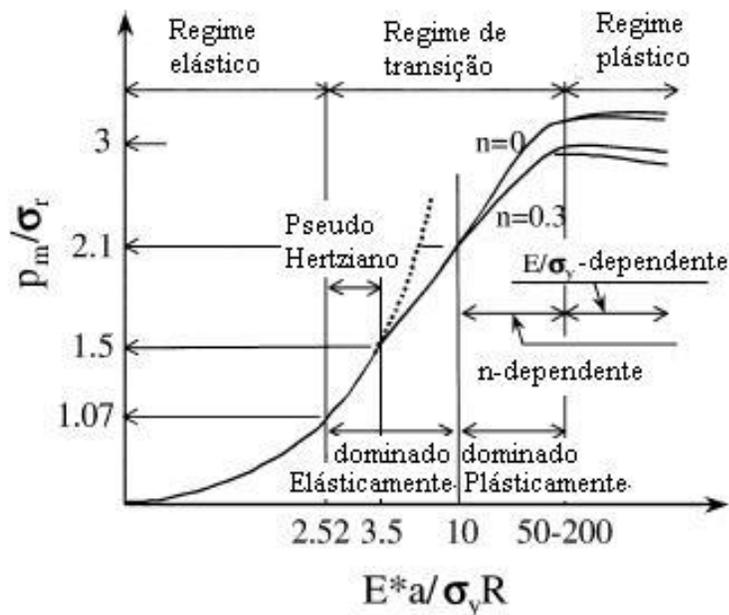


Figura 4-2 variação da relação P_m / σ_r com $E^*a / \sigma_y R$, com a identificação dos regimes de deformação

P_m ; Pressão média de contato

σ_r ; Tensão representativa para um valor $\epsilon_r = 0.2a / R$

E^* ; Modulo de elasticidade combinado.

a ; Raio de contato calculado com a teoria de Hertz.

R ; Raio das asperezas conforme a Tabela 11.

σ_y ; Tensão de escoamento calculado por conversão de $\sigma_y = (1/3)$ dureza .

Na figura 4.2 pode-se notar que para os valores menores do que 2,5 da relação $E^*a / \sigma_y R$ o regime é totalmente elástico. A partir de 2,5 até um valor que está na faixa de 50 a 200 dependendo do material há um regime de transição elasto-plástico que é subdividido em duas regiões, uma dominada elasticamente e outra dominada plasticamente. Valores acima da faixa

entre 50 e 200 o regime é totalmente plástico. Visando localizar, as variáveis de contato do presente trabalho na figura 4-2 foi calculada a relação $E^*a/\sigma_y R$,

Para o cálculo de 'a' foi usada a equação de Hertz:

$$a = \left(\frac{3WR}{4E^*} \right)^{1/3}$$

Onde W é a carga aplicada, que para o cálculo foi considerado um valor médio de 0,64N. A tabela 15 apresenta os valores de 'a' e da relação $E^*a/\sigma_y R$, para todas as temperaturas de revenimento e cada sub conjunto.

Tabela 15. Raio de contato 'a' calculado pela equação de Hertz (mm) e a relação $E^*a/\sigma_y R$.

		a Hertz (mm)	Ea/ $\sigma_y R$
540°C	C2	3,23E-08	7,62E-05
	C3	3,23E-08	7,62E-05
	C1	2,96E-08	7,62E-05
600°C	C1	3,23E-08	10E-5
	C2	3,23E-08	10E-5
640°C	C1	2,96E-08	12E-5
	C2	3,23E-08	12E-5

Na tabela 15 pode-se notar que todos os valores da relação foram menores do que 2,5, ou seja, todos os resultados se encontram no regime de deformação elástica, segundo a Fig 4-4. Por tanto, a aplicação do modelo de Greenwood and Willianson para o cálculo da área de contato é valido, dado que uma das premissas do mesmo é que a deformação seja puramente elástica.

4.3. Efeito da Dureza no coeficiente de atrito estático.

Para a análise da dureza serão comparados os resultados para cada temperatura de revenimento. Os dados utilizados são os conjuntos de amostras com Rq similar de cada temperatura, deixando como única variável a dureza. Os valores de Rq usados representam aos conjuntos C1, C1 e C2 para 540, 600 e 640°C, respectivamente.

A Figura 4.3 apresenta os valores médios de coeficiente de atrito estático em função da dureza Rockwell C das amostras de aço AISI H13.

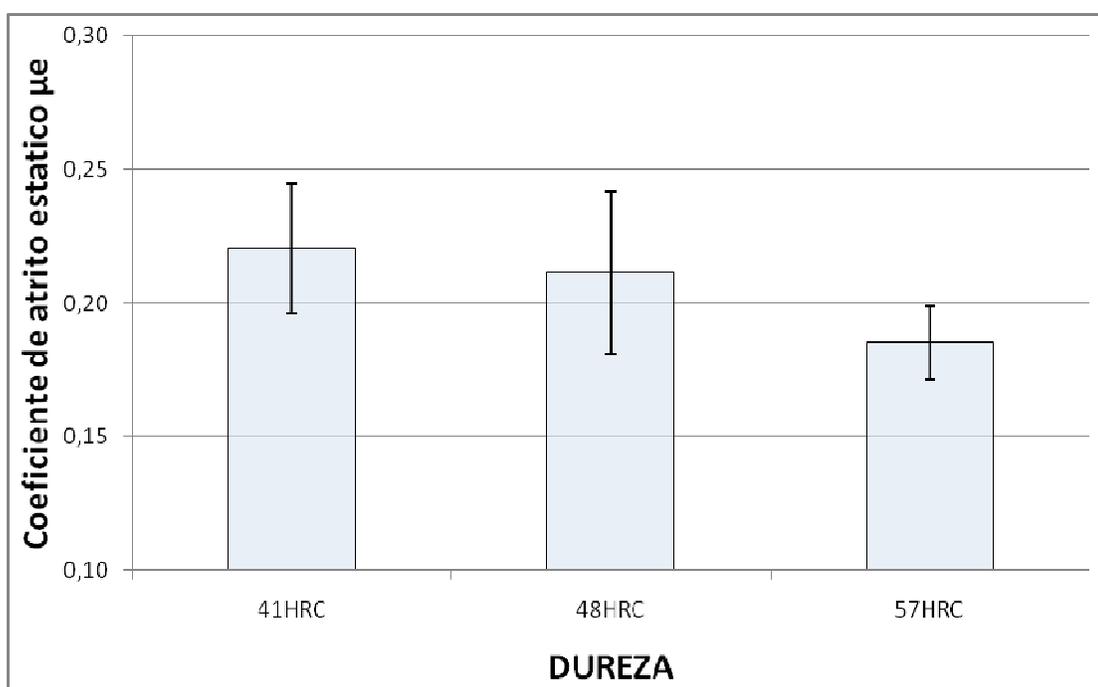


Figura 4-3 Variação do coeficiente de atrito estático com a dureza.

Nota-se na Figura 4-3 que os valores médios de coeficiente de atrito estático diminuiram à medida que a dureza do aço aumentou. Embora isto pudesse ser tratado como uma tendência, a análise estatística dos valores mostra que os mesmos são significativamente semelhantes e que, portanto, a tendência acima descrita não pode ser confirmada. Ou seja, não houve variação do coeficiente de atrito estático com a dureza do aço AISI H13, considerando-se o mesmo valor de rugosidade média para todos os casos.

Este resultado será mais bem discutido isolando-se o efeito da rugosidade (para uma mesma dureza) e verificando-se o efeito combinado da dureza e da rugosidade, analisando-se o índice de plasticidade. Estas análises serão apresentadas nos próximos itens.

4.4. Efeito da área de contato estimada no coeficiente de atrito estático.

Visando estabelecer uma relação entre a área de contato e o coeficiente de atrito estático foi calculada a relação entre a área real de contato e a área nominal dos corpos ensaiados, considerando deformação puramente elástica segundo o modelo G-W. Mediante a equação 17 é possível calcular a relação de áreas, com exceção do parâmetro 'd', no qual foi proposto um meio de cálculo para o mesmo, conforme apresentado no capítulo 3. A Tabela 12 apresenta os valores de R_p e z_s , usados para o cálculo de 'd'.

Tabela 12. Parâmetro de rugosidade R_p , valor calculado de Z_s e 'd'.

	R_p (μm)						
	540 °C			600°C		640°C	
	C1	C2	C3	C1	C2	C1	C2
	1,46	1,15	0,69	0,867	0,95	0,84	0,92
	0,98	1,03	0,836	0,867	0,88	1,44	0,78
	0,88	0,972	0,64	0,822	0,9	1,01	0,83
Media	1,11	1,05	0,722	0,852	0,91	1,10	0,84
Z_s (μm)	0,135	0,147	0,116	0,127	0,12	0,14	0,12
d (μm)	0,970	0,903	0,605	0,724	0,79	0,96	0,72

Com o valor 'd' é possível calcular os valores da relação de áreas e o número de contatos. Assim, conhecendo a área nominal, descrita pela geometria dos corpos-de-prova, é possível calcular a área real de contato. A Tabela 13 apresenta os valores da relação de áreas, o número de contatos e a área real de contato estimada para cada conjunto das três temperaturas de revenimento

Tabela 13. Numero de contatos (n , mm^{-2}), relação de áreas ($A_c/A_0, 10^{-6}$) e área real calculada (A_c , mm^2).

	540 °C			600°C		640°C	
	C1	C2	C3	C1	C2	C1	C2
n (mm^{-2})	0,29	17,15	9,89	11,68	6,83	1,25	9,06
A_c/A_0 (10^{-6})	0,85	150	42	62	36	4,8	47
A_c (mm^2)	0,0006	0,11	0,0297	0,0440	0,0257	0,00343	0,0332
μ	0,19	0,24	0,18	0,21	0,19	0,23	0,22

Na tabela 13 nota-se que, como era de esperar, a maior área de contato de cada temperatura de revenimento, é aquela com mais pontos em contato, ou seja, com um valor de 'n' maior. Da Tabela 13 e do resultado de atrito estático apresentado na Tabela 9 pode-se notar que para a temperatura de 540°C, o conjunto C2 apresenta maior área de contato, tem um valor de atrito estático maior. Para C1 e C2, que tem coeficientes de atrito estático semelhantes apresentam uma grande diferença na área real de contato entre eles, se supõe que há algum outro fenômeno influenciando no resultado, o que também ocorre com os resultados a 640°C. No caso das amostras revenidas a 640°C, o coeficiente de atrito não apresenta variação entre os conjuntos C1 e C2, embora as áreas calculadas para os mesmos apresentem variação em uma ordem de grandeza.

Para as amostras revenidas a 600°C, os conjuntos C1 e C2 possuem valores próximos tanto em área de contato quanto em coeficiente de atrito estático.

4.5. Efeito combinado entre dureza e rugosidade no coeficiente de atrito estático.

Para avaliar o efeito combinado entre a dureza e a rugosidade no coeficiente de atrito estático foi calculado o índice de plasticidade para todos os conjuntos de resultados, pois este índice incorpora as propriedades mecânicas e os parâmetros de superfície R e σ . A Figura 4.4 apresenta variação do atrito estático com o índice de plasticidade para todas as temperaturas de revenimento.

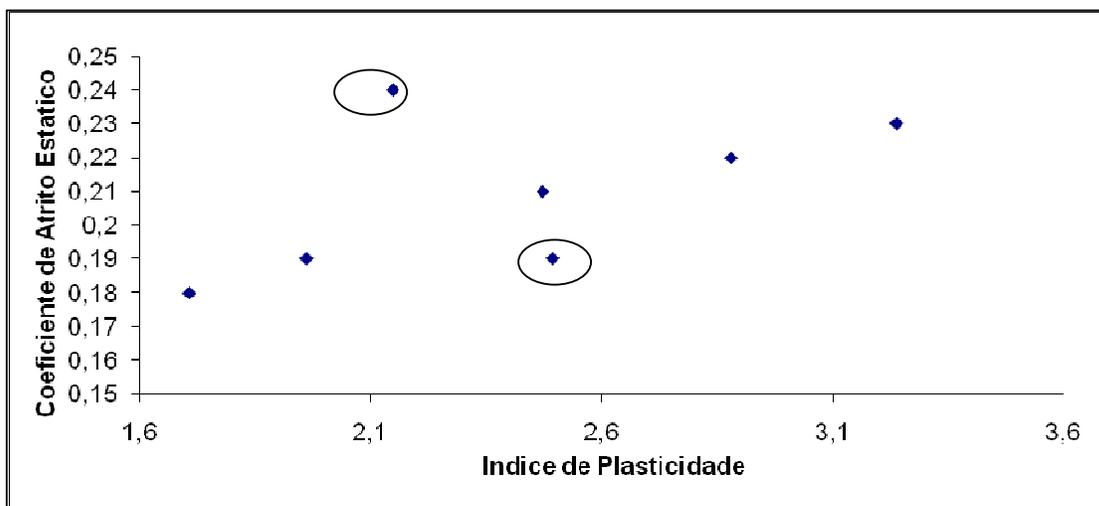


Figura 4-4 Variação do coeficiente de atrito estático com o índice de plasticidade

Nota-se na Figura 4-4, de uma maneira geral, que o coeficiente de atrito estático aumenta à medida que o índice de plasticidade também aumenta. Quanto maior o índice, segundo Greenwood e Williamson (1966), existe uma maior possibilidade de ocorrer deformação plástica, como confirmado pela literatura (Lima *et al*, 2008). Os dois pontos sinalizados na Figura. 4-4 apresentaram um comportamento fora da tendência. O ponto de menor valor dentre esses dois, é um ponto em que o valor de atrito é estatisticamente igual ao ponto imediatamente superior, podendo assim, ser resumido em um ponto só, contribuindo com a proporcionalidade direta entre o coeficiente e o índice de plasticidade. Por sua vez, o ponto mais alto entre os sinalizado, que representa a condição C2 da temperatura 540°C, que apresenta o maior coeficiente de atrito estático. De acordo com a Tabela 13, esta condição apresenta a maior área de contato dentre todas as ensaiadas. Desta forma, algum fenômeno relacionado com a mesma se sobrepôs aos que são possivelmente captados pelo índice de plasticidade.

A Tabela 14 apresenta, além dos resultados do índice de plasticidade e coeficiente de atrito estático, os valores do número de possíveis contatos plásticos. (n_p , mm^{-2})

Tabela 14. Índice de plasticidade (Ψ), numero de possíveis contatos plásticos (n_p , mm^{-2}), relação entre numero de contatos totais e numero de contatos plásticos e resultado de coeficiente de atrito estático ($\% n_p/n$).

Temp. de revenimento	540 °C			600°C		640°C	
	C1	C2	C3	C1	C2	C1	C2
Ψ	1,96	2,15	1,7	2,47	2,49	3,2	2,88
n_p (mm^{-2})	0,15	9,90	4,15	7,80	4,60	0,99	6,73
$\% n_p/n$	52	58	42	67	67	79	74
μ	0,19	0,24	0,18	0,21	0,19	0,23	0,22

Nota-se que à medida em que o índice de plasticidade aumenta, o número dos possíveis contatos plásticos também aumenta.

5. CONCLUSÕES

Considerando o arranjo experimental utilizado neste trabalho, em especial as variações de dureza avaliadas (41 a 57 HRC), as principais conclusões que podem ser apresentadas, válidas para estas condições são:

- A força aplicada nos ensaios do plano inclinado, representada pelo peso próprio de amostras de aço AISI H13, manteve as superfícies sob o regimen de deformação elástica, sendo possível a aplicação do modelo de Greenwood & Willianson para o cálculo da área de contato.
- Foi possível distinguir grupos de amostras com rugosidade estatisticamente diferentes, mesmo que todas as amostras tenham sido fabricadas igualmente. Estas variações na rugosidade foram as principais responsáveis pela variação do coeficiente de atrito estático.
- Mesmo que a área real de contato estimada e a dureza não apresentem um efeito direto no coeficiente de atrito estático, a combinação das propriedades mecânicas e superficiais representadas pelo índice de plasticidade, é capaz de explicar as variações obtidas no ensaio de plano inclinado.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar medições de rugosidade 3D para assim trabalhar com dados mais próximos da superfície real.
- Produzir corpos-de-prova com variações da rugosidade controladas, visando testar de maneira mais ampla a influência do parâmetro α .
- Avaliar os parâmetros de rugosidade após cada ensaio de atrito.
- Relacionar outras grandezas de superfície com o atrito, tais como fator de forma e ondulação.

REFERENCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. 'Surface engineering'. In: **Metals handbook**, Vol 5, pp. 304-306.1992.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. 'Heat Treating'. In: **Metals handbook**, Vol 4, p.p 496-520,1991.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. 'Friction, Lubrication and Wear Technology'. In: **Metals handbook**, Vol 18, 1992.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, **ASME B46.1-1995 - Surface Texture** (Surface Roughness, Waviness, and Lay), New York, 1996.

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

BAHADUR S. 'Wear research and development'. **Journal Lubric Techno**. Vol 100; pp. 449-54. 1978.

BUSH, A. W.; GIBSON, R. D.; KEOGH, G. P., The limit of elastic deformation in the contact of rough surfaces, **Mech. Res. Commun.**, Vol 3; pp 169 -174; 1976.

BLAU P. J. 'Friction science and technology: from concepts applications'. 2nd ed, p.p. 56-57, 2008.

CHANG W. R., ETSION I., BOGY D. B. 'Static Friction Coefficient Model for Metallic Rough Surfaces' **ASME Journal of Tribology**, Vol 110, pp 57-63, 1988.

GHABRIAL, S.R., E ZAGHLOOL, S.A. 'The Effect of Surface Roughness on Static Friction' **Int. J. Mach, Tool Des. Res.**, Vol 14, pp. 299-309

GREENWOOD, J.A., WILLIAMSON, J.B.P., "Contact of Nominally Flat Surfaces", **Proceedings of the Royal Society of London**. Series A, Mathematical and Physical Sciences, v. 295, p. 300-319, 1966.

HABIB S. BENABDALLAH. 'Static friction coefficient of some plastics against steel and aluminum under different contact conditions', **Tribology International**, Vol 40, p.p. 64-73, 2007.

HÖGANÄS, 'Aplicações de pós' Disponível em: <http://www.hoganas.com/pt-BR/Countries/Brasil/Produtos--Aplicacoes/Atrito/>, Ultimo acesso: Dezembro 2010

HUTCHINGS, I. M 'Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials'. Edward Arnold / London, p.p. 22-57, 1992.

INSTITUTO NACIONAL DE ENGENHERIA E SUPERFICIES, 'Mais Recursos Para Reduzir Atrito Em Motores De Combustão Externa'. Disponível em: <http://engenhariadesuperficies.wordpress.com/2010/02/12/mais-recursos-para-reduzir-atrito-em-motores-de-combustao-externa/>, Ultimo acesso: Dezembro 2010

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - **ISO 4287**. 'Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters', P. 3. ISO, 1997

LIMA, VIÁFARA C.C., LEITE M. V., SOUZA R. M.. 'Desenvolvimento de um modelo de contato de uma superfície idealmente lisa contra uma rugosa pelo método dos elementos finitos'. **IX Encontro de Iniciação Científica do LFS**, São Paulo.pp 21-31.2008.

LUDEMA, KENNETH C. 'Friction, Wear, Lubrification. **A TextBook in Tribology**. CRC Press. New York, p.p. 101-103, 1996.

MCCOOL J.I. 'Comparison of Models For The Contact of Rough Surfaces', **Wear**, Vol 107 p.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.p 264-270, 1987.

PARK Y.J.,PHARR G. M. 'Nanoindentation with spherical indenters: finite element studies of deformation in the elastic–plastic transition regime', **Thin Solid Films**, p. p 246-250, 2004.

POLYCARPOU A.A., Yu. N., PERGANTE.S. R. `Static Friction Model for Rough Surfaces With Asymmetric Distribution of Asperity Heights`, **ASME Journal of Tribology**, Vol 126, p.p. 626-629, 2004.

POLYCARPOU A., NING. Y., `Extracting Summit Roughness Parameters From Random Gaussian Surface Accounting for Asymmetry of the Summit Heights` **ASME Journal of Tribology**, Vol 126, pp 761-766, 2004.

TABOR D., `Junction growth in metallic friction: the role of combined stresses and surface contamination`, **The Royal Society of London A**, 251, p.p. 378-393, 1959.

TAYLOR HOBSON, **The Parameter Tree of Roughness Surface**, apresentação dos parâmetros fornecidos pelo fabricante do equipamento, 2000.

TECNOCROM INDUSTRIAL, S.A., **Cromo duro níquel químico: Especificaciones Técnicas**. Disponível em: http://www.tecnocrom.es/pdf/Especif_TECNOCROM.pdf
Acesso em: Agosto 2011

SNR INDUSTRIA, **Tecnologia dos rolamentos**, Comunicação pessoal, 2011.

SMITH. G, **Industrial Metrology: Surfaces and Roundness**, Springer/London, p. 74, 2002.

SMITH, W.F. **Structure and properties of engineering alloys**. New York: McGraw-Hill, p. 512, 1981.

WHITEHOUSE J.D. `Some Theoretical Aspects of Surface Peak Parameters`, **Precision Engineering** Vol 23, pp 94-102, 1999.

APÊNDICE A - Cálculo dos momentos espectrais

Para o cálculo dos momentos espectrais foram combinados os parâmetros de rugosidade medidos nas duas direções de ensaio. Neste cálculo foram conservados os conjuntos distinguidos anteriormente. As Tabelas A.1, A.2 e A.3 apresentam os valores de rugosidade usados no cálculo dos momentos espectrais. A terminação T ou L representam o sentido de medição, sendo T o sentido transversal e L o longitudinal.

Tabela A. 1 Parâmetros de rugosidade para cada conjunto de resultados distinguidos na temperatura de revenimento 540 °C

	C1		C2				C3					
	540T	540L	540T	540L	540T	540L	540T	540L				
	Rdq	Rq	Rdq	Rq	Rdq	Rq	Rdq	Rq	Rdq	Rq		
	0,105		0,011	0,086								
	0,097		0,014	0,129								
	0,099		0,017	0,179								
	0,100		0,023	0,132								
	0,085	0,312	0,023	0,156	0,109	0,395	0,016	0,189	0,083	0,25	0,017	0,115
	0,085		0,011	0,068								
	0,091		0,022	0,163								
	0,091		0,036	0,182								
	0,084		0,018	0,125								
Media	0,093	0,312	0,019	0,132	0,109	0,395	0,189	0,016	0,083	0,25	0,017	0,115
Rq/Rdq		3,352		6,82		3,62		11,66		3,01		6,78

Com os valores de Rq, Rdq, Rq/Rdq e a Figura 3-7, podem ser calculados os momentos espectrais para cada direção. As Tabelas A.4 e A.5 apresentam os momentos espectrais nas duas direções de medição para cada temperaturas de revenimento. Os valores de m_{0c} , m_{2c} e m_{4c} representam os valores resultantes combinados, que no texto foram chamados de m_0 , m_2 e m_4 .

Tabela A. 2 Parâmetros de rugosidade para cada conjunto de resultados distinguidos na temperatura de revenimento 600 °C

		C1				C2			
		600T		600L		600T		600L	
		Rdq	Rq	Rdq	Rq	Rdq	Rq	Rdq	Rq
		0,089		0,015	0,105				
		0,081		0,013	0,115				
		0,082		0,015	0,141				
		0,084		0,020	0,125				
		0,093		0,016	0,177				
		0,091		0,010	0,0854				
	0,302			0,019	0,227	0,095	0,322	0,016	0,137
		0,087		0,019	0,227				
		0,085		0,027	0,186				
		0,093		0,024	0,163				
		0,090		0,012	0,098				
		0,090		0,015	0,107				
		0,093		0,029	0,205				
Media		0,088	0,302	0,018	0,144	0,095	0,322	0,016	0,137
Rq/Rdq			3,42		8,01		3,36		8,5

Tabela A. 3 Parâmetros de rugosidade para cada conjunto de resultados distinguido na temperatura de revenimento 540 °C

		C1				C2			
		640T		640L		640T	640T	640L	640L
		Rdq	Rq	Rdq	Rq	Rdq	Rq	Rdq	Rq
		0,082		0,011	0,067				
		0,089		0,016	0,138				
		0,089		0,014	0,11				
		0,088		0,016	0,098				
		0,112		0,014	0,13				
		0,092		0,013	0,094				
	0,3363			0,013	0,121	0,086	0,292	0,017	0,144
		0,117		0,013	0,121				
		0,099		0,040	0,266				
		0,122		0,020	0,231				
		0,090		0,019	0,177				
		0,101		0,019	0,185				
		0,101		0,024	0,16				
Media		0,098	0,3363	0,018	0,148	0,086	0,292	0,017	0,144
Rq/Rdq		3,4		7,97		3,37		8,4	

Tabela A. 4 Momentos espectrais nas direções de medição e momentos resultantes, para as amostras revenidas a 540 °C

540 °C							
		C1		C2		C3	
		540T	540L	540T	540L	540T	540L
m_0		0,0972	0,0156	0,1558	0,0357	0,0627	0,0132
m_2		0,0086	0,00037	0,0119	0,00027	0,0069	0,0003
m_4		0,0208	0,00059	0,0276	0,00037	0,0174	0,0005
m_{0c}		0,056		0,0957		0,0379	
m_{2c}		0,0018		0,0018		0,0014	
m_{4c}		0,0035		0,0032		0,0029	

Tabela A. 5 Momentos espectrais nas direções de medição e momentos resultantes, para as amostras revenidas a 600 °C e 640 °C

	600				640			
	C1		C2		C1		C2	
	600T	600L	600T	600L	640T	640L	640T	640L
m_0	0,0911	0,02091	0,1037	0,0187	0,1131	0,0219	0,0850	0,0207
m_2	0,0078	0,00033	0,0092	0,00026	0,0098	0,00035	0,0075	0,0003
m_4	0,0186	0,00054	0,0219	0,00041	0,0234	0,00057	0,0179	0,0005
m_{0c}	0,056		0,061		0,0675		0,0529	
m_{2c}	0,0016		0,0016		0,0018		0,0015	
m_{4c}	0,0032		0,0030		0,0037		0,0029	

APÊNDICE B. Resultados por direção.

Nas Tabelas B.1, B.2 e B.3 se apresentam os valores de coeficiente de atrito estático para cada temperatura de revenimento e para cada peça. De forma geral, os resultados do coeficiente de atrito estático nas duas direções são estatisticamente similares.

Tabela B. 1. Resultados por peças do coeficiente de atrito estático nas direções transversal e longitudinal. Peças com duplo revenimento a 540°C

	Peça 1		Peça 2		Peça 3		Peça 4		Peça 5	
	Trans	Long								
540	0,260	0,213	0,184	0,178	0,197	0,199	0,171	0,223	0,196	0,173
	0,250	0,228	0,197	0,176	0,181	0,188	0,168	0,220	0,181	0,178
	0,250	0,212	0,191	0,174	0,220	0,186	0,171	0,230	0,165	0,166
Media	0,253	0,218	0,191	0,176	0,199	0,191	0,170	0,224	0,181	0,172
DESVPAD	0,006	0,009	0,007	0,002	0,020	0,007	0,002	0,005	0,016	0,006

Tabela B. 2. Resultados por peças do coeficiente de atrito estático nas direções transversal e longitudinal. Peças com duplo revenimento a 600°C

	Peça 1		Peça 2		Peça 3		Peça 4		Peça 5	
	Trans	Long								
T600C	0,189	0,183	0,217	0,217	0,210	0,204	0,168	0,217	0,193	0,286
	0,164	0,201	0,189	0,199	0,191	0,201	0,161	0,236	0,238	0,222
	0,189	0,183	0,217	0,217	0,210	0,204	0,168	0,217	0,193	0,286
Media	0,181	0,189	0,208	0,211	0,204	0,203	0,166	0,223	0,208	0,265
DESVPAD	0,014	0,010	0,016	0,010	0,011	0,002	0,004	0,011	0,026	0,037

Tabela B. 3 Resultados por peças do coeficiente de atrito estático nas direções transversal e longitudinal. Peças com duplo revenimento a 640°C

	Peça 1		Peça 2		Peça 3		Peça 4		Peça 5	
	Trans	Long								
T640C	0,267	0,246	0,207	0,243	0,235	0,246	0,244	0,217	0,256	0,262
	0,212	0,212	0,207	0,223	0,196	0,204	0,286	0,204	0,237	0,238
	0,269	0,207	0,209	0,212	0,193	0,212	0,256	0,196	0,262	0,258
Media	0,249	0,222	0,208	0,226	0,208	0,220	0,262	0,205	0,252	0,253
DESVPAD	0,032	0,021	0,001	0,016	0,023	0,022	0,022	0,011	0,013	0,013