

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Tese de doutorado

**Análise tribológica de conjugados (CrAl)N
depositados por PAPVD sobre ferramentas de metal duro
com diferentes rugosidades superficiais**

Autor: João Luiz Turchetti Lara Rezende
Orientador: Prof. Geralda Cristina Durães de Godoy

Dezembro/10

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

João Luiz Turchetti Lara Rezende

**Análise tribológica de conjugados (CrAl)N
depositados por PAPVD sobre ferramentas de metal duro
com diferentes rugosidades superficiais**

Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Geralda Cristina Durães de Godoy

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2010

*“O correr da vida
embrulha tudo,
a vida é assim:
esquenta, esfria, aperta e daí afrouxa,
sossega
e depois desinquieta.
O que ela quer da gente
é coragem.”*

(João Guimarães Rosa)

À minha família: Alberico, Edite, Fernanda, Izalda,
João Paulo, Lucas, Matheus e Paula.

AGRADECIMENTOS

Aos familiares, pela compreensão aos momentos de ausência.

A Professora orientadora Geralda Cristina Durães de Godoy pela dedicação, orientação, paciência e, acima de tudo, por acreditar no meu trabalho, sendo uma facilitadora incansável na execução e elaboração desta tese.

Aos professores Antônio César Bozzi e Carlos Leyva, pela ajuda e enriquecimento das discussões de resultados de testes e ensaios.

Ao curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, nas pessoas de seus coordenadores, professores e funcionários, em especial aos professores Vicente Bueno, Dagoberto Brandão, Herman Mansur e Antônio Perez e aos funcionários Maria Aparecida Pacheco, Néelson, Patrícia Azevedo e Andréa pelo profissionalismo e incentivo ao ensino continuado.

A Universidade Federal do Espírito Santo, pela cooperação e utilização do Laboratório de Tribologia e Corrosão de Materiais – TRICORMAT, gentilmente cedido para realização de ensaios de microabrasão.

A Vale e a GETF (*General Electric* Transportes Ferroviários), na figura de seus líderes, por compreenderem a paixão pelo conhecimento e pela busca de algo mais, que complementasse o exercício da profissão na indústria.

Aos amigos e companheiros pelo incentivo nos momentos difíceis.

Aos colegas de estudo (alunos de iniciação científica, mestrado e doutorado) pelo companheirismo e ajuda nos testes e ensaios.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	22
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS	25
CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1 – Processo de Usinagem	26
3.1.1 – Torneamento	29
3.1.1.1 – Parâmetros de Usinagem no Torneamento	30
3.1.1.2 – Mecanismos de Formação do Cavaco	31
3.1.1.3 – Geração de Calor Durante o Processo	34
3.1.1.4 – Ferramentas de Corte	37
a) Elementos	39
b) Material	40
c) Processos e mecanismos de falha	42
d) Vida útil	47
3.2 – Engenharia de Superfície	52
3.2.1 – Revestimentos	53
3.2.1.1 – Processo de Deposição por Vaporização	57
3.2.1.2 – Propriedades e Modos de Falha em Revestimentos.....	60
a) Dureza	61
b) Adesão	62

c) Tensões residuais	67
d) Rugosidade do substrato e do conjugado	70
3.2.2 – Revestimentos (Cr_{1-x}, Al_x) N	76
3.3 – Caracterização da Superfície	81
3.3.1 – Perfilometria	89
3.4 – Desgaste	99
3.4.1 – Desgaste por Corrosão	100
3.4.2 – Desgaste por Fadiga Superficial	101
3.4.3 – Desgaste Abrasivo	101
3.4.4 – Desgaste por Deslizamento	104
3.4.5 – Ensaio para Medir Desgaste	111
3.4.5.1 – Ensaio de Desgaste Pino sobre Disco	114
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA	116
4.1 – Equipamentos e Parâmetros	117
4.1.1 – Rugosidade Superficial	117
4.1.2 – Deposição por PAPVD	120
4.1.3 – Microdureza Vickers	120
4.1.4 – Caracterização Estrutural por Difração de Raios X	120
4.1.5 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	120
4.1.6 – Ensaio de Adesão Rockwell C	121

4.1.7 – Ensaio de Desgaste por Microabrasão	121
4.1.8 – Ensaio de Desgaste por Deslizamento	122
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO	131
5.1 - Caracterização	131
5.1.1 - Análises Química e Microestrutura	131
5.1.2 – Rugosidade	135
5.1.3 - Deposição do Recobrimento: Adesão e Espessura de Camada	143
5.1.4 - Dureza	145
5.2 - Desgaste por Deslizamento Esfera sobre Disco	146
5.3 - Desgaste por Microabrasão	175
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	178
CAPÍTULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	179
BIBLIOGRAFIA	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 -	Exemplos de operações de torneamento: (a) torneamento externo (b) sangramento superficial (c) torneamento interno	29
Figura 3.2 -	Croqui com principais parâmetros de torneamento: velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	30
Figura 3.3 -	Influência do fluido de corte no formato do cavaco em usinagem de aço carbono a baixa velocidade de corte: (a) sem fluido de corte e (b) com fluido de corte (CHILDS T. <i>et al</i> , 2000)	33
Figura 3.4 -	Zonas de calor gerado em processo de usinagem ortogonal: zona primária, zona secundária e zona terciária (SUTTER G.; RANC N., 2007).....	35
Figura 3.5 -	Campos de temperatura gerados no cavaco durante o torneamento de aço baixa liga (a) fotografia em tempo real e (b) campos de temperatura (SUTTER G.; RANC N., 2007)	36
Figura 3.6 -	Exemplo de modelos de ferramentas de tornear – cinzéis manuais. Ano de 1680	38
Figura 3.7 -	Exemplos de tipos de formato de ferramentas (ABRÃO A. N. <i>et al</i> , 2009)	39
Figura 3.8 -	Elementos de cunha e de corte de uma ferramenta de tornear (ABRÃO A. N. <i>et al</i> , 2009)	39
Figura 3.9 -	Modos de falha em ferramentas de corte (MILLS B., 1996)	42
Figura 3.10 -	Falhas típicas em ferramentas de corte. (a) ferramenta: Al_2O_3/TiC (cerâmica), $V_c = 100m/min$, $a_p = 0,5mm$, $f = 0,19mm/rev$, $t = 0,5min$. (b) ferramenta: Si_3N_4 (cerâmica), $V_c = 300m/min$, $a_p = 1,0mm$, $f = 0,19mm/rev$, $t = 1min$. (CHILDS T. <i>et al</i> , 2000).....	43

Figura 3.11 -	Varição do desgaste com o aumento da temperatura de corte (CHOW J.G.; WRIGHT P.K., 1998)	44
Figura 3.12 -	Varição do desgaste com o aumento da temperatura de corte (CHILDS T. <i>et al.</i> , 2000)	45
Figura 3.13 -	Parâmetros utilizados para medir desgaste em ferramentas de corte (ISO 3685, 1993)	48
Figura 3.14 -	Mapa de desgaste mostrando a taxa de desgaste para o flanco de ferramenta de metal duro revestida com TiN durante torneamento a seco de aço AISI 1045 (LIM C. Y. H <i>et al.</i> , 2001)	49
Figura 3.15 -	Representação esquemática da estrutura de revestimento (a) monocamada e (b) multicamada. (BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T., 1999)	54
Figura 3.16 -	Resumo da classificação por técnicas de deposição de revestimentos. (BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T., 1999)	56
Figura 3.17 -	Exemplo de faixas de dureza e espessura para alguns tipos de revestimentos. (BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T., 1999)	57
Figura 3.18 -	Propriedades do sistema revestimento/substrato que são importantes para determinar a performance do conjugado em aplicações tecnológicas (BULL S. J. e RICKERBY S., 2000)	60
Figura 3.19 -	Diagrama esquemático dos diferentes tipos de mecanismos de adesão (WEISS H., 1995)	63
Figura 3.20 -	Exemplos de testes de medição de adesão em conjugados segundo seus métodos associados (WEISS H., 1995)	64
Figura 3.21 -	Morfologias de falhas obtidas no teste de adesão Rockwell C (HEINKE W. <i>et al.</i> , 1995).....	65

Figura 3.22 -	Varição de (a) tensão intrínseca e (b) adesão, com a variação de concentração de nitrogênio em filme de cromo depositado em substrato de vidro (pressão total = 0,13Pa; densidade de potência = 700W/m ² e temperatura do substrato = 473K) (MASSEREAU V. G.; MACHET J., 1995)	68
Figura 3.23 -	Varição da rugosidade do substrato em relação à carga crítica do teste de performance. Revestimento de TiN (PODGORNIK B. <i>et al</i> , 2004)	72
Figura 3.24 -	Varição da densidade de defeitos e da tenacidade a fratura em relação à rugosidade do substrato (SORO J. M. <i>et al</i> , 1998)	73
Figura 3.25 -	Varição da densidade de defeitos pontuais (poros) em relação à rugosidade do substrato. Revestimento de Ti. Espessura da camada: 3µm. (MUNEMASA J.; KUMAKIRI T., 1991)	75
Figura 3.26 -	Varição da microdureza Vickers em função de teor de Al em filme de (Cr _{1-x} ,Al _x) N (HASEGAWA H. <i>et al</i> ,2004)	78
Figura 3.27 -	Varição da dureza Vickers e dureza Knoop em função da carga aplicada (UCHIDA <i>et al</i> , 2004)	79
Figura 3.28 -	Varição da resistência elétrica em função do teor de Al em filme de (Cr _{1-x} ,Al _x) N (VETTER J. <i>et al</i> , 1998)	80
Figura 3.29 -	Influência da rugosidade superficial na vida e temperatura de funcionamento de mancais de deslizamento (adaptado de AGOSTINHO O. L. <i>et al</i> , 1997)	82
Figura 3.30 -	Interação entre processos de fabricação, funções das superfícies e sua caracterização (adaptado de CHIFFRE L. <i>et al</i> , 2000)	84
Figura 3.31 -	Metodologia para escolha do método de medição (LONARDO P. M. <i>et al</i> , 2002)	88

Figura 3.32 -	Princípio de funcionamento de um perfilômetro (adaptado de HUTCHINGS I. M., 1992)	90
Figura 3.33 -	Ponta de diamante de raio igual a 5 μ m. Foto tirada por microscópio eletrônico, aumento de 2.000x. (MUMMERY L., 1992)	91
Figura 3.34 -	Comparação entre medidas de perfilometria obtidas com diferentes tamanhos de raio de ponta (MUMMERY L., 1992)	92
Figura 3.35 -	Classificação das categorias de características de um perfil de uma superfície (adaptação de MUMMERY L., 1992)	93
Figura 3.36 -	Exemplos de utilização de diferentes comprimentos de <i>cut off</i> para o mesmo perfil de rugosidade (adaptado de MUMMERY L., 1992)	95
Figura 3.37 -	Ilustração conceitual do mecanismo de deformação por ciclo repetitivo, ocasionando o desgaste por fadiga (BAYER R. G., 2004)	101
Figura 3.38	Ilustração dos três tipos de desgaste abrasivo: a) por dois corpos; b) por três corpos e c) erosão (adaptado de HUTCHINGS I. M., 1992)	102
Figura 3.39 -	Taxa de desgaste de cobre sob condições de desgaste abrasivo de dois e três corpos e erosão, contra partículas de carbeto de silício de diferentes tamanhos (adaptado de HUTCHINGS I. M., 1992)	104
Figura 3.40 -	Desgaste de corpo de prova de alumínio na seqüência de passes de deslizamento em ensaio pino sobre disco (a) primeiro passe, (b) segundo passe, (c) terceiro passe e (d) quarto passe. Direção de deslizamento: debaixo para cima (RUFF A. W. <i>et al</i> ,1981)	107

Figura 3.41 -	Partículas de desgaste encontradas em testes de desgaste pino sobre disco. Partículas maiores misturadas com menores. (RUFF A. W. <i>et al</i> , 1981)	108
Figura 3.42 -	Partículas de desgaste menores compactadas na zona de contato entre esfera e corpo de prova (RUFF A. W. <i>et al</i> , 1981) ...	108
Figura 3.43 -	Croqui de ensaio de desgaste por deslizamento tipo pino sobre disco (adaptação de BRESSAN J. D, 2007)	114
Figura 4.44 -	Fotografia da politriz LaboPol, fabricada pela Struers	118
Figura 4.45 -	Perfilômetro T4000 da Hommelwerke	119
Figura 4.46 -	Fotografia do equipamento de desgaste por microabrasão. Fabricação: Phoenix Tribology Ltda, modelo TE66 Micro-Scale Abrasion Tester	122
Figura 4.47 -	Tribômetro esfera sobre disco fabricado pela Micro Photonics Inc.	123
Figura 4.48 -	a) Calibração da célula de carga do tribômetro. Procedimento executado antes dos ensaios. (b) Verificação do nivelamento. Procedimento executado a cada teste	124
Figura 4.49 -	Imagem da amostra após a reamostragem com espaçamento em Z redefinido	125
Figura 4.50 -	Imagem da amostra em perspectiva axonométrica.....	126
Figura 4.51 -	Imagem da amostra após realizada a remoção do efeito de forma	127
Figura 4.52 -	Imagem da amostra após o nivelamento	127
Figura 4.53 -	Imagem da amostra com o resultado da remoção manual dos defeitos	128

Figura 4.54 -	Comparação entre os métodos de cálculo do volume de uma cavidade utilizando o resultado de uma medição por perfilometria. (a) Método 1 (b) Método 2 e (c) Método 3	130
Figura 4.55 -	Método de cálculo de volume adotado para quantificar o desgaste ocorrido durante ensaio de desgaste por deslizamento pino sobre disco. Trilha de desgaste definida como entidade única para o cálculo do volume	130
Figura 5.56 -	Resultados de análise de estrutura cristalina (a) antes de recobrir e (b), (c) e (d) depois de recoberto – sistemas L1, L2 e F	134
Figura 5.57 -	Imagens obtidas por MEV (elétrons retroespalhados) das superfícies das amostras antes do recobrimento. Ampliação de 1.000x (a) sistema lixado intermediário (b) sistema mais lixado e (c) sistema polido	140
Figura 5.58 -	Imagens obtidas por MEV (elétrons retroespalhados) das superfícies das amostras depois do recobrimento. Ampliação de 1.000x (a) sistema lixado intermediário (b) sistema mais lixado e (c) sistema polido	141
Figura 5.59 -	Imagens obtidas para cálculo dos parâmetros de rugosidade (a) sistema lixado intermediário (b) sistema mais lixado e (c) sistema polido	143
Figura 5.60 -	Imagens do teste de adesão Rockwell C. Substrato: WC-Co. Recobrimento: CrAlN. (a) sistema polido. (b) ampliação de (a). (c) sistema lixado. (d) ampliação de (c). Aumentos de 200x e 750x ...	144
Figura 5.61 -	Espessura da camada de recobrimento de CrAlN depositada sobre substrato de WC-Co.	145

Figura 5.62 -	Resultados de ensaios de desgaste por deslizamento. Gráficos de força de atrito por tempo. (a) Sistema polido. (b) Sistema lixado (c) Sistema lixado intermediário	148
Figura 5.63 -	Perfil dos componentes químicos ao longo da superfície da amostra F E2 após o ensaio de desgaste por deslizamento	149
Figura 5.64 -	Imagem por MEV da impressão de indentação Rockwell C em sistema Polido. Amostra F E3	150
Figura 5.65 -	Gráficos do comportamento da força de atrito por tempo. Média entre os sistemas polido (P), lixado (L1) e lixado intermediário (L2)	151
Figura 5.66 -	Gráficos do comportamento da força de atrito por tempo. Escala de tempo alterada para valor máximo de 10min. Média entre os sistemas polido (P), lixado (L1) e lixado intermediário (L2)	152
Figura 5.67 -	Imagens típicas da trilha e dos detritos após ensaio de desgaste por deslizamento (a) e (c) sistema lixado e (b) e (d) sistema polido. Imagens obtidas por MEV.	154
Figura 5.68 -	Imagens de perfilometria da trilha de desgaste após teste de desgaste esfera sobre disco. (a) Sistema polido (F) e (b) Sistema lixado (L1)	157
Figura 5.69 -	Tabela comparativa para os tamanhos das partículas de desgaste dos sistemas Polido (F) e Lixado (L1). Fotografias obtidas por MEV.	161
Figura 5.70 -	Volume total desgastado do conjunto esfera/corpo de prova por sistema estudado: Polido (F), Lixado (L1) e lixado intermediário (L2)	163

Figura 5.71 - Gráficos comparativos do comportamento da força de atrito por tempo para condições de ensaio com severidade maior e menor. Média entre os sistemas Polido (F), Lixado (L1) e Lixado intermediário (L2)	166
Figura 5.72 – Imagens comparativas de trilha e partículas de desgaste dos ensaios realizados com maior e menor severidade. Aumentos de 50, 150, 750 e 2000x	168
Figura 5.73 - Comparação entre ensaios de menor e maior severidade. Mapeamento de raios X para os elementos principais do corpo de prova e da esfera	172
Figura 5.74 - Média de volume total desgastado por microabrasão para cada sistema	176
Figura 5.75 - Média de volume total desgastado por microabrasão para sistemas recobertos	176
Figura 5.76 - Espessura média do recobrimento para cada sistema	177

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 -	Desvios permissíveis da forma cilíndrica (AGOSTINHO <i>et al</i> , 2004)	28
Tabela III.2 -	Combinações recomendáveis entre tipos de ferramenta de corte e material a ser usinado (CHILDS T <i>et al</i> , 2000)	41
Tabela III.3 -	Características básicas dos processos PVD (por evaporação e por <i>sputtering</i>) e CVD de deposição (BUNSHAH R. F, 2001 e MANCOSU, R.D., 2005)	59
Tabela III.4 -	Características de Sistema para Medição de Rugosidade em Três Dimensões (STOUT K. J., BLUNT L., 1994)	87
Tabela III.5 -	Seleção do comprimento de <i>cut off</i> de acordo com a norma DIN4768 (adaptado de MUMMERY L., 1992)	94
Tabela III.6 -	Ensaio de Desgaste Normalizados pela ASTM (BRESSAN J. D., 2007)	113
Tabela IV.7 -	(a) Parâmetros utilizados para o controle da rugosidade superficial do substrato. (b) Seqüência utilizada para cada sistema	117
Tabela V.8 -	Composição química das pastilhas de metal duro. (a) antes do recobrimento e (b) depois do recobrimento	131
Tabela V.9 -	Resultados das medidas de rugosidade tridimensional para os sistemas estudados antes e depois de recobrir	136
Tabela V.10 -	Tabela comparativa de dureza para os sistemas estudados	145

Tabela V.11 - Análise da composição química por EDS das amostras após ensaios de desgaste por deslizamento. (a) interior da trilha (b) partículas de desgaste (c) superfície desgastada da esfera. Análises gerais em percentual atômico	155
Tabela V.12 - Resultados de volume de desgaste para os sistemas estudados	161
Tabela V.13 - Resultado do volume de desgaste da esfera para cada sistema estudado	162
Tabela V.14 - Cálculo do coeficiente dimensional de desgaste para os três sistemas estudados (a) esfera (b) corpo de prova	164
Tabela V.15 - Resultados de análise e quantificação de elementos químicos presentes no ensaio de deslizamento esfera sobre disco com menor severidade. (a) interior da trilha (b) partículas de desgaste (c) superfície desgastada da esfera. Análises gerais em percentual atômico	173
Tabela V.16 - Cálculo do coeficiente dimensional de desgaste da esfera para os três sistemas estudados. Ensaio realizado em condições menos severas	175

LISTA DE NOTAÇÕES

a_p – profundidade de corte

ASTM – Sociedade Americana para Testes e Materiais (*American Society for Testing and Material*)

C – constante da equação de vida útil de ferramenta

CBN – nitreto cúbico de boro

CNC – comando numérico computadorizado

CVD – deposição química a vapor (*chemical vapour deposition*)

DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas UFMG

DLC – diamante como carbono (*diamond like carbon*)

DIN – Instituto Alemão para Normatização (*Deutsches Institut für Normung*)

EDS – espectrômetro de energia dispersiva de raios-X (*Energy Dispersive Spectrometer*)

f – avanço

HSM – máquina de usinagem rápida (*high speed machining*)

ISO – Organização Internacional para Normatização (*International Organization for Standartization*)

KT – profundidade do desgaste de cratera

k – coeficiente dimensional de desgaste

L1 – sistema conjugado com substrato lixado com lixa 220

L2 – sistema conjugado com substrato lixado a $9\mu\text{m}$ (lixado intermediário)

n1 - constante da equação de vida útil de ferramenta

n2 – constante da equação de vida útil de ferramenta

n3 - constante da equação de vida útil de ferramenta

P – sistema conjugado com substrato polido a $0,04\mu\text{m}$

PAPVD – deposição física a vapor assistida por plasma (*plasma assisted physical vapour deposition*)

PCD – diamante policristalino

PVD – deposição física a vapor (*physical vapour deposition*)

Ra – parâmetro de medida de rugosidade superficial

S – distância percorrida [m]

SAE – sociedade de engenheiros da indústria automobilística (*Society of Automotive Engineers*)

SEM – microscópio eletrônico de varredura (*Scanner Electronic Microscopy*)

T – vida útil de ferramenta de corte medida em minutos

TEM – microscópio eletrônico de transmissão (*Transmission Electronic Microscopy*)

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

V – volume desgastado [mm^3]

VB_B – parâmetro de medida para desgaste de flanco médio

$VB_{B_{\max}}$ – parâmetro de medida para desgaste de flanco máximo

VC - parâmetro de medida para desgaste de entalhe

V_c = velocidade de corte

VN - parâmetro de medida para desgaste de entalhe

W – carga aplicada [N]

WC – carbeto de tungstênio

RESUMO

Ferramentas de metal duro recobertas com CrAIN são usadas na indústria para usinagem de peças com alta dureza. A resposta ao desgaste destas ferramentas e suas implicações tribológicas quando alterado o perfil de rugosidade do substrato são objeto de estudo deste trabalho. Substratos de metal duro WC-Co (5%) foram lixados de modo a se obter três sistemas com rugosidades diferentes. Filme fino de revestimento de CrAIN foi depositado por PAPVD a uma espessura aproximada de 2,5 μ m. Foram feitos testes de desgaste pino sobre disco a uma velocidade linear de 0,21m/s (500rpm), carga de 40N e distância de deslizamento de 3.000m, usando como contracorpo esferas de Si₃N₄ de 6mm de diâmetro. Foi utilizada a técnica de perfilometria para caracterizar a rugosidade das amostras antes e depois do recobrimento. A mesma técnica foi utilizada para calcular o volume desgastado na trilha. Os resultados mostraram que o processo de desgaste é comandado por efeitos triboquímicos, envolvendo oxidação. Não foi evidenciada diferença significativa das taxas de desgaste entre os sistemas com rugosidade maior e menor, tanto para caso onde a severidade do ensaio foi maior quanto para condições menos severas de ensaio (carga de 15N e velocidade de 200rpm). O desgaste para o sistema polido foi associado ao perfil do tipo platô com alta densidade de picos por unidade de área superficial, que favorece a adesão de asperezas e um conseqüente mecanismo de desgaste severo, com surgimento de desgaste abrasivo devido a presença de partículas duras arrancadas do corpo de prova por fratura frágil. Foi constatada, por análises química e por microscopia óptica, a adesão de material da esfera na trilha e do corpo de prova na esfera.

Palavras chave: *revestimento CrAIN, rugosidade, metal duro, análise tribológica*

ABSTRACT

Hardmetal coated with CrAlN is a useful tooling for high hardness materials machining. Wear and its tribological consequences when modifying the initial roughness of the substrate is the subject of this paper. Hardmetal (WC 95%-Co 5%) was submitted to three different roughness by grinding and polishing. Sandpaper and polishing were used to modify surface roughness before coating. 3D profilometry was used to measure the roughness. After coating, dry pin on disc sliding wear test were done using a silicon nitride 6mm sphere as counter part. Normal force of 40N, rotation of 500rpm, and slide distance of 3.000m were chosen for the test parameters. The wear volume was measured by profilometry technique. The results showed that wear mechanism was driven by tribochemical effects (oxidation) in the specimen surface. There was not identified substantial difference wear rate for different roughness systems in sliding wear tests. The effect of the plato profile type with high density of asperities per area seems to have important role in the low wear performance. High asperities density increases adhesion and drives severe wear mechanism, observed mainly by wear powder analysis (particles size, quantity and chemical analysis), presence of sphere material in the wear track and friction load rates.

Keywords: hard metal, CrAlN coating, roughness, tribological analysis

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Usinagem é um dos processos de fabricação mais comuns e mais utilizados em todo o mundo. Nos anos entre 1985 a 1995, por exemplo, mesmo com a crise do petróleo ocorrida em 1981/1982, a demanda de equipamentos nesta área cresceu consideravelmente. Neste mesmo período, em alguns países desenvolvidos da comunidade europeia, chegou-se a dobrar os investimentos na indústria de fabricação de máquinas. Em países como Alemanha, Japão e Estados Unidos, gastou-se no ano de 1995 cerca de 2,6 a 3,9 bilhões de dólares em aquisições de equipamentos de usinagem (CHILDS T., 2000). No Brasil, acompanhando a tendência de crescimento da economia mundial na década de 2000, os meses de janeiro a agosto de 2007 foram marcados por um aumento de vendas de 11,7% na indústria de bens de capital mecânico. A indústria de máquinas ferramenta cresceu cerca de 4,2% no mesmo período (Revista Metal Mecânica – outubro 2007 edição 154).

Um cenário de crescimento econômico com conseqüente aumento de produção de bens de capital demanda utilização de processo de fabricação, como a usinagem, com alta produtividade. Aumento de desempenho das máquinas, boa integridade superficial da peça acabada, tolerâncias menores de fabricação, capacidade de usinagem de materiais avançados (compósitos, materiais de alta dureza etc), tudo isto a baixo custo, torna-se então de fundamental importância para garantir a competitividade.

Em termos de custos do processo de usinagem, KOPAC J. (1998) destaca os gastos com ferramentas e fluidos de corte. O gasto total com ferramentas, entre aquisição, tempo de troca e quebras, representam 35% do total de custos de produção, sendo que destes, apenas 3% são relativos à aquisição. Deste modo, uma redução de 30% nos custos com aquisição ou um aumento de sua vida útil em igual proporção, resulta em apenas 1% de redução de custo total de produção (KALSS W. *et al*, 2006). No entanto, estes custos não devem ser desprezados. A venda mundial de insertos de metal duro movimentou um mercado entre 5 a 6 bilhões de dólares no ano de 1994 e a cada ano é esperado um acréscimo de 2% na produção de ferramentas. A indústria metalúrgica americana gasta cerca de 1,5 bilhão de dólares por ano apenas com ferramentas de corte. Estes números justificam a preocupação da indústria de

fabricação em controlar melhor o gasto com aquisição, manuseio e estoque de ferramentas. Os caminhos adotados tem sido uma gestão especializada na utilização de ferramentas (conhecida como gerenciamento de ferramentas) e o desenvolvimento tecnológico de ferramentas de corte (MILLS B., 1996).

A preocupação de desenvolver tecnologicamente ferramentas de corte está associada não só a necessidade de redução de custos com este insumo, mas também ao próprio desenvolvimento das máquinas de usinagem. As máquinas de corte modernas possibilitam utilização de altas velocidades de corte, reduzindo tempos de produção e melhorando acabamentos superficiais. FALLBÖHMER P. *et al* (1996) descreveram que o desenvolvimento das máquinas de alta velocidade de usinagem, chamadas HSM, possibilitaram a expansão da utilização do fresamento na fabricação de peças para moldes e matrizes. BYRE G. *et al* (2003) discutiram a evolução tecnológica das máquinas de corte em um período de 50 anos. Máquinas modernas têm taxas de remoção de material que atinge níveis de 150 a 1.500cm³/min, com velocidades de corte que podem ultrapassar 8.000m/min e precisão abaixo de 10µm (máquinas convencionais), podendo chegar a faixas menores que 0,1µm (máquinas de ultraprecisão). A tendência é se projetar máquinas multifuncionais, que sejam capazes de integrar vários processos de fabricação distintos (torneamento, fresamento, furação etc), o que reduz ainda mais tempos improdutivos com trocas de ferramentas e transporte de peças, além de melhorar a qualidade superficial.

Deste modo, para acompanhar a evolução das máquinas de usinagem, foi necessário investir também em pesquisa e desenvolvimento em ferramentas de corte. MILLS B. (1996) descreve os principais avanços ocorridos em tecnologia de fabricação de ferramentas de corte para três classes diferentes de materiais: aços rápidos, metal duro e cerâmicos. Em todos os casos, foram observadas grandes evoluções na área de revestimento, com melhorias nas técnicas de deposição física a vapor (PVD) e deposição química a vapor (CVD).

A melhoria das técnicas de recobrimento e os benefícios da utilização de ferramentas revestidas contribuiu para o aumento da produção mundial de ferramentas com algum tipo de revestimento. KOPAC J. observou um decréscimo mundial, entre os anos de 1985 e 1995, de cerca de 43% na produção de ferramentas de corte de metal duro sem revestimento. Estas ferramentas foram gradativamente substituídas por

ferramentas com algum tipo de revestimento por ferramentas cerâmicas ou compostos de cerâmica e metal (cermet). KOPAC também observou que mais de 50% das ferramentas de aço rápido começaram a ser produzidas com revestimento. SHAW, M.C. (1984) e TRENT, E.M. (1984) estimaram que quase 40% de todas as ferramentas de corte utilizadas na indústria moderna são revestidas e que acima de 80% de todas as operações de usinagem utilizavam ferramentas de corte revestidas.

Os avanços na tecnologia de revestimentos não ocorreram somente no sentido de melhorar a resistência ao desgaste das ferramentas, aumentando sua vida útil e permitindo seu uso com máquinas de alta velocidade. Houve também uma preocupação de reduzir o uso de lubrificantes, através de revestimentos que resistam a trabalhos a altas temperaturas. Revestimentos com PVD mostraram-se efetivos neste quesito e também na melhoria do acabamento superficial de peças acabadas e aumento de produtividade na produção (BUNSHAH R.F., 2001).

O uso de revestimentos em ferramentas de corte tornou-se então mandatório para a melhoria de desempenho e produtividade da indústria de fabricação metal mecânica. Em operações de usinagem de maior severidade, ferramentas de metal duro revestidas são preferencialmente utilizadas devido ao custo-benefício equiparado com outros tipos de ferramentas. No entanto, para estes tipos de ferramentas, ainda existem problemas de desempenho, associados a falhas prematuras, seja por desgaste excessivo ou por quebras inesperadas.

Na maior parte das ferramentas revestidas, a falha tende a ocorrer com maior frequência devido a problemas de adesão do que por fenômenos de degradação do revestimento, tais como desgaste e/ou corrosão (HEINKE, W *et al.*, 1995). Em especial, tem-se observado problemas específicos na adesão de recobrimentos tribológicos em ferramentas de metal duro (ÁVILA, R. F, 2003), mas existem poucos estudos sobre a influência da rugosidade do substrato na resposta ao desgaste por deslizamento.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal estudar a influência da rugosidade superficial de substratos de metal duro no desempenho de ferramentas de corte revestidas com $(Cr_{1-x},Al_x)N$ através do processo de deposição física a vapor assistida por plasma (PAPVD). Para tanto, deve-se:

- produzir, através de polimento especial, substratos de pastilhas de metal duro com controle da rugosidade superficial (baixa rugosidade 3D);
- depositar por PAPVD recobrimentos de $(Cr,Al)_{1-x}N_x$ em ferramentas de metal duro de forma a se obter sistemas conjugados com alta adesão;
- proceder os testes de desgaste por deslizamento com alta severidade, utilizando pastilhas de metal duro, com diferentes rugosidades, e revestidas com $(Cr_{1-x},Al_x)N$;
- examinar o desempenho das pastilhas através da determinação do volume de desgaste obtido por perfilometria tridimensional e avaliação de parâmetros de desgaste e atrito ao longo do tempo.

CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Processo de Usinagem

Para a confecção de peças, vários processos de fabricação são utilizados na indústria. Dentre eles, destacam-se a fundição, soldagem, laminação, forjamento, estampagem, trefilação, embutimento, extrusão e a usinagem, que representa cerca de 60% a 70% do total dos processos (STOETERAU, 2004). Esta elevada participação em relação aos demais processos de fabricação pode ser em parte explicada devido a três fatores básicos: capacidade de alta precisão dimensional e acabamento superficial, versatilidade em fabricação de peças de tamanhos e complexidade variados e crescente produtividade, que assegura mercados atuais e garante busca de novos mercados (CHILDS, 2000).

A usinagem é um processo de fabricação caracterizado pela remoção de uma quantidade determinada de material da peça original (peça bruta). Esta remoção é feita com o auxílio de uma ferramenta, denominada ferramenta de corte. O produto final do processo é uma peça com formas e dimensões definidas. O material removido da peça original é denominado cavaco e é considerado material a ser descartado.

O processo de usinagem é utilizado nas seguintes situações na indústria:

- acabamento de superfícies de peças fundidas ou conformadas mecanicamente;
- obtenção de peculiaridades (saliências, reentrâncias, furos passantes, furos rosqueados, etc);
- fabricação seriada de peças a um custo mais baixo;
- fabricação de peças propriamente dita, a partir de um bloco de material metálico ou não-metálico.

De um modo geral, as principais operações de usinagem podem ser classificadas em:

- torneamento;
- aplainamento;

- fresamento;
- furação;
- brochamento;
- retificação.

Independente do processo de usinagem, deve-se obedecer a normas de projeto para fabricação de peças. A opção por qual processo utilizar passa pela necessidade da garantia de intercambialidade das peças fabricadas, ou seja, da possibilidade de se substituir peças de um conjunto mecânico por outras iguais, sem que seja preciso realizar ajustes suplementares. A intercambialidade, por sua vez, tem como premissa básica a precisão de fabricação, que é a correlação entre as dimensões reais e as indicadas no desenho de projeto. Em construções mecânicas e processos de fabricação, é impossível se conseguir grau de precisão de 100%, sendo assim, é preciso descrever os valores máximo e mínimo que uma dimensão poderá afastar-se do valor nominal de projeto. A correlação entre as medidas reais e as de projeto, dentro de uma tolerância (seja ela geométrica ou dimensional) pré-determinada, indica a qualidade de fabricação (NOVASKI, 1994).

A qualidade de fabricação dentro do processo de usinagem é influenciada diretamente por fatores como rigidez da máquina operatriz, pelo dispositivo para localização e fixação da peça, pelo sistema de fixação da ferramenta de corte, pela própria ferramenta de corte, pelas peças em bruto e pelo ambiente de trabalho. Durante a fabricação, todos estes fatores podem se alterar de maneira aleatória e/ou sistemática, introduzindo imperfeições na peça. A Tabela III.1 mostra um exemplo de adoção de tolerância de forma para fabricação de peças cilíndricas. No caso de fabricação em série, com fluxo contínuo do produto final, deve-se considerar ainda fatores como repetibilidade e acuracidade do processo produtivo. Peças fabricadas com má qualidade podem ser rejeitadas, gerando retrabalhos que são refletidos em alto custo de produção. Existe, portanto, uma correlação entre qualidade do produto final e o custo de produção (AGOSTINHO *et al*,1997).

Tabela III.1 – Desvios permissíveis da forma cilíndrica (AGOSTINHO *et al*, 2004)

MÁQUINA	PEÇA		DESVIO (0,001mm)		
	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Ovalização	Concavidade	Conicidade
Torno com altura entre centros					
até 180 mm	-	300	5	20	10
até 400 mm	-	300	10	20	20
até 1.000 mm	-	300	20	20	20
Torno revólver	-	-	10	20	30
Torno frontal	Até 300	300	30	60	30
Torno vertical com uma coluna usinando com cabeçotes transversais	Acima de 800	300	20	20	-
Torno vertical com uma coluna usinando com cabeçotes frontais	Acima de 800	1.000	20	-	-
Mandrilhadora vertical com dois cabeçotes	Até 300	300	20	20	20
Mandrilhadora vertical com dois cabeçotes	Acima de 300	1.000	30	30	30
Retificadora cilíndrica	-	300	5	-	10

Inúmeros trabalhos na literatura procuram relacionar e quantificar a influência dos parâmetros de usinagem na qualidade da peça final. Como exemplo, GOKKAYA *et al* (2007) variaram o raio de quina da ferramenta de corte, a taxa de alimentação e a profundidade de corte em uma operação de torneamento em aço AISI 1030, observando alterações na rugosidade superficial. CUNHA *et al* (2005) estudaram a influência do avanço na variação de rugosidade no torneamento de liga de alumínio AA7050. ROSSI *et al* (2005) utilizaram o método da regressão linear múltipla para interpretar a variação da rugosidade superficial em função da alteração do avanço, profundidade de corte e rotação de fuso em ensaios de fresamento de topo em aço ABNT 1020.

Devido à grande quantidade de variáveis que podem influenciar as dimensões e padrões geométricos (desvios de forma e posição) das peças usinadas, vários outros trabalhos foram realizados na tentativa de prever a influência destes parâmetros na qualidade final das peças acabadas. BERNANDOS *et al* (2003) segregaram estes trabalhos em quatro grandes grupos de acordo com o tipo de abordagem e linha de atuação de cada um deles: teoria da usinagem, investigação experimental,

experimentos de projetos e inteligência artificial. A separação dos grupos foi criteriosa e difícil, pois existem muitos trabalhos a respeito e vários utilizam técnicas características de mais de um tipo de abordagem. Um fato importante a ser citado é que, apesar do avanço nos estudos para prever com determinada exatidão comportamentos durante o processo de usinagem, a solução para melhorar a precisão e qualidade da peça acabada ainda depende de desenvolvimentos tecnológicos do processo de fabricação propriamente dito.

3.1.1 – Torneamento

No torneamento, normalmente a matéria prima tem a forma inicial de um cilindro. A forma final é cônica ou cilíndrica. Na operação de corte, a ferramenta executa movimento de translação, enquanto a peça gira em torno de seu próprio eixo. A Figura 3.1 exemplifica alguns tipos de operações de torneamento.

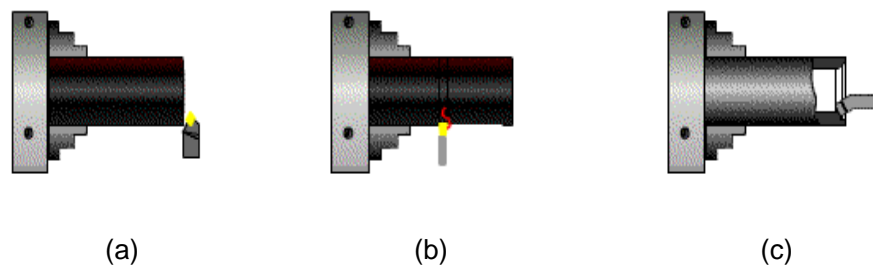


Figura 3.1 - Exemplos de operações de torneamento: (a) torneamento externo (b) sangramento superficial (c) torneamento interno.

O equipamento utilizado para executar a tarefa de torneamento chama-se torno. Desde as civilizações antigas (assírios, romanos e egípcios) tem-se notícia do uso do torno para confecção de peças. Este equipamento sofreu várias modificações ao longo do tempo, como a introdução da velocidade constante (tornos de fuso), sua mecanização, (com a invenção da máquina a vapor e posteriormente motores elétricos), possibilidade de variação de velocidade de usinagem e automação, além da introdução de novos movimentos (avanço transversal) e surgimento de vários dispositivos e acessórios (carro ferramenta, porta-ferramenta etc). Hoje em dia

existem os tornos chamados CNC (comando numérico computadorizado). Estes são equipamentos que, apesar de sofrerem poucas modificações mecânicas desde de 1978, apresentam movimentos controlados por microprocessadores. Através de painéis, é possível programar movimentos que são armazenados e executados automaticamente, promovendo ganhos de produtividade. Os tornos modernos possuem cinco sub-sistemas básicos: suporte, fixação da peça, fixação e movimento da ferramenta, avanço e acionamento principal.

3.1.1.1 – Parâmetros de Usinagem no Torneamento

São três os parâmetros de usinagem no torneamento que praticamente definem o processo: o movimento relativo entre a ferramenta e a peça, que é denominado velocidade de corte (V_c) (também descrito como a taxa de retirada de material da peça); o movimento relativo da ferramenta em direção ao centro da peça bruta, denominado avanço (f) e o movimento relativo da ferramenta na direção transversal da peça a ser trabalhada, denominado profundidade de corte (a_p). Os três parâmetros são ilustrados na Figura 3.2.

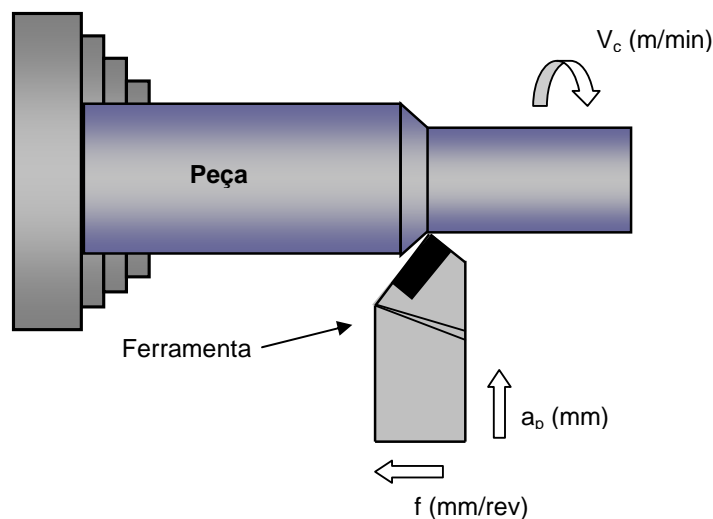


Figura 3.2 - Croqui com principais parâmetros de torneamento: velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p).

A seleção eficiente dos parâmetros de usinagem (avanço, profundidade e velocidade de corte) representam um impacto direto nos custos do processo. Desde 1907 que há estudos sobre o assunto, sempre na tentativa de se obter parâmetros ótimos, que minimizem gastos e aumentem a produtividade. Todos os estudos desenvolvidos empregaram diferentes métodos matemáticos, desde cálculo diferencial até a programação com restrições de ocorrência de eventos (MESQUITA N. G. M.; BATISTA A. J., 2007). SHABTAY D. *et al* (2002) desenvolveram um algoritmo que combina menor tempo-ciclo, menor custo por peça e máxima taxa de utilização da máquina para o cálculo do avanço e velocidade de corte ótimos, adotando a estratégia de máxima utilização da ferramenta de corte (até a sua falha). Recentemente, MESQUITA N. G. M *et al* (2007), formularam novas equações e desenvolveram um *software* como parte integrante de um sistema de projeto e manufatura assistidos por computador.

3.1.1.2 – Mecanismo de Formação do Cavaco

Definido como material retirado da peça bruta durante o processo de usinagem, o cavaco pode ser classificado segundo seu formato ou a sua classe. Quanto ao formato, existem os cavacos em forma de fita, helicoidal, espiral e em lascas (pedaços). Quanto a classe, podem ser contínuos, parcialmente contínuos, descontínuos e segmentados (MACHADO A. R., 2007). O grande problema da formação dos cavacos concentra-se, tanto sob o ponto de vista econômico quanto sob aspectos de segurança, nos tipos contínuos com grande comprimento.. MACHADO A. R. (2007) descreve alguns dos principais inconvenientes deste tipo de cavaco:

- baixa densidade efetiva, que faz com que ocupem muito espaço, causando problemas econômicos no manuseio e no processo de descarte ou reaproveitamento;
- podem se enrolar em torno da peça, da ferramenta ou de componentes da máquina, representando um risco à integridade de operadores, pois estão a temperaturas elevadas e têm arestas afiadas;

- quando eles se enrolam na peça, apesar de afetar pouco o acabamento superficial, produzem uma superfície não atrativa, e podem causar danos à ferramenta;
- podem impedir o acesso regular do fluido de corte (efeito guarda-chuva);
- na usinagem com fluidos de corte, os cavacos levam consigo grande quantidade de fluido, necessitando constante controle nos níveis dos tanques;
- uma vez enrolados em algum componente, precisam ser removidos para a continuidade da produção, aumentando o tempo total de produção.

Evitar a formação do tipo de cavaco contínuo e longo é de grande interesse da indústria. Porém, não existe domínio total sobre o surgimento e crescimento dos cavacos. Sua formação é influenciada por uma série de fatores que, combinados ou não, alteram consideravelmente a sua forma e tipo. Pode-se citar pelo menos os seguintes fatores que influenciam diretamente a formação dos cavacos:

- geometria da ferramenta: ângulo de saída, ângulo de posição, raio da quina, ângulo de inclinação do gume, presença de “quebra cavaco”;
- material da ferramenta: resistência ao desgaste, atrito na superfície de saída;
- parâmetros de corte: avanço, profundidade e velocidade;
- fluido de corte;
- material da peça a ser usinada

CHILDS T. *et al* (2000) enfatizaram que, dentre os fatores citados, os principais são o ângulo de corte, o atrito (alterado fortemente pela utilização de fluido de corte) e a severidade do trabalho (tensões cisalhantes atuantes). A Figura 3.3 mostra, para um tipo de aço usinado a baixa velocidade (menos que 1 m/mm), a influência da utilização do fluido de corte no formato do cavaco. A situação (a), sem utilização de fluido de corte, mostra um cavaco espesso e reto e a (b), com fluido de corte aplicado diretamente na face de corte da ferramenta, mostra um cavaco mais fino e enrolado.

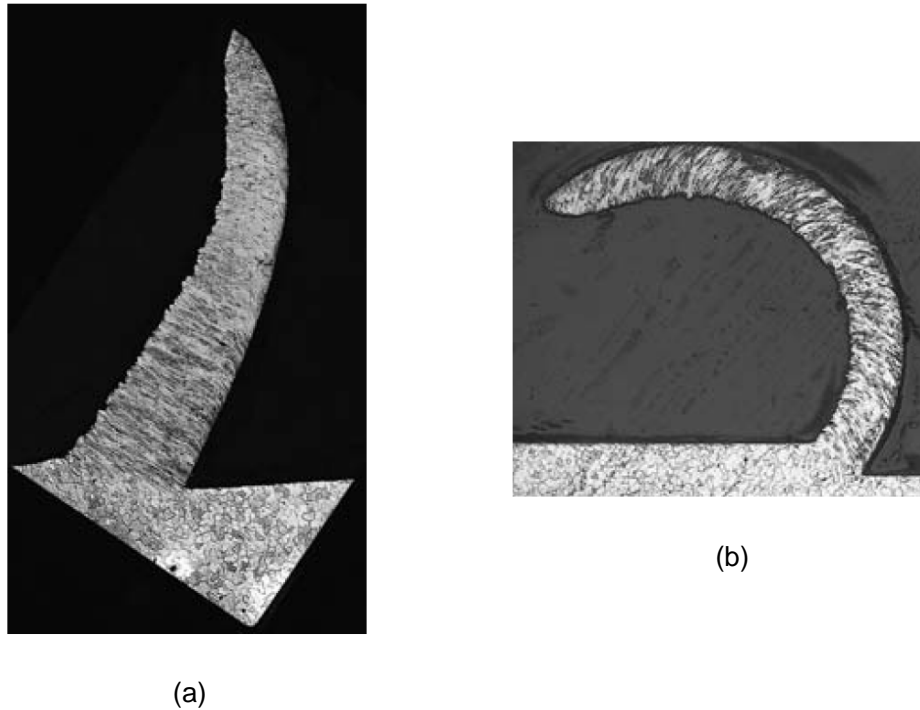


Figura 3.3 - Influência do fluido de corte no formato do cavaco em usinagem de aço carbono a baixa velocidade de corte: (a) sem fluido de corte e (b) com fluido de corte (CHILDS T. *et al*, 2000).

Apesar de ser um processo complexo, com influência de muitos parâmetros, a formação do cavaco pode ser descrita com tendo pelo menos quatro etapas distintas e subseqüentes:

- 1) recalque do material da peça contra a face da ferramenta, onde ocorrem as deformações elásticas;
- 2) material recalcado sofre deformação plástica que aumenta progressivamente até atingir a tensão de cisalhamento necessária ao deslizamento. Inicia-se o deslizamento do material recalcado segundo os planos de cisalhamento. Os planos instantâneos definem uma região entre a peça e o cavaco denominada região de cisalhamento;

- 3) com a continuidade da penetração da ferramenta (movimento relativo) ocorre a ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo das condições de usinagem e ductilidade do material;
- 4) com a continuidade do movimento relativo (peça/ferramenta) ocorre o escorregamento da porção de material deformado e cisalhado (cavaco) sobre a face da ferramenta. O processo se repete sucessivamente com o material adjacente.

3.1.1.3 – Geração de Calor Durante o Processo

A geração de calor durante o torneamento acontece devido ao trabalho executado para remover o cavaco da peça. Praticamente toda energia utilizada para recalcar o material, deslizá-lo pela superfície de cisalhamento, rompê-lo e promover o deslizamento da ferramenta sobre a nova superfície da peça, a uma alta taxa de deformação e elevadas tensões de cisalhamento, é convertida em calor. Este calor pode ser observado em três zonas principais de aquecimento, conforme observado na Figura 3.4 (SUTTER G.; RANC N., 2007).

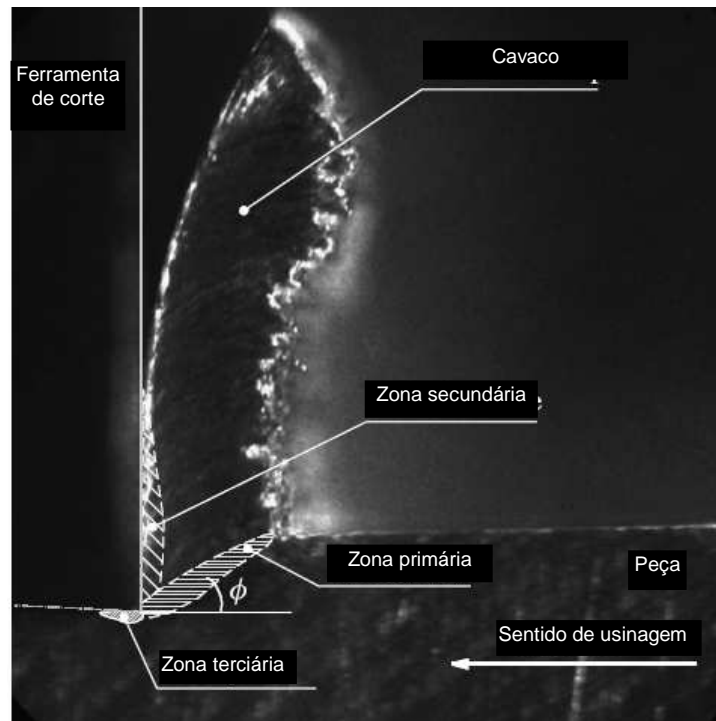


Figura 3.4 - Zonas de calor gerado em processo de usinagem ortogonal: zona primária, zona secundária e zona terciária (SUTTER G.; RANC N., 2007).

O aumento de temperatura acontece primeiro na zona primária, onde há alta deformação por cisalhamento. O calor gerado na zona secundária é consequência da deformação do cavaco que ocorre ao longo da face da ferramenta. Na zona terciária, aparece aquecimento devido à deformação elástica e ao contato entre o flanco da ferramenta e a superfície usinada da peça.

A dissipação do calor gerado ocorre basicamente por quatro meios, além do próprio ambiente externo: pela peça usinada, pela ferramenta de corte, pelo cavaco e pelo fluido de corte. O fluido de corte pode atuar sob dois aspectos distintos: como fluido lubrificante, que diminui o trabalho de corte e reduz a geração de calor, ou como fluido refrigerante, que efetivamente retira o calor gerado durante o processo (SILVA M. B.; WALLBANK J., 1999)

SUTTER G.; RANC N. conseguiram determinar, em tempo real, campos de temperatura em cavaco proveniente de usinagem de um aço baixa liga. Foram

simuladas situações de torneamento a altíssima velocidade de corte (entre 15 e 65m/s), utilizando corte ortogonal. Neste trabalho, foi também observado que o aumento de velocidade de corte parece deslocar o ponto de máxima temperatura medida no cavaco.

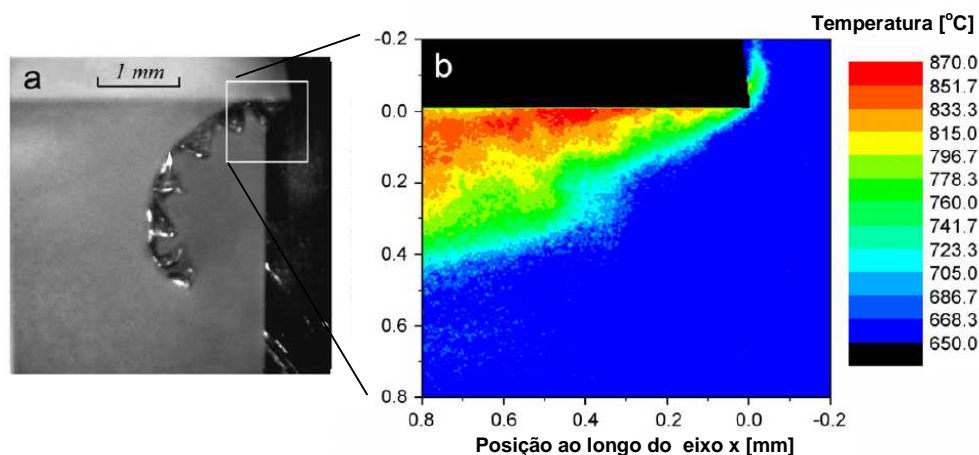


Figura 3.5 - Campos de temperatura gerados no cavaco durante o torneamento de aço baixa liga (a) fotografia em tempo real e (b) campos de temperatura (SUTTER G.; RANC N., 2007).

A quantidade de calor gerada em cada zona depende de vários fatores, como propriedades da peça (ductilidade, dureza, propriedades térmicas etc), propriedades da ferramenta de corte (material, geometria etc) e parâmetros de usinagem. GRZESIK W. e NIESLONY P. (2004), em um trabalho de modelamento de temperaturas da interface ferramenta cavaco, colocam que a distribuição do calor entre ferramenta e cavaco pode ser determinada analiticamente através do coeficiente de divisão do calor (R). Este coeficiente define qual a porcentagem de calor que vai para o cavaco. O índice $(1-R)$ define qual a porcentagem é dissipada pela ferramenta. Para este modelo analítico, existem pelo menos três métodos para calcular o coeficiente R , todos propostos por pesquisadores diferentes: Kato e Fuji, Shaw e Reznikov. Independente do método de cálculo, EZUGWU E. O. (1993) descreve que cerca de 80% do calor fica no cavaco, enquanto o restante fica na ferramenta. Apenas uma pequena parcela (2%) fica na peça usinada.

Predizer zonas térmicas de aquecimento e as temperaturas máximas durante o processo de fabricação é de extrema importância para tentar maximizar qualidade e custo de produção. A temperatura, como é influenciada pelos parâmetros de usinagem, acaba por desempenhar um papel importante na própria definição destes parâmetros. Modelos teóricos existem para realizar simulações, mas não são raras as discrepâncias encontradas entre valores calculados por métodos analíticos e métodos experimentais.

SILVA M. B. e WALLBANK J. (1999) fizeram uma revisão dos métodos de medição e dos modelos analíticos existentes para medir e prever a distribuição de temperatura no processo de usinagem. Como método de medição, a utilização de termopares é o mais comum. Recentemente, tem-se feito algumas tentativas de utilização de termopares de filmes finos (BASTI *et al*, 2006). Sua restrição é a baixa resistência a altos gradientes de temperatura. Dos métodos não intrusivos, o infravermelho se destaca. Métodos indiretos também já foram aplicados, como medição de variação de microestrutura e microdureza. Os métodos numéricos, como elementos finitos, diferenças finitas e métodos híbridos são os que mais se desenvolveram para resolver problemas relacionados com cálculo de temperaturas durante a usinagem.

Ao se tentar prever e controlar a geração de calor, busca-se indiretamente controlar melhor a vida útil da ferramenta de corte. A altas temperaturas pode ocorrer um processo catastrófico onde há uma rápida evolução do desgaste, que, por sua vez, aumenta a fricção e favorece o aumento da temperatura. Porém, altas temperaturas também podem afetar a integridade da superfície da peça usinada. Este efeito, em algumas situações, pode ser até mais danoso do que a redução da vida da ferramenta.

3.1.1.4 – Ferramentas de Corte

A ferramenta de corte passou por muitas evoluções desde a existência dos cinzéis manuais até os dias atuais (Figura 3.6). A necessidade de maior durabilidade e eficiência na operação de torneamento motivou estas modificações. As primeiras alterações aconteceram na geometria da ferramenta e depois começaram as evoluções nos materiais de sua fabricação. O passo seguinte foi o desenvolvimento

dos melhores desenhos em conjunto com materiais mais resistentes, obtendo características favoráveis de custo de fabricação, desempenho e redução de paradas no processo produtivo relacionadas a trocas de ferramentas. Foi consagrado então o uso de ferramentas compostas, onde o elemento de corte constitui-se de uma pastilha montada em uma base com seus respectivos elementos de fixação.

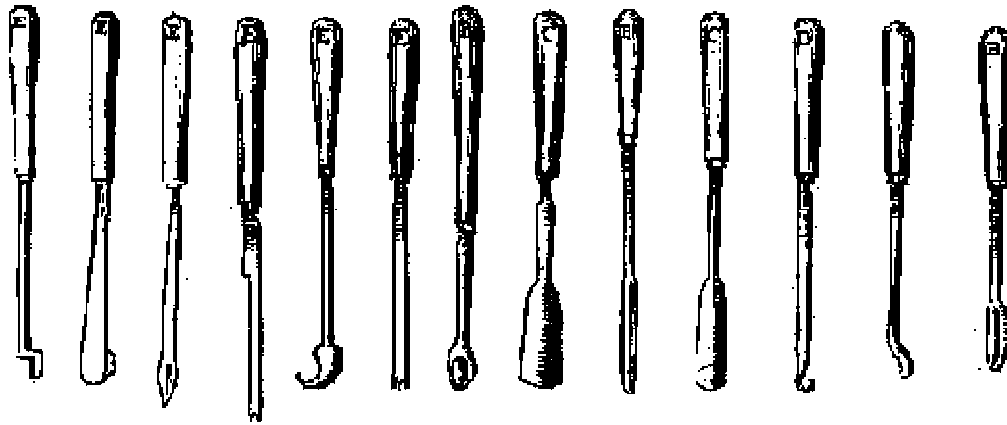


Figura 3.6 – Exemplo de modelos de ferramentas de tornear – cinzeis manuais. Ano de 1680.

Existem vários tipos de ferramentas e meios de fixação da mesma em sua base. As ferramentas podem ter diferentes geometrias e sua aplicação depende, entre outros fatores, da peça a ser usinada, do tipo de operação de torneamento (externo, interno, faceamento, desbaste etc), do custo e da produtividade desejada. A Figura 3.7 mostra alguns tipos de formato de ferramentas.

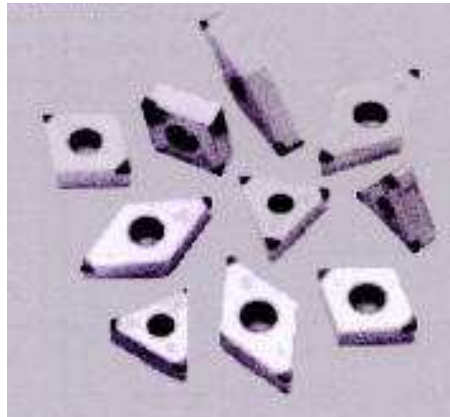


Figura 3.7 – Exemplos de tipos de formato de ferramentas (ABRÃO A. M. *et al*, 2009)

a) Elementos

As ferramentas de geometria definida, que têm como exemplo uma ferramenta de tornear simples, apresentam três elementos que a caracterizam: sua superfície, seus gumes e suas quinas. Os elementos são usados como referência para a determinação dos ângulos de uma ferramenta. A Figura 3.8 exemplifica os elementos de cunha e de corte para uma ferramenta de tornear.

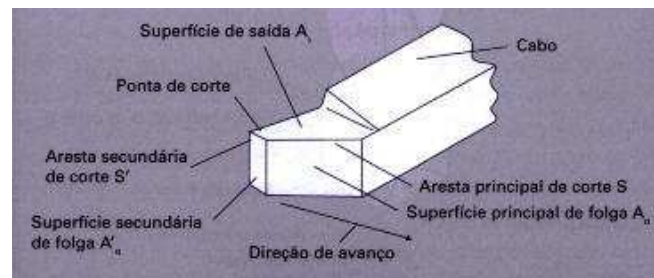


Figura 3.8 - Elementos de cunha e de corte de uma ferramenta de tornear (ABRÃO A. M. *et al*, 2009)

b) Material

O tipo de material utilizado para fabricação das ferramentas de corte evoluiu de acordo com a necessidade da indústria de prover soluções para usinagem de peças fabricadas. MILLS B.(1996) descreve que esta evolução coincide com momentos de desenvolvimento históricos, como o grande crescimento de produtos de consumo e transporte ocorrido no início do século passado, que possibilitou o desenvolvimento das ferramentas de aço rápido. Outros momentos também foram decisivos, como o crescimento de fabricação de produtos militares e para construção civil na década de 1930, que impulsionou o desenvolvimento de ferramentas de metal duro e, mais recentemente, o surgimento de máquinas ferramenta com controle numérico e a necessidade de usinar materiais de extrema dureza, possibilitou o salto de desenvolvimento de ferramentas de diamante policristalino, nitreto cúbico de boro, cerâmicos e compósitos.

Para se fabricar uma ferramenta de corte, é necessário que o seu material atenda a alguns requisitos básicos (ABRÃO *et al*, 2009):

- alta dureza;
- tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- alta resistência ao desgaste abrasivo;
- alta resistência a compressão;
- alta resistência ao cisalhamento;
- boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas;
- alta resistência ao choque térmico;
- alta resistência ao impacto;
- ser inerte quimicamente.

Diante disto, as ferramentas podem ser divididas, segundo o material empregado, em oito tipos diferentes, sendo eles (ABRÃO *et al*, 2009):

- aço ferramenta (aço carbono e aços ligados)
- aço rápido
- ligas fundidas
- metal duro

- cermets
- cerâmicas
- materiais ultraduros (nitreto cúbico de boro, diamantes mono e policristalino)

Existem classificações mais simples, como a utilizada por MILLS (1996) que separa as ferramentas em apenas três grandes grupos: aço rápido, metal duro e cerâmicos. Estes últimos incluem os materiais super duros, como compósitos, diamantes e nitreto cúbico de boro. Já CHILDS T. *et al* (2000) sugerem que as ferramentas de metal duro e as cerâmicas podem ser subdivididas em outros tipos, dependendo da composição. As de metal duro, por exemplo, podem ser divididas em carbetos de tungstênio (WC) ou uma mistura de WC com outros carbetos, como titânio e tântalo.

Cada tipo apresenta suas particularidades, sendo utilizado em diferentes situações e aplicações. A evolução dos materiais das ferramentas ajudou a permitir maior flexibilização inclusive entre processos diferentes de usinagem. CALDEIRA (2005), por exemplo, provou ser possível que um processo típico de retificação fosse realizado em um torno alterando-se o tipo de pastilha a ser utilizado: de nitreto cúbico de boro para cerâmica.

A Tabela III.2 mostra alguns exemplos de aplicação dos tipos de ferramenta de corte em relação ao material a ser usinado.

Tabela III.2 – Combinações recomendáveis entre tipos de ferramenta de corte e material a ser usinado (CHILDS T. *et al*, 2000)

	Não-ferrosos macios (Al, Cu)	Aço carbono baixa liga	Aço ferramenta e matrizes	Ferro fundido	Ligas a base de níquel	Ligas de titânio
Aço rápido	○ ⊗	○ ⊗	×	⊗ ×	⊗ ×	⊗ ×
Metal duro (inclusive revestido)	○	√ ○	⊗	√ ○	√	○
Cermet	√ ⊗	√	×	×	×	×
Cerâmico	×	√ ○	○	√	√ ○	×
Nitreto cúbico de boro (CBN)	√ ⊗	×	√	√ ○	√ ○	○
Diamante policristalino (PCD)	√	×	×	×	×	√

Legenda: √ bom; ○ aceitável sob condição; ⊗ não recomendado; × evitar

c) Processos e mecanismos de falha

Processos de falha em ferramentas de corte, apesar de serem numerosos, podem ser divididos em dois grupos principais, de acordo com a evolução da própria falha e de sua escala. São eles: desgaste e fratura. O desgaste é associado à perda de material de modo contínuo. Fratura, por sua vez, é associada à falha repentina, de maiores proporções que o desgaste. A Figura 3.9 mostra alguns modos de falha típicos que podem ocorrer em ferramentas de corte e a Figura 3.10 mostra um exemplo de ferramentas com falhas ocorridas em sua face, flanco e aresta de corte. Nesta última, as condições de usinagem e o tipo de material a ser usinado diferem entre si nas fotografias apresentadas. Na foto (a), uma super liga a base de níquel foi torneada utilizando-se ferramenta cerâmica. Na foto (b), uma peça de aço carbono foi torneada utilizando-se uma ferramenta cerâmica de nitreto de silício. Pode-se observar que as falhas ocorreram de diferentes formas, sob diferentes mecanismos.

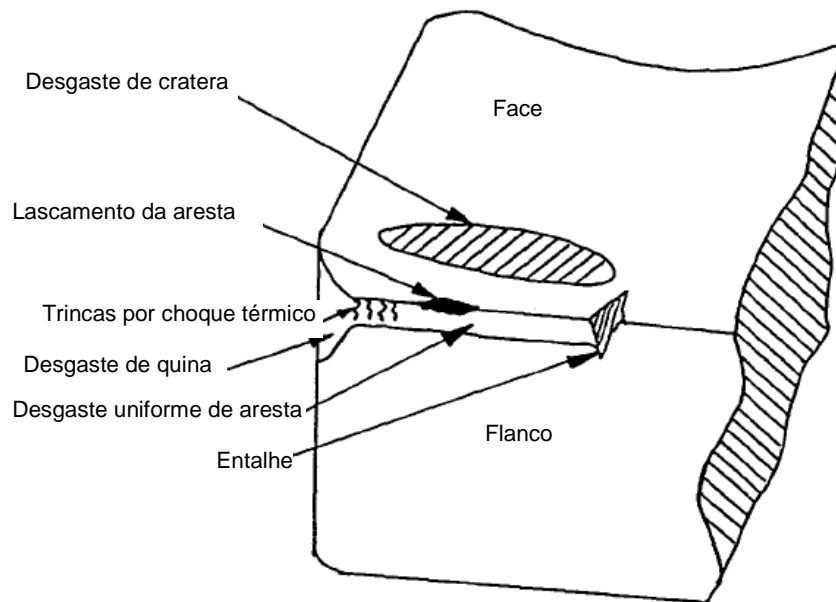


Figura 3.9 – Modos de falha em ferramentas de corte (MILLS B., 1996)

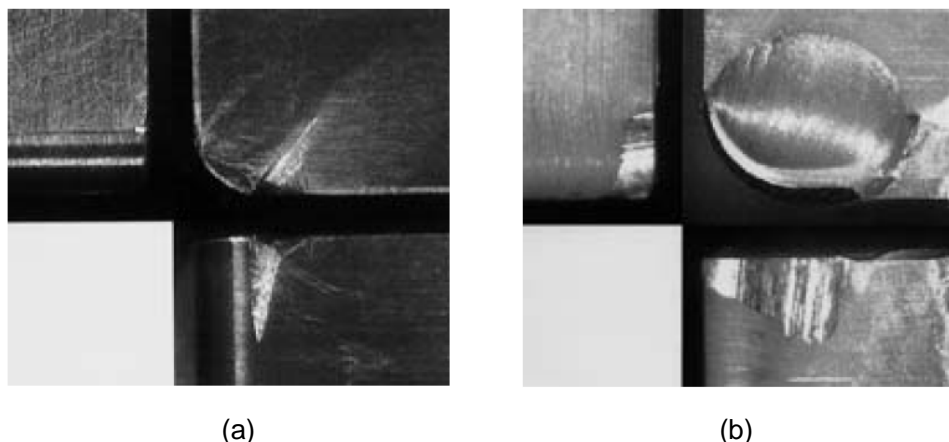


Figura 3.10 – Falhas típicas em ferramentas de corte. (a) ferramenta: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ (cerâmica), $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,19$ mm/rev, $t = 0,5$ min (b) ferramenta: Si_3N_4 (cerâmica), $V_c = 300$ m/min, $a_p = 1,0$ mm, $f = 0,19$ mm/rev, $t = 1$ min. (CHILDS T. *et al*, 2000)

As causas da falha em ferramenta de corte variam desde o tipo de material a ser usinado até o modo e condições de corte. MILLS B. (1996) comenta que o desgaste de cratera ocorre devido a interação química entre a face da ferramenta e o cavaco, que as trincas por choque térmico são causadas por um grande gradiente de temperatura existente na aresta de corte e que o lascamento e entalhe de material da aresta são conseqüências de fratura localizada. KOPAC J. (1998) descreve que o desgaste de ferramentas de corte é uma combinação de processos químicos e físicos, resultante de interações entre a ferramenta, a peça a ser usinada e o próprio meio ambiente. SOKOVIC M.; NAVINSEK B. (1993) estimaram que cerca de 50% do desgaste total ocorrido em uma ferramenta de corte é devido à abrasão, 20% à adesão, 10% à ações químicas e os 20% restantes são devidos à todos os outros mecanismos, especialmente difusão.

Compreender plenamente como ocorrem as falhas, seus mecanismos e formas, principalmente em usinagem sob condições severas de corte, ainda é um desafio na literatura. A complexidade da análise e a interação entre diversos fatores dificultam o entendimento, mas seu estudo constante faz-se necessário para adequar parâmetros de processo e reduzir problemas. Pensando nisto, MELO A. C. A. *et al* (2005) fizeram

uma revisão dos principais processos e mecanismos de falha que ocorrem em ferramentas de metal duro. Neste trabalho, é colocado que a temperatura tem papel fundamental no processo de desgaste, influenciando diretamente o processo de falha. CHOW J.G. e WRIGHT P.K (1998) mostram isto de forma mais evidente através da Figura 3.11, que ilustra o crescimento exponencial do desgaste e a variação qualitativa de seus mecanismos com o aumento da temperatura de corte.

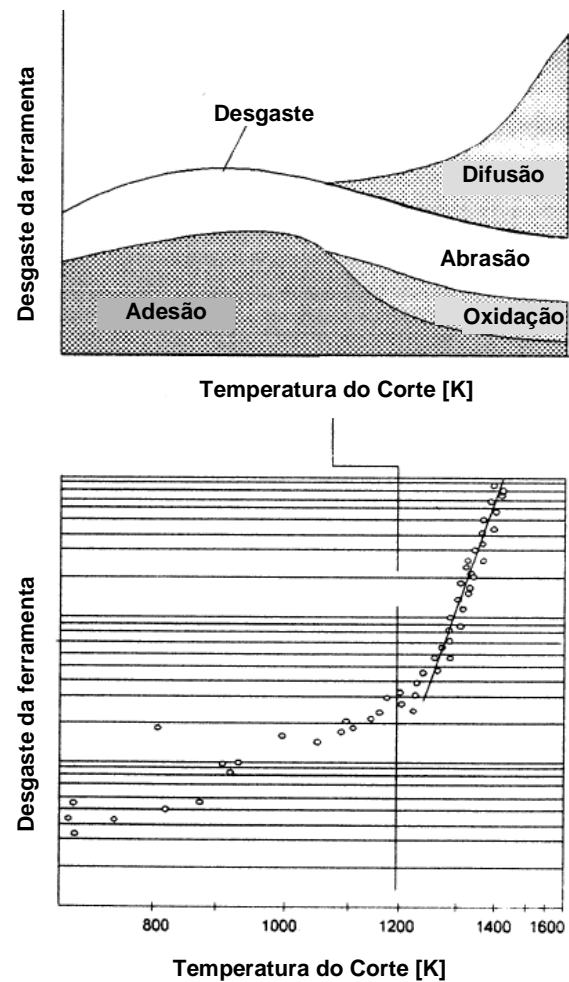


Figura 3.11 – Variação do desgaste com o aumento da temperatura de corte (CHOW J.G.; WRIGHT P.K., 1998)

CHILDS T. *et al* procuraram associar em um único gráfico o desgaste, os possíveis mecanismos de falha e suas conseqüências com o aumento da temperatura de corte (Figura 3.12).

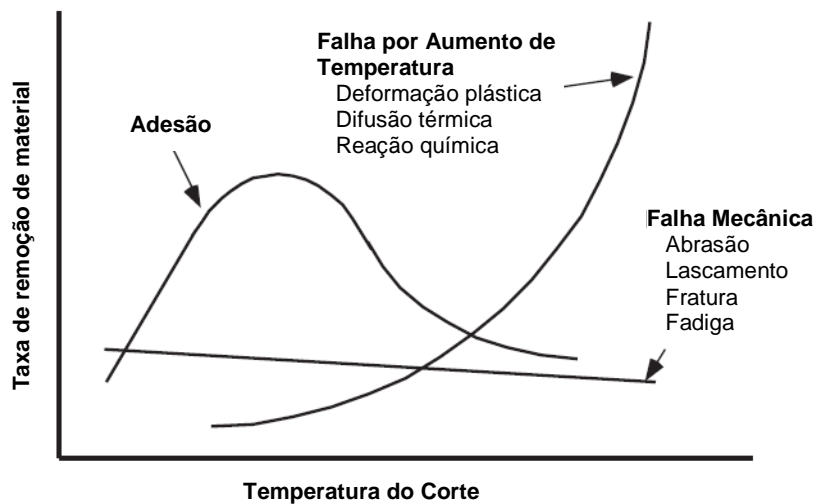


Figura 3.12 – Variação do desgaste com o aumento da temperatura de corte (CHILDS T. *et al.*, 2000)

Tanto CHILDS quanto CHOW mostram que os mecanismos de desgaste se alteram com a temperatura. À medida que a mesma aumenta, a falha da ferramenta tem maior probabilidade de ocorrer, pois tende a aumentar o desgaste de forma exponencial.

A falha por deformação plástica devido ao aumento da temperatura ocorre em situações em que existam altas temperaturas de corte combinadas com altas tensões de compressão na aresta de corte (aços rápidos em geral e ferramentas de metal duro com alta porcentagem de cobalto). A dureza é sensível a altas temperaturas e as deformações plásticas resultantes na aresta lideram o processo de colapso e posterior falha.

A falha por difusão devido ao aumento da temperatura ocorre quando tanto a ferramenta quanto a peça a ser usinada apresentam elementos que, a alta temperatura, permeiam pelos dois materiais. Este fenômeno foi estudado no passado em ferramentas de metal duro e é dependente também da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fusão. Normalmente há transferência de carbono, tungstênio e cobalto para a peça enquanto ferro da peça se transfere para a ferramenta, fazendo com que a mesma perca sua resistência mecânica progressivamente. Foi observado

que as taxas que comandam a difusão aumentam exponencialmente com o inverso da temperatura absoluta, o que ajuda a explicar o comportamento do gráfico proposto por CHILDS *at al.* O mecanismo de desgaste por difusão pode acarretar formas de falha de desgaste de flanco e desgaste de cratera. Uma das maneiras mais utilizadas na atualidade para minimizar a difusão entre os materiais durante a usinagem é a utilização de revestimentos, que atuam como barreiras físico-químicas.

A reação química é outro fenômeno crítico a altas temperaturas. Ocorre quando elementos da ferramenta reagem com elementos da peça ou com o próprio meio ambiente, sendo carreados para fora da ferramenta através do cavaco. Um exemplo típico e que é bem estudado é a oxidação, tanto da peça quanto da ferramenta. Este fenômeno resulta principalmente no desgaste de cratera, usualmente observado em ferramentas de metal duro, quando a usinagem ocorre a altas velocidades de corte.

Através da Figura 3.12, pode-se observar que a falha por adesão tem a probabilidade de ocorrer com maior intensidade em uma faixa intermediária de temperatura. Este fato é explicado pela presença de fluxo mais laminar de material a altas temperaturas do que em temperaturas mais moderadas, onde a mesma não é suficiente para provocar difusão ou deformação plástica na ferramenta de corte. Sua intensidade será tanto maior quanto menor for a resistência mecânica da ferramenta e quanto maior forem os fatores que tendam a aumentar o fluxo não laminar, como baixa rigidez da máquina ferramenta, usinagem de peças muito esbeltas e baixos valores de velocidade de corte e avanço.

A Figura 3.12 mostra ainda um comportamento quase independente da probabilidade de aumento de desgaste e conseqüente falha mecânica (abrasão, lascamento, fratura e fadiga) à medida que a temperatura aumenta. Estes mecanismos são mais fortemente influenciados por outros fatores, como condições de corte (parâmetros e usinagem interrompida), presença de inclusões não metálicas duras (seu tipo, tamanho e concentração) no material a ser usinado e geometria da ferramenta de corte.

É importante enfatizar que os processos de difusão e reação química não são causas diretas de falha nas ferramentas. Eles enfraquecem a superfície e proporcionam

condições de mecanismos como abrasão e adesão acontecerem mais facilmente, proporcionando assim a remoção de material e conseqüente falha.

A compreensão dos processos de desgaste e fratura justificam a importância da busca de desenvolvimento de materiais para ferramentas de corte que sejam resistentes aos mecanismos de falha associados. Portanto, propriedades como tenacidade à fratura e resistência ao desgaste são sempre preteridas em ferramentas. No entanto, não se deve descartar a importância das propriedades termoquímicas.

d) Vida útil

À medida que a falha na ferramenta evolui, sejam ela por desgaste ou fratura, a superfície da peça usinada vai perdendo precisão em termos de rugosidade e dimensões finais. Tolerâncias podem não ser atingidas e peças inteiras podem ser perdidas por falta de qualidade final, gerando retrabalho e elevação dos custos. Para não perder produtividade, algum critério de falha deve ser adotado para decidir qual o melhor momento de se trocar uma ferramenta usada por uma nova, com melhores condições de uso. Este critério deve levar em conta a vida útil máxima possível da ferramenta, ou seja, o maior tempo possível em operação sem que haja danos na superfície da peça usinada.

Para determinar o fim de vida útil da ferramenta, a norma ISO 3685 (1993) propõe a quantificação dos modos de falha através de parâmetros (Figura 3.13). Dependendo da predominância de um mecanismo de falha sobre os demais, um determinado parâmetro é escolhido para acompanhar a vida da ferramenta. Utiliza-se o valor de KT para quantificar o desgaste de cratera, VB_B para o desgaste de flanco médio, VB_{Bmax} para o desgaste de flanco máximo e VC e VN para quantificar o desgaste de entalhe. Os valores dos parâmetros adotados como critério de fim de vida variam para cada tipo e situação de usinagem, mas existem alguns que normalmente são mais utilizados, como KT variando de 0,05 a 0,1mm (CHILDS T *et al* 2000).

Com a finalidade de tornar mais prático o entendimento dos mecanismos de desgaste, associando-os às formas de desgaste, é utilizado um recurso gráfico denominado mapa de desgaste. Um mapa é construído a partir de dados experimentais em testes

com parâmetros controlados para determinadas situações de usinagem (parâmetros e forma de usinagem, material da peça bruta, lubrificação etc). Os valores dos parâmetros de desgaste são medidos criteriosamente e os domínios são plotados em gráficos onde os eixos são respectivamente a velocidade de corte e o avanço. A Figura 3.14 mostra um exemplo de mapa de desgaste elaborado por LIM C. Y. H *et al* (2001). Os mapas são utilizados para orientar os fabricantes quanto a quais são as velocidades de corte e avanço ótimos de trabalho, de modo que as taxas de desgaste sejam as menores possíveis. A zona de segurança indica os valores de velocidade de corte e avanço onde a taxa de desgaste do flanco é mínima. Hoje, a associação entre parâmetros de usinagem e desgaste em ferramentas pode ser feita através de sistemas inteligentes, que desempenham a tarefa de forma automática, minimizando custos de produção por peça e aumentando a produtividade (AREZOO B. *et al*, 2000).

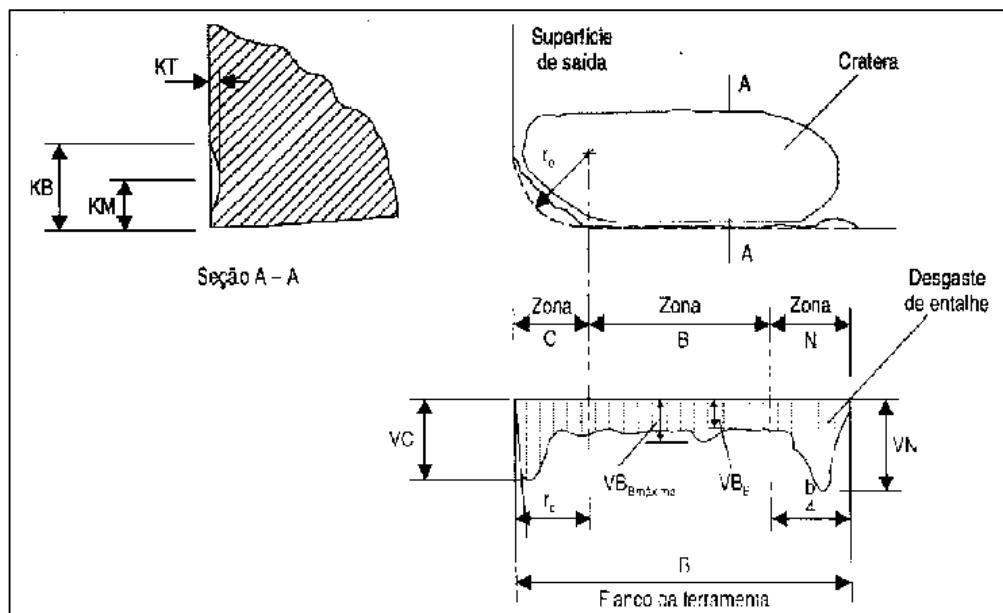


Figura 3.13 – Parâmetros utilizados para medir desgaste em ferramentas de corte (ISO 3685, 1993)

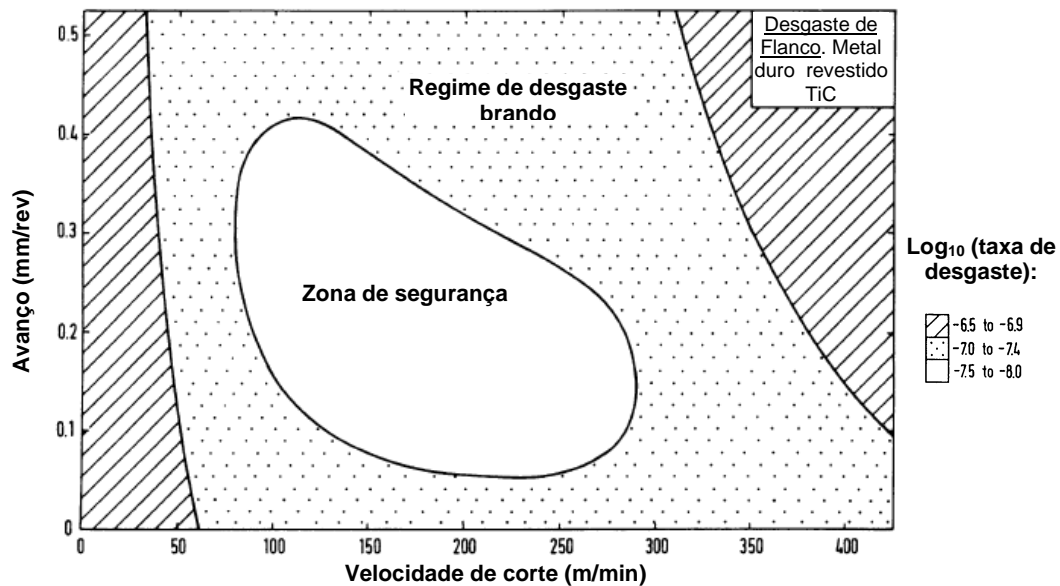


Figura 3.14 – Mapa de desgaste mostrando a taxa de desgaste para o flanco de ferramenta de metal duro revestida com TiN durante torneamento a seco de aço AISI 1045 (LIM C. Y. H *et al*, 2001)

Apesar da existência dos mapas para auxiliar na escolha dos parâmetros de usinagem, o que se observa na prática é a determinação da vida útil da ferramenta por método empírico. Testes preliminares são feitos usando-se a ferramenta disponível até a peça usinada apresentar sinais de não conformidade, com medidas e tolerâncias geométricas e/ou de posição fora dos limites de projeto. A partir daí, após adotar um coeficiente de segurança, usina-se a quantidade de peças determinadas no teste preliminar, interrompendo o processo para trocar a ferramenta antes de sua falha efetiva. Este método gera desperdício, pois a ferramenta não é utilizada até a sua máxima vida útil.

Modelos teóricos também são estudados para tentar prever a vida útil de ferramentas de corte, apresentando-se como item importante no gerenciamento das trocas de ferramentas. Porém, até o presente momento, não existe um desenvolvimento teórico que resulte em uma equação universal de previsão de vida útil de uma ferramenta. Esta tarefa é extremamente difícil, pois os parâmetros envolvidos, além de inúmeros, são diversificados. No entanto, foram elaboradas

equações simplificadas, onde as máquinas ferramenta e o tipo de usinagem são consideradas constantes e pré-definidas. O desgaste na ferramenta é considerado simples, comandado por somente um mecanismo de falha por vez. A partir destes princípios, F. W. Taylor foi o primeiro a conseguir deduzir uma equação que relacionasse a vida útil da ferramenta com a velocidade de corte (V_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f) (Equação 3.1). Sua dedução foi feita no final do século XIX e baseou-se em dados obtidos em mais de 30.000 t de aço que foram usinadas para o experimento (CHILDS T. *et al*, 2000).

$$V_c^{1/n1} \cdot f^{1/n2} \cdot a_p^{1/n3} \cdot T = C' \quad (\text{Equação 3.1})$$

Na Equação 3.1, n e C são constantes que dependem da velocidade de corte, do avanço e do critério de falha adotado. T é a vida da ferramenta em minutos.

A partir da experiência de F. W. Taylor, vários foram os estudos na tentativa de melhorar a correlação entre os cálculos teóricos e a vida da ferramenta na prática. Mudanças de abordagem foram propostas, como KOPAC J. *et al* (2001), que citou a utilização da tribologia como forma de estudar as causas de falhas inesperadas em ferramentas, ASTAKHOV V. P. (2003), que sugeriu um análise mais detalhada do desgaste de flanco, levando em consideração as tensões de contato e mensurando a quantidade limite de energia transmitida através da aresta de corte até a falha final e KWON Y. e FISCHER G. W. (2003), que analisaram o desgaste superficial e o material perdido da ferramenta utilizando processamento de imagem e algoritmos específicos. Técnicas de regressão não linear em componentes de força atuantes na ferramenta (ORABY S.E. e HAYHURST D. R., 2004), utilização de métodos semi-empíricos em usinagem de contato restrito (ARSECULARATNE J. A., 2003), projetos de experimentos associados com redes neurais (CHOUDHURY S. K. *et al*, 2003; OZEL T. e KARPAT Y., 2005) e modelos baseados em inteligência artificial (SCHEFFER C. *et al*, 2003) são mais alguns exemplos de evoluções de modelos teóricos, sempre na tentativa de prever a vida útil de ferramentas com maior precisão possível.

Outro procedimento adotado para se ganhar produtividade é o monitoramento do desgaste da ferramenta enquanto a mesma está em operação (monitoramento *on line*). Consiste em monitorar parâmetros até que determinados valores sejam atingidos

ou que alguma interferência seja detectada no sistema de medição. A partir de limites pré-determinados, sabe-se que a ferramenta iniciou o seu processo de colapso, chegando a hora de sua substituição. O monitoramento possibilita a utilização máxima da ferramenta, independente de modelos teóricos de previsão de vida útil. Métodos como vibração (GONG W. *et al*, 2004; LIM G. H., 1995) e emissão acústica (SALGADO D. R e ALONSO F. J., 2007; LI X., 2002) são os mais comuns. No entanto, métodos como monitoramento de forças de corte (HUANG S. N. *et al*, 2007) e digitalização de imagem associada à estatística (CASTEJON M. *et al*, 2007) começam a ser estudados e aplicados com maior frequência. DIMLA E. e DIMLA Snr (2000) fizeram uma revisão dos métodos de monitoramento de desgaste de ferramenta existentes e suas aplicações. Estes podem ser separados nos seguintes grupos:

- emissão acústica;
- controle de temperatura da ferramenta;
- medição de forças de corte (estática e dinâmica);
- vibração;
- métodos diversos (ultrassom, medições ópticas, rugosidade superficial, dimensões da peça, análise de tensões e medição de corrente de motor da máquina ferramenta).

Já BYRNE G. *et al* (1995) elaboraram uma revisão de sensores utilizados para monitoramento, inclusive os industriais. Eles observaram evoluções em desenvolvimentos de sistemas de múltiplos sensores para ganhos em confiabilidade, surgimento de sensores inteligentes e sensores com arquitetura de controle aberta, para interfaceamento com sistemas de controle de máquinas ferramenta.

Seja através de modelos teóricos ou empíricos ou por métodos de monitoramento *on line*, conhecer o comportamento do desgaste em uma ferramenta de corte e acompanhar a sua evolução, tendo condições de prever a sua falha, é de extrema importância em qualquer processo de usinagem. Os custos envolvidos em trocas de ferramentas são representativos e fazem a diferença em termos de competitividade.

3.2 – Engenharia de Superfície

Apesar de o homem desenvolver e realizar estudos na área de engenharia de superfície há décadas, o termo, como é conhecido hoje, surgiu pela primeira vez no princípio da década de 1970, na Inglaterra. Em um primeiro momento, foi uma engenharia focada em deposição térmica e na busca do entendimento de diversos aspectos da soldagem. Gradativamente foi incorporando em sua área de interesse diversos aspectos da superfície no material, como tecnologias de formação de camadas, projetos de desenvolvimento e estudos de falhas. Hoje o conceito é mais amplo e envolve várias áreas de ciência e tecnologia, como matemática, física, química, tribologia, ciência e resistência dos materiais, corrosão e construção de máquinas. Pode-se dizer que a engenharia de superfície é a disciplina da ciência que estuda o processo de formação de camadas superficiais (sem acréscimo de material) e revestimentos (com acréscimo de material), os fenômenos correlatos e o conseqüente performance obtida por eles (BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T., 1999). Deste modo, pode-se dizer que a engenharia de superfície engloba os problemas tecnológicos e científicos relacionados com a formação de camadas na superfície, seja ela estudada ainda em projeto ou formada após a fabricação da peça, seja ela localizada em camadas imediatamente inferiores ou no próprio substrato, com materiais que têm propriedades diferentes do material a ser depositado, seja ele na forma de gás, líquido ou sólido.

BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T. (1999) separam a engenharia de superfície segundo campos de atuação, como observado a seguir:

- fabricação, que é dividida em duas áreas, conhecidas como camadas tecnológicas e camadas modificadas em serviço. A primeira consiste em estudos de processos e métodos para fabricação/formação de camadas superficiais. A segunda é o estudo da alteração da camada tecnológica quando a mesma está em serviço;
- projeto, voltada para o desenvolvimento de camadas que atendam a requisitos de projeto de peças a serem fabricadas;
- investigação, que envolve estudos experimentais de estruturas e propriedades das superfícies. Requer desenvolvimento de métodos para determinar propriedades mecânicas, físicas, químicas, tribológicas etc;

- utilização em serviço, subdividida em dois grupos: testes em serviço (acompanhamento da evolução das propriedades da camada com o tempo) e formação de novas camadas superficiais ao longo da operação.

O desenvolvimento da engenharia de superfície tem sido muito dinâmico ao longo dos anos. Graças aos estudos nesta área foram obtidos avanços em economia de energia, pela redução de atrito entre componentes de máquinas e equipamentos, redução de perdas por corrosão, fadiga e desgaste e aumento de confiabilidade e produtividade na fabricação de peças, devido ao aumento de vida útil e redução de falhas catastróficas em ferramentas de corte.

JAMES A. S.*et al* (2005) descrevem o importante papel da engenharia de superfície em projetos ambientalmente corretos. Nesse trabalho são mostrados estudos de caso onde a engenharia de superfície trouxe benefícios ambientais em potencial. As seguintes áreas são citadas como as principais beneficiárias: resistência ao desgaste, minimização de descarte, desempenho térmica, resistência à corrosão, produtividade na fabricação e melhoria de funcionalidade de máquinas.

3.2.1 – Revestimentos

Genericamente, pode-se dizer que “revestimento é uma camada criada ou depositada sintética ou naturalmente na superfície de um objeto feito de outro material com o objetivo de alcançar requisitos técnicos ou propriedades decorativas” (BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T., 1999).

O material a ser revestido é chamado de substrato e constitui a primeira fase do sistema composto pelo revestimento e pela peça. O revestimento constitui a segunda fase e, entre as duas fases, encontra-se uma fase intermediária denominada camada intermediária. Ela favorece a adesão do revestimento ao substrato e apresenta espessura variável. Ainda no sistema revestimento/peça, também conhecido como conjugado, pode existir mais de uma camada de revestimento sobreposta na superfície do substrato. Este sistema é denominado multicamadas e as camadas são compostas de materiais diferentes. Normalmente é utilizado para alcançar propriedades que o sistema monocamada (com somente uma camada de

revestimento) não consegue prover. A Figura 3.15 mostra um croqui dos sistemas monocamada e multicamada.

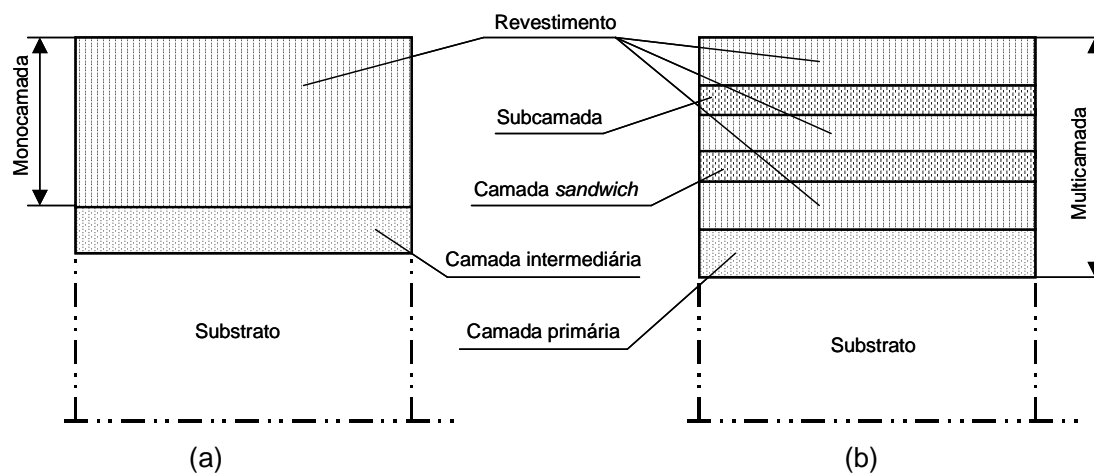


Figura 3.15 – Representação esquemática da estrutura de revestimento (a) monocamada e (b) multicamada. (BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T., 1999)

O sistema monocamada pode ser constituído por um único tipo de elemento (revestimento de único constituinte) e por mais de um elemento (revestimento de constituintes múltiplos).

Os revestimentos podem ser classificados de diferentes maneiras. BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T. (1999) propuseram três maneiras distintas de se dividi-los: através do material, da aplicação e método de deposição.

Na classificação por material, os revestimentos podem ser divididos em metálicos (metais e ligas metálicas) e não metálicos (tintas, vernizes, resinas, óleos, graxas, cerâmicos, plásticos, borrachas, materiais vítreos, sintéticos, cerâmicos metálicos e componentes do substrato metálico). Frequentemente, o nome do revestimento é derivado do principal material constituinte do material a ser depositado.

Os revestimentos metálicos normalmente são depositados em substratos também metálicos, em peças e componentes que exijam precisão de fabricação e que sejam

utilizados em condições severas de operação. Geralmente estas peças têm um alto valor agregado, apresentando um custo de aquisição elevado.

Os revestimentos não metálicos, principalmente as tintas e vernizes são utilizados em peças que não apresentam exposição a grandes esforços mecânicos, a exceção dos revestimentos de materiais cerâmicos, que podem suportar solicitações mecânicas mais elevadas.

Na classificação por tipo de aplicação, tem-se os revestimentos protetivos, que podem ser permanentes ou temporários – função exclusiva de proteção contra efeitos do meio externo, especialmente reações químicas que provoquem a corrosão – revestimentos decorativos – provêm o substrato de aparência externa mais estética, com variação principalmente de brilho e cor – revestimentos protetivo-decorativo – objetiva o atendimento simultâneo aos dois requisitos anteriores, tendo como exemplo os revestimentos de cromo e níquel – e revestimentos técnicos – introduzem ao substrato propriedades físicas importantes como resistência mecânica, propriedades elétricas e térmicas.

A classificação por método de deposição feita por BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T. (1999) não é restrita, mas leva em conta métodos tradicionais de deposição e a distinção entre as aplicações, fornecendo um bom resumo dos mesmos. A Figura 3.16 mostra um quadro onde podem ser observadas algumas das técnicas existentes de deposição.

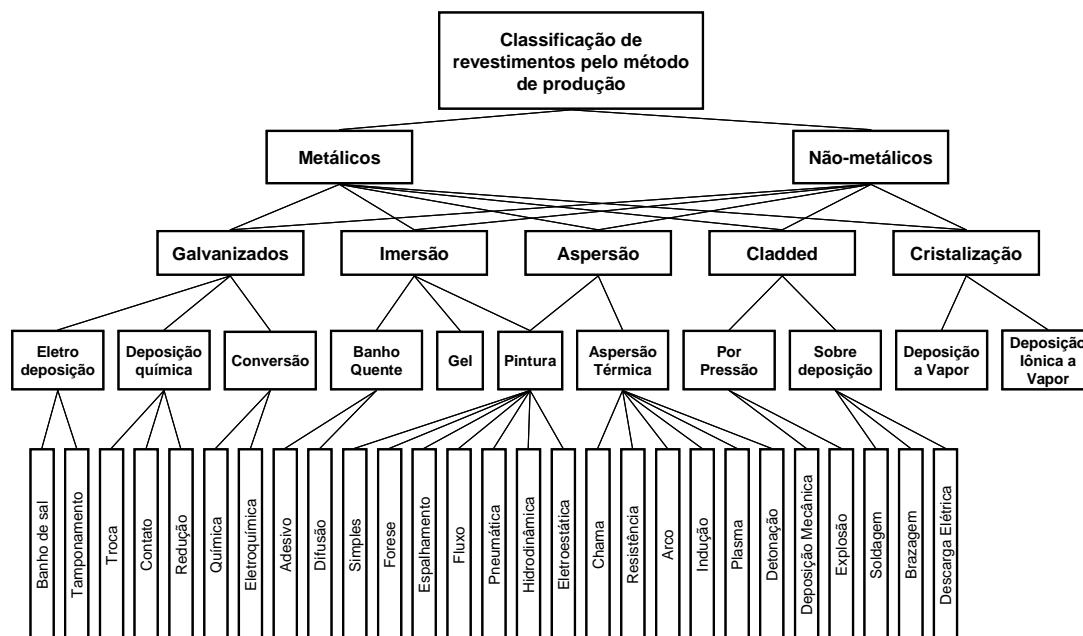


Figura 3.16 – Resumo da classificação por técnicas de deposição de revestimentos.
(BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T., 1999)

Cada técnica de deposição apresenta vantagens e desvantagens em relação às demais. A sua utilização irá depender principalmente da aplicação, das propriedades que se deseja obter e do custo final. Não são raras as propostas de aplicação de técnicas conjuntas de deposição como melhor solução. JEHN H. A. (1999), por exemplo, cita os principais parâmetros que devem ser observados para escolha da melhor técnica, compara a técnica de deposição eletroquímica com a vaporização (deposição física por vapor) e sugere que a melhor técnica talvez fosse a combinação das duas.

Além das classificações por tipo material, da aplicação e técnica de deposição propostas, os revestimentos ainda podem ser divididos de acordo com suas propriedades físico-químicas (espessura da camada, acabamento superficial, estrutura metálica, tensões residuais, dureza, ductilidade, propriedades elétricas, magnéticas e óticas). A Figura 3.17 é um exemplo de correlação entre alguns tipos de revestimento com a espessura da camada depositada e a dureza superficial.

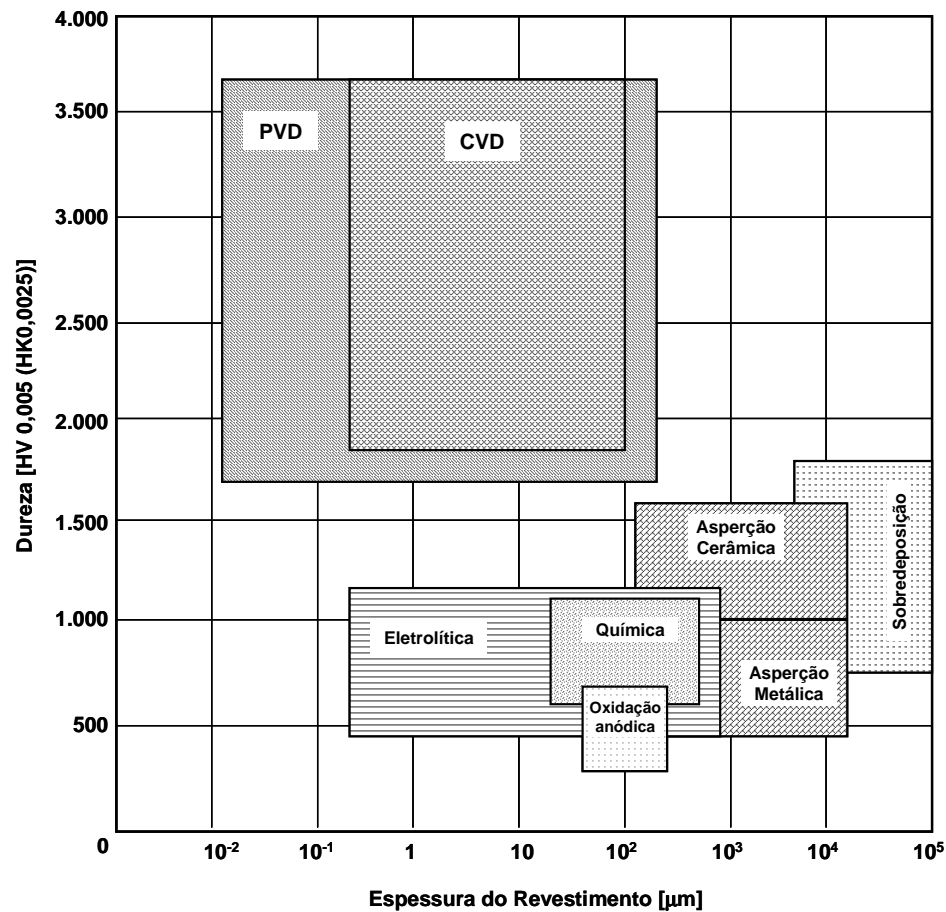


Figura 3.17 – Exemplo de faixas de dureza e espessura para alguns tipos de revestimentos. (BURAKOWSKI T. e WIERZSHON T., 1999)

3.2.1.1 – Processo de Deposição por Vaporização

O processo de deposição por vaporização consiste em atomizar ou vaporizar o material do revestimento e posteriormente depositá-lo no substrato. As primeiras experiências registradas com este processo surgiram no século XIX, na produção de filmes finos metálicos para deposição em espelhos e em fitas da indústria cinematográfica. Ao longo do tempo houve uma evolução no entendimento do processo, possibilitando avanços na técnica de deposição, como, por exemplo, melhor controle da estrutura do revestimento (OHRING M., 1992).

Os processos de vaporização podem ser classificados em dois tipos: deposição física a vapor (PVD) e deposição química a vapor (CVD). No primeiro, a fase vapor do material simplesmente é condensada no substrato. No segundo a fase vapor é condensada por meio de reações químicas entre o revestimento e o substrato, que normalmente é aquecido.

Tanto para a deposição por PVD quanto para CVD, BUNSHAH R. F. (2001) divide o processo em três etapas básicas, a saber:

- etapa 1: criação da fase vapor. O material do revestimento é transformado na fase vapor;
- etapa 2: transporte da fonte ao substrato. A fase vapor do material é transportada da fonte para o substrato, com ou sem choque entre moléculas e átomos. Durante o transporte, para alguns tipos de materiais, a fase vapor pode ser ionizada através de introdução de plasma;
- etapa 3: filme cresce no substrato. Esta etapa consiste na condensação da fase vapor no substrato e conseqüente formação do filme através de processos de nucleação e crescimento, que podem ser fortemente influenciados pelo bombardeamento iônico, resultando em alterações de microestrutura, composição, tensão residual e introdução de impurezas.

BUNSHAH R. F. (2001) diz ainda que o grau de independência entre as três etapas é que define o quão flexível é o processo de vaporização. Quanto mais independentes, mais fácil controlar a estrutura, a taxa de deposição e a propriedade final da camada revestida. Neste caso, o processo PVD apresenta certa vantagem em relação ao processo CVD.

Baseado nas observações da divisão das etapas, principalmente devido a etapa 1, o processo PVD pode ser subdividido em duas categorias: por evaporação e por *sputtering*. No processo PVD por evaporação, a fase vapor é formada a partir do aquecimento do material do revestimento. Já no processo PVD por *sputtering*, a fase vapor é formada a partir da erosão do material a ser depositado, provocada pela projeção de íons na superfície deste. As fontes de energia para criação da fase vapor nas duas categorias podem variar desde feixe de elétrons até a utilização de magnetron. A Tabela III.3 mostra um resumo das principais características dos

processos de deposição por PVD (evaporação e *sputtering*) e CVD, assim como exemplos de fontes de energia para transformação na fase vapor.

Tabela III.3 – Características básicas dos processos PVD (por evaporação e por *sputtering*) e CVD de deposição (BUNSHAH R. F, 2001 e MANCOSU, R.D., 2005)

	PVD		CVD
	Evaporação	<i>Sputtering</i>	
Mecanismo de deposição do revestimento	Energia térmica	Transferência de momento	Reação química
Taxa de deposição	Pode ser muito alta (maior que 700.000 A/min)	Baixa, exceto para metais puros (Ex: Cu = 10.000 A/min)	Moderada (200 a 2.500 A/min)
Elemento depositado	Átomos e íons	Átomos e íons	Átomos
Potência na transferência	Pobre	Boa, mas apresenta distribuição não uniforme de espessura	Boa
Deposição de metal	Sim	Sim	Sim
Deposição de ligas	Sim	Sim	Sim
Deposição de refratários	Sim	Sim	Sim
Energia do revestimento depositado	Baixa (0,1 a 0,5 eV)	Pode ser alta (1 a 100 eV)	Pode ser alta com plasma adicionado
Bombardeamento do substrato/ revestimento	Não é normal	Sim	Possível
Perturbação do crescimento da camada depositada	Não é normal	Sim	Sim
Aquecimento do substrato (por meios externos)	Normalmente sim	Geralmente não	Sim
Fontes de energia	- Resistiva- - Indutiva - Feixe de elétrons - Arco - Laser	- Diodo - Magnetron - RF - Triodo	-

3.2.1.2 – Propriedades e Modos de Falha em Revestimentos

É certo que, para melhorar as propriedades das superfícies dos materiais, faz-se uso de estudos de engenharia de superfície e propõe-se soluções como a utilização de revestimentos. No entanto, para que os benefícios esperados sejam realmente atingidos, é preciso entender a relação entre as propriedades do revestimento e do substrato e como estas propriedades podem ser controladas, principalmente durante o processo de deposição. BULL S. J. e RICKERBY S. (2000) resumem a relação entre as propriedades importantes para determinação do desempenho do conjugado e as camadas de substrato e revestimento em uma ilustração, mostrada na Figura 3.18.

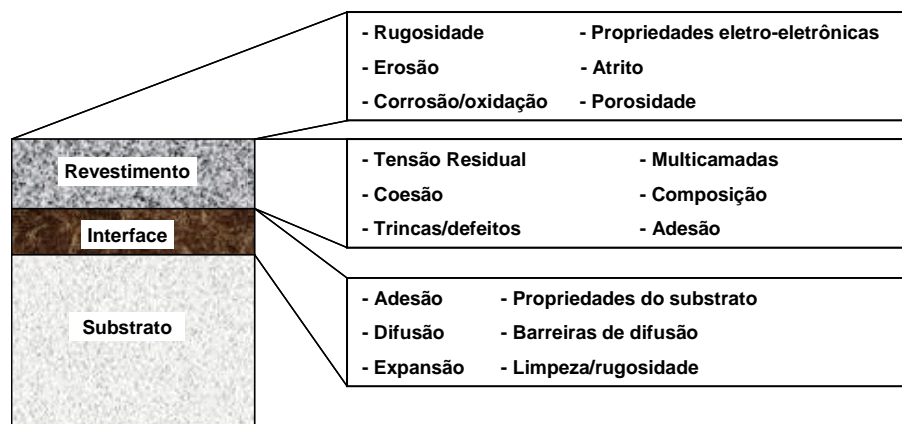


Figura 3.18 – Propriedades do sistema revestimento/substrato que são importantes para determinar a performance do conjugado em aplicações tecnológicas (BULL S. J. e RICKERBY S., 2000)

Muitas das propriedades mostradas na figura são aplicáveis em determinadas situações, de uma maneira geral, podem ser citadas três que são consideradas fundamentais para caracterizar os revestimentos: adesão, tensões residuais e dureza. Apesar de serem aparentemente fáceis de medir, na prática, existem muitas dificuldades a serem superadas para se obter resultados quantitativos satisfatórios.

Algumas das propriedades descritas serão discutidas a seguir quanto a sua caracterização, correlação entre si e com o desempenho final do conjugado.

a) Dureza

Ao se depositar um filme em um substrato, um dos principais objetivos é aumentar a resistência ao desgaste do sistema. Para tanto, deve-se melhorar a resistência mecânica da superfície, alterando sua dureza superficial. A medida de qualidade da deposição é, portanto, também a medida de dureza superficial do conjugado após revestimento.

Para se obter uma medida de dureza do revestimento que não seja influenciada pelo substrato, é necessário que a espessura do filme seja pelo menos dez vezes superior à profundidade máxima de penetração do penetrador no material (BULL S. J. e RICKERBY S. 2000). Na prática, este critério é muitas vezes difícil de ser seguido, pois os filmes apresentam normalmente espessuras que variam de 1 a 5 μ m. Existem então duas abordagens para medição de dureza em revestimentos de filmes finos: abordagem por medição direta e indireta, através de modelamentos matemáticos.

Para se realizar as medidas diretas de dureza, ensaios tradicionais de medida de penetração, que envolvem a visualização, por meios óticos, das impressões deixadas pelo penetrador na superfície do material, não podem ser utilizados devido a sua escala. Porém, com o desenvolvimento de instrumentos capazes de medir continuamente o carregamento/descarregamento e a profundidade de penetração durante o ensaio, consegue-se fazer medidas em escala nanométrica. Os chamados ensaios de penetração instrumentada tornaram-se então uma importante ferramenta para caracterização de propriedades, não só relativas à dureza superficial, mas também relacionadas ao módulo de elasticidade e tenacidade à fratura.

Os ensaios de penetração instrumentados são assim chamados por possuírem sensores que medem a profundidade de penetração à medida que a carga é aplicada. Através de relações matemáticas relaciona-se a profundidade com a área projetada de contato e esta com a dureza. Estas relações são variáveis de acordo com o tipo de penetrador utilizado. Desta forma, neste método de medição, a dureza não depende da carga e sua grande vantagem é, portanto, não requerer a visualização da impressão, possibilitando a medida de propriedades de impressões muito pequenas (é extremamente difícil medir a área de contato após a retirada da carga por meio da

microscopia ótica devido à baixa resolução dos equipamentos de imagem associados).

É importante ressaltar que a exatidão da medida dos ensaios de penetração instrumentada depende do método utilizado na determinação da área de contato. Os métodos mais utilizados são Vickers e Knoop. Em relação à impressão no material, esta depende da geometria do penetrador utilizado: Vickers, Knoop, Berkovich (pirâmide de base triangular com ângulo de 115°) ou Cube-corner (extremidade de um cubo).

Devido ao tamanho das impressões e à carga necessária para realizá-las, os ensaios de nanodureza são susceptíveis a erros devido a vibrações e à rugosidade superficial do material medido.

b) Adesão

A norma ASTM D907-70 define adesão como “o estado no qual duas superfícies são mantidas juntas por forças de superfície, que podem ser forças químicas, de intertravamento ou ambas”.

Em muitas aplicações de revestimentos, a adesão entre o revestimento e o substrato é uma das principais características do conjugado. Uma má adesão, dependendo da aplicação do sistema, normalmente é indicativo de falhas prematuras. Sendo assim, esta é uma das propriedades mais estudadas, onde há um grande número de trabalhos a respeito.

Segundo WEISS H. (1995), os mecanismos de adesão podem ser divididos em três grupos: intertravamento mecânico, ligações físicas e ligações químicas (Figura 3.19). A partir do entendimento destes três mecanismos é possível propor métodos de medição da adesão de revestimentos. WEISS H. cita ainda que esta medição normalmente é complicada, principalmente na presença de filmes finos e com altos níveis de tensão adesiva. Talvez esta seja uma das razões da existência de vários métodos propostos.

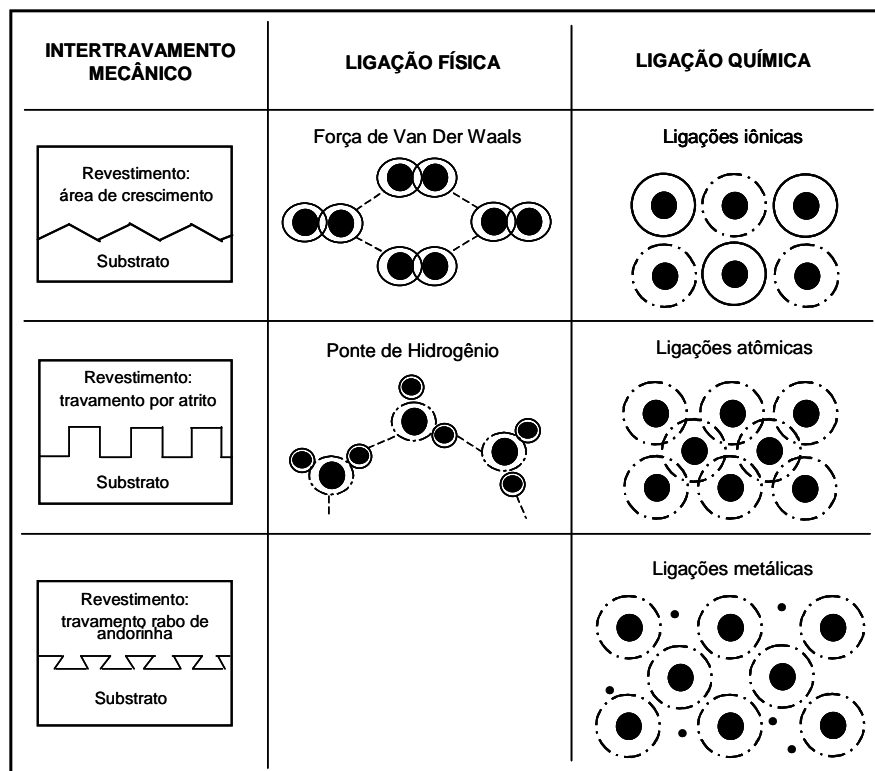


Figura 3.19 – Diagrama esquemático dos diferentes tipos de mecanismos de adesão
(WEISS H., 1995)

BULL S. J. e RICKERBY S. (2000) separam os métodos de medição de adesão em três grupos, a saber:

- métodos microscópicos: baseado em medições de taxa de nucleação, condensação crítica e tempo de residência dos átomos depositados. A maioria dos testes requer utilização de microscopia eletrônica detalhada, de interpretação difícil e pouco usual na prática industrial;
- métodos mecânicos: adesão é determinada por aplicação de força no sistema conjugado. Esta força pode ser aplicada na direção normal ao sistema ou paralela ao mesmo;
- métodos diversos: baseado em medidas indiretas como difração de raio X, ciclo térmico ou emissão acústica.

Dos grupos citados, os testes mais utilizados são os associados aos métodos mecânicos, que podem ser subdivididos em testes diretos, indiretos e de mecânica de fratura (WEISS H., 1995). A Figura 3.20 mostra exemplos de testes associados aos respectivos métodos.

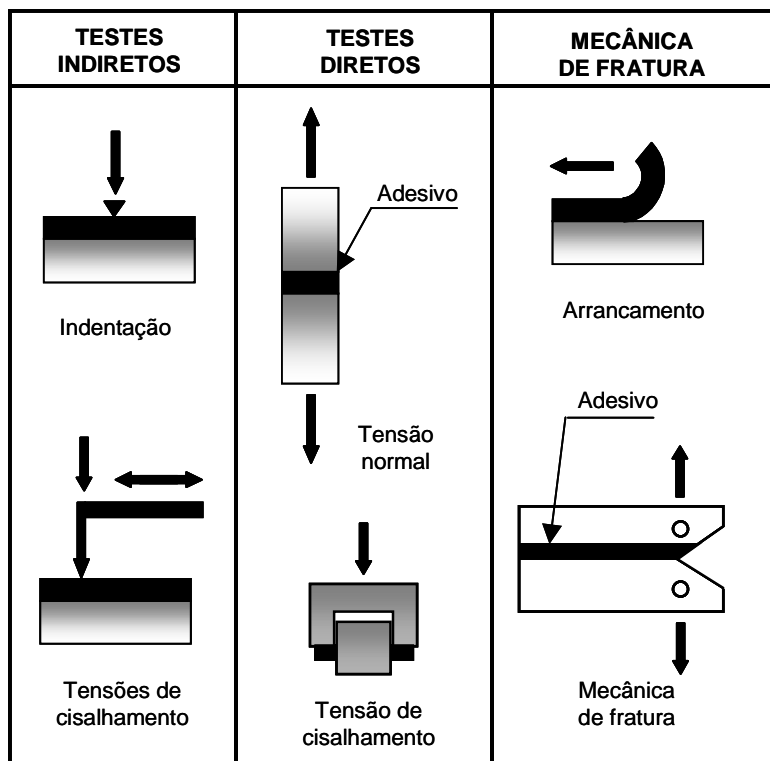


Figura 3.20 – Exemplos de testes de medição de adesão em conjugados segundo seus métodos associados (WEISS H., 1995)

Os testes indiretos, por serem práticos, têm uma boa aceitação na indústria. A Figura 3.20 mostra exemplo de um dos testes indiretos mais comumente aplicados: o teste de indentação.

O teste de indentação consiste em utilizar um penetrador (padrão Rockwell C, Vickers ou Brale), que, após aplicação de uma carga máxima, pode gerar microtrincas laterais ao contorno da impressão de indentação, visíveis por microscopia ótica. A adesão do filme ao substrato é classificada de acordo com um estudo comparativo dessas trincas

e padrões. Os padrões de trincas classificados entre HF1 a HF4 representam morfologias típicas de revestimentos de boa adesão. As trincas classificadas em HF5 e HF6, evidenciam delaminação do filme. A Figura 3.21 mostra um exemplo de padrão de morfologias de comparação utilizado em teste de adesão Rockwell C.

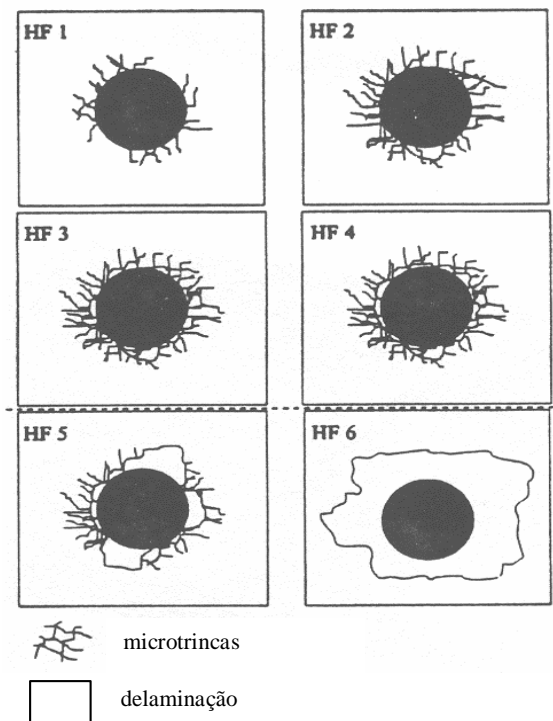


Figura 3.21 - Morfologias de falhas obtidas no teste de adesão Rockwell C (HEINKE W.*et al.*, 1995).

O teste de adesão por indentação é um teste que fornece resultados qualitativos, pois sua análise quantitativa exige um tratamento matemático complicado e difícil. Porém, é um método simples, de baixo custo e muito utilizado em áreas de controle de qualidade de fabricação de peças. O teste Rockwell C foi desenvolvido na Alemanha e normatizado em 1991. Hoje ele é um teste previsto na norma DIN.

Com o objetivo de comparar a adesão de três tipos de revestimentos a luz de três tipos diferentes de teste, HEINKE W *et al* (1995) realizaram testes de adesão por

impacto, por indentação (Rockwell C) e *scratch test* em substratos de aço polidos (SAE 52100) revestidos de TiN, CrN e Cr₂N. As espessuras de revestimento variaram entre 2 e 20 µm e o método de deposição utilizado foi o *sputtering*. Os resultados dos três tipos de testes para o mesmo tipo de material e espessura de revestimento mostraram-se comparáveis e coerentes.

OLLENDORF H. e SCHNEIDER D. (1999) realizaram medições de adesão em conjugados de filmes finos (entre 1,2 e 2,45µm de espessura) de TiN depositados por *sputtering* em aço cromo-molibdênio. Foram utilizados métodos distintos: *scratch test*, teste de flexão a quatro pontos, teste de indentação Rockwell, teste de cavitação, teste de impacto, acústico a laser e microscopia acústica. Os parâmetros dos testes foram examinados e correlacionados com o tempo de *pré-sputtering*. Os resultados demonstraram que não houve uma correlação coerente com o esperado em termos de adesão. Para tempos de *pré-sputtering* maiores, esperava-se uma adesão maior, o que não ocorreu para alguns casos. O teste que apresentou resultados mais coerentes com o esperado foi o acústico a laser, onde os autores indicaram como sendo um teste promissor para realizar medidas de adesão.

As evidências do trabalho feito por OLLENDORF H; SCHNEIDER D. (1999) e HEINKE W (1995) nos mostram que, apesar de existirem métodos já bem difundidos e utilizados em larga escala, principalmente na indústria, é preciso ter cuidado ao se realizar testes de medição de adesão, pois a complexidade envolvida pode levar a resultados aparentemente contraditórios, induzindo a erros de interpretação. Variáveis como espessura do filme, processo de deposição e aplicação do conjugado devem ser levadas em conta na hora da escolha do teste.

Outra constatação importante é que a adesão pode ser influenciada por diversos outros parâmetros, como tensões residuais internas, espessura do revestimento e rugosidade do substrato. Algumas destas correlações serão explicitadas ao se tratar os demais tópicos relacionados a propriedades do conjugado.

c) Tensões residuais

O processo de deposição naturalmente gera tensões residuais na interface entre substrato e revestimento. Elas representam um importante papel na tecnologia de revestimento, pois normalmente estão associadas à máxima espessura do filme depositado sem a ocorrência de delaminação ou problemas de adesão.

As tensões residuais são uma composição de tensões intrínsecas e tensões térmicas. Segundo MASSEREAU V. G.; MACHET J. (1995), a primeira é gerada devido a existência de defeitos na estrutura cristalina e à morfologia do material depositado e a segunda é devida às diferenças de coeficiente de expansão térmica entre o material do substrato e do revestimento. A presença destas tensões residuais internas pode ocasionar falhas no conjugado, principalmente se as mesmas forem de tração.

Existem basicamente dois métodos para se medir tensões residuais em conjugados: utilizando técnicas de raio-X e ensaios mecânicos. Dos dois métodos, o primeiro é amplamente utilizado, especialmente para filmes abaixo de 10 μ m de espessura. Explica-se o fato pela possibilidade de, com técnicas de raio-X, se conseguir obter, além dos valores das tensões, importantes informações relativas à estrutura do revestimento.

Para estudar as tensões internas em revestimentos, MASSEREAU depositou Cr por PVD em substratos de vidro e aço inoxidável e observou a relação entre o nível de tensões e a quantidade de nitrogênio introduzido no processo. As tensões foram calculadas por métodos teóricos, que levam em consideração as propriedades do material do substrato e do revestimento. As tensões térmicas foram mantidas constantes através de aquecimento do substrato enquanto era feita a deposição. Foi observado que, quanto maior a concentração de nitrogênio, menores são os valores da tensão interna (que passa a ser compressiva) e melhor é a adesão do filme, medida pelo *scratch test* (Figura 3.22). Este resultado indica que a forma e intensidade da tensão intrínseca dependem da quantidade de nitrogênio no revestimento. Foram feitas comparações também entre as estruturas e morfologia do filme depositado com as tensões internas e a pressão total e temperatura de crescimento do filme, observando que estes parâmetros modificam a energia dos átomos de cromo que estão crescendo no filme e influenciam nos valores das tensões internas.

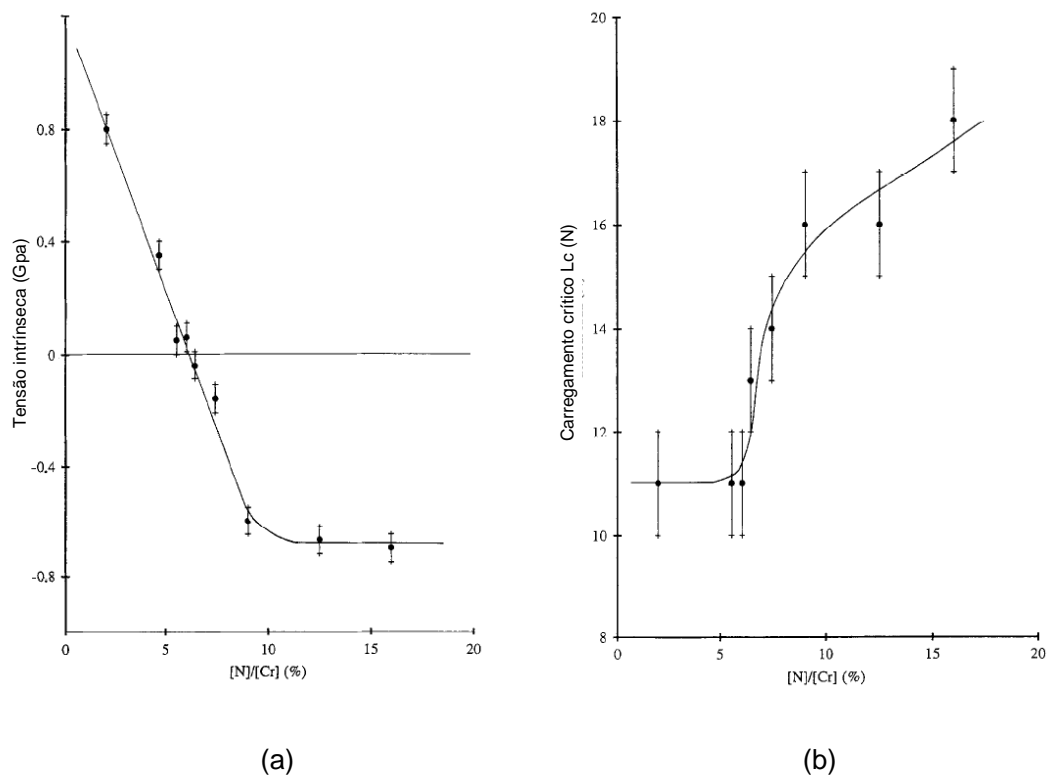


Figura 3.22 – Variação de (a) tensão intrínseca e (b) adesão, com a variação de concentração de nitrogênio em filme de cromo depositado em substrato de vidro (pressão total = 0,13Pa; densidade de potência = 700W/m² e temperatura do substrato = 473K) (MASSEREAU V. G.; MACHET J., 1995).

Na intenção de estudar o comportamento das tensões internas em relação à espessura do filme depositado, LUGSCHEIDER *et al* (2002) depositaram, por PVD, (Cr,Al)N em substratos de aço ferramenta e metal duro. Foram criados vários sistemas onde as espessuras variaram de 2,7 a 17 μ m. Foi observado que existe uma relação de proporcionalidade entre espessura do filme e tensões residuais compressivas, ou seja, quanto maior a espessura do filme, maiores os valores das tensões internas compressivas. Deste modo, consegue-se controlar o nível de tensão interna através do controle da espessura do filme. A presença de tensões compressivas auxilia na resistência ao desgaste causado por esforços cíclicos, característicos de processos de

conformação metálico semi-sólido (forjamento e fundição em um único processo contínuo). Porém, a partir de determinada espessura, começam a existir problemas de adesão. Esta característica foi apontada no trabalho de LUGSCHEIDER *et al* através de ensaios de adesão por impacto a baixas cargas, onde ocorreu problema de delaminação. Deste modo, há uma espessura ótima onde as tensões compressivas são máximas e não há problemas de delaminação. Os autores estimaram esta espessura como entre 8 e 10 μ m.

CUNHA L. e ANDRITSCHKY M. (1999) estudaram também o efeito das tensões residuais em relação a defeitos internos e à corrosão. Componentes metálicos como moldes e matrizes estão sujeitos a degradação durante as transformações plásticas inerentes aos processos de conformação mecânica, principalmente quando se trabalha com materiais abrasivos e componentes corrosivos em conjunto com altas temperaturas. Experimentos foram feitos depositando CrN em substratos de aço inoxidável AISI 316. A espessura do filme foi de 0,5 μ m e a rugosidade do substrato e do conjugado foram controladas e mantidas constantes antes e após o revestimento. Foi observado que o revestimento encontrava-se sob fortes tensões compressivas (-1 a -5Gpa). A presença de CrN nestas condições reduziu a taxa de corrosão do aço inoxidável. Aparentemente, quando se aplica o revestimento, ele promove, além de proteção mecânica da camada superficial, proteção contra corrosão.

Para se avaliar o estado de tensões internas em conjugados explora-se muito técnicas numéricas através de métodos computacionais. BENNANNI H.; TAKADOUM J. (1999), por exemplo, utilizaram a técnica de elementos finitos para verificar a variação das tensões internas em relação ao aumento da espessura do filme, do coeficiente de atrito e da alteração do módulo de elasticidade. Os resultados mostraram que, aumentando-se o coeficiente de atrito ou a diferença entre os módulos de elasticidade do substrato e do revestimento, todos os componentes de tensões internas aumentaram. BOUZAKIS *et al* (1998) utilizaram a mesma técnica para avaliar mecanismos de falha por fadiga em processos de usinagem ininterrupta.

d) Rugosidade do substrato e do conjugado

Uma superfície rugosa tende a potencializar taxas de desgaste, além de aumentar a tendência de arrancamento de material e de surgimento de trincas superficiais por fadiga. Por causa disto, materiais são especificados para terem um nível de rugosidade superficial dentro de uma faixa de tolerância aceitável, que depende de sua aplicação. No processo de deposição de revestimentos, deve-se atentar, além da rugosidade do conjugado, para a rugosidade do substrato. Estudos demonstram que esta última influencia não só na rugosidade final, mas também em outras características, como na adesão.

Segundo TAKADOUM J e BENNANI H. H. (1997), para deposições de TiN em substratos de aço (dureza 250HV), independente da espessura do filme depositado (variação de 1,5 a 5 μ m), a adesão deverá ser baixa para substratos que tenham maior rugosidade antes da deposição. Eles observaram também que a rugosidade do conjugado é alterada em relação a do substrato somente para baixos valores de R_a do substrato. Para R_a acima de 0,15 μ m no substrato, não se observou alterações de rugosidade após o revestimento (conjugado permaneceu com a mesma rugosidade do substrato).

Resultados semelhantes foram obtidos por HARLIN P. *et al* (2006). Foram depositados, por PVD, filmes de TiN e WC-C em substratos de aço rápido. O substrato foi polido de modo a se obter rugosidades médias que variassem de 4,5 μ m a 1 μ m antes do revestimento. Os autores evidenciaram que, para espessuras do filme abaixo de 5 μ m, dizer que a rugosidade do conjugado é idêntica ao do substrato exige um estudo mais detalhado, pois a distribuição das amplitudes (*skewness*) sofreu alterações que não se pode desprezar. Foi constatado também um aumento do coeficiente de atrito com o aumento da rugosidade do substrato para todos os sistemas estudados, porém, houve baixa correlação entre taxa de desgaste do conjugado (medida por teste de esfera sobre disco) com a rugosidade do substrato.

MEIER G. *et al* (1996) realizaram estudo mais abrangente sobre a influência de vários parâmetros do substrato nas propriedades finais do conjugado. Chamaram a atenção para o fato de que os materiais e as técnicas de deposição estão sendo permanentemente desenvolvidas, o que exige estudos com maior intensidade sobre a

interface substrato/revestimento. Ao todo em seu trabalho foram estudados 45 sistemas diferentes, onde foram avaliados processos de deposição (PVD, CVD e PACVD) e rugosidade do substrato (R_z variando de $0,1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$) em vários testes de desempenho distintos (torneamento, furação, estampagem e fresamento, além de deposição em pá de bomba). O revestimento utilizado foi o TiN. MEIER G. *et al* concluíram que não há um pré-tratamento ideal único do substrato que potencialize o desempenho do sistema. Dependendo da aplicação, uns parâmetros influenciam mais do que outros no desempenho do conjugado, o que se conclui que, para se otimizar a utilização do sistema, é necessário estabelecer um pré-tratamento específico para cada aplicação. Em relação à rugosidade do substrato, constataram que ela influencia no desempenho do conjugado em todos os testes funcionais, sendo que a influência foi maior nos conjugados com filmes depositados por PVD. O grau de influência varia para cada teste. A mesma correlação não foi encontrada para, por exemplo, tensões residuais.

Problemas de adesão são principalmente observados em revestimentos de matrizes para conformação mecânica. Grande parte das ferramentas de corte hoje são revestidas na tentativa de melhorar o desempenho em usinagem de peças. Por outro lado, o mesmo não é observado em moldes e matrizes, pois a principal dificuldade para se revestir os mesmos encontra-se em seu complexo formato, que não permite boa adesão do filme. Além disto, a maioria dos revestimentos apresentam alto coeficiente de atrito, o que não é desejável em matrizes. Motivado por estas características, PODGORNIK B. *et al* (2004) estudaram a influência da rugosidade do substrato e do tipo de revestimento no desempenho de matrizes (aço comercial sinterizado: Vanadis 4) revestidas por diferentes filmes (TiN, TiB_2 , TaC e WC-C). Os revestimentos foram aplicados por PVD a uma espessura de $2\mu\text{m}$. Foram estudados sistemas com cinco tipos de rugosidade do substrato: menor que $0,05\mu\text{m}$, $0,1\mu\text{m}$, $0,15\mu\text{m}$, $0,25\mu\text{m}$ e $0,35\mu\text{m}$. Todas as amostras foram polidas após o revestimento, obtendo-se uma rugosidade próxima de $R_a = 0,2\mu\text{m}$ antes dos testes de desempenho (teste de adesão). Os resultados mostraram uma forte dependência da capacidade de resistência da ferramenta com a diminuição da rugosidade do substrato: para o revestimento de TiN, reduzindo a rugosidade R_a de $0,25\mu\text{m}$ para $0,05\mu\text{m}$, houve uma redução do coeficiente de atrito do conjugado que possibilitou um aumento da carga crítica de falha de 250 para 350N. Para valores de rugosidade R_a acima de $0,25\mu\text{m}$, não foi observada alteração significativa no coeficiente de atrito, mas a carga crítica

caiu para valores abaixo dos associados a matrizes sem revestimento. Outra observação importante feita a partir deste trabalho é que, apesar do polimento do substrato ter melhorado o desempenho da matriz, o efeito do polimento superficial, realizado após o revestimento, foi mais acentuado, melhorando cerca de duas vezes a resistência da matriz (Figura 3.23).

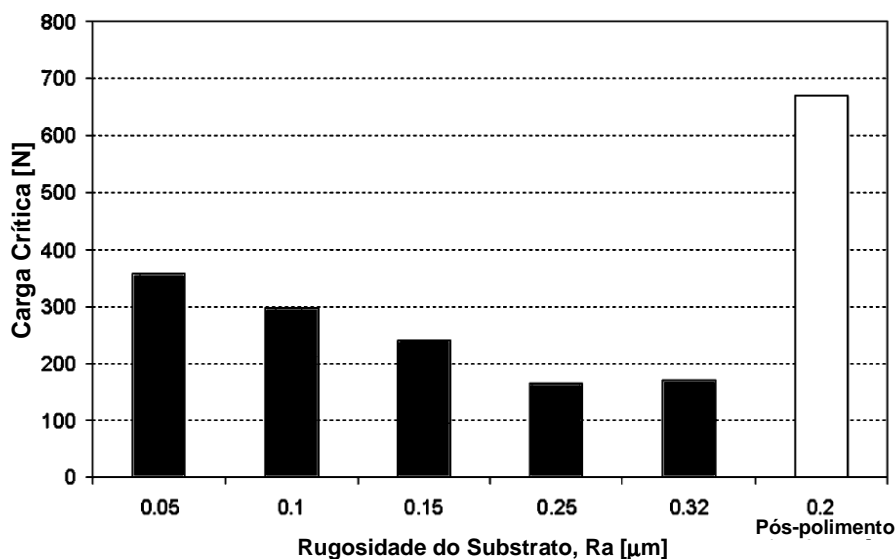


Figura 3.23 – Variação da rugosidade do substrato em relação à carga crítica do teste de performance. Revestimento de TiN (PODGORNIK B. *et al*, 2004).

Também motivado por melhorar o desempenho de matrizes de conformação, assim com de ferramentas de usinagem, MA Y.P. *et al* (2006) propuseram depositar filme fino nanocristalino de diamante em insertos de metal duro por CVD, porém variando a concentração de ar (elemento reagente) de 40 a 90%. Com a concentração de ar a 90% foram produzidos filmes com grãos finos e mais arredondados, o que diminuiu a rugosidade final para a metade da que obtida com ar a 40%. Foi observada também uma alta adesão do filme a altas concentrações de ar. Estas características de baixa rugosidade e alta adesão são importantes e despertam grande interesse na utilização

em ferramentas para usinagem de alta precisão, além de matrizes para conformação mecânica.

A rugosidade do substrato não altera apenas propriedades relacionadas com a adesão entre revestimento e substrato. Segundo SORO J. M. *et al* (1998), a delaminação dos filmes não ocorre somente devido a imperfeições na interface. Sob carregamento cíclicos por atrito, a falha crítica do revestimento pode ser devido a trincas nucleadas por defeitos estruturais intrínsecos, alojados dentro da espessura de deposição. O autores estudaram a influência da rugosidade do substrato na morfologia e tenacidade à fratura de conjugados de aço inoxidável e liga de aço XC18 com revestimento de cromo duro por PVD e concluíram que há uma forte relação entre os parâmetros (a espessura dos revestimentos depositados foi constante e igual $10\mu\text{m}$). Para rugosidades mais altas do substrato, foi observada a presença de uma estrutura colunar no revestimento. Do mesmo modo, foram observadas maior densidade de defeitos por unidade de área e aumento da tenacidade a fratura aparente (Figura 3.24).

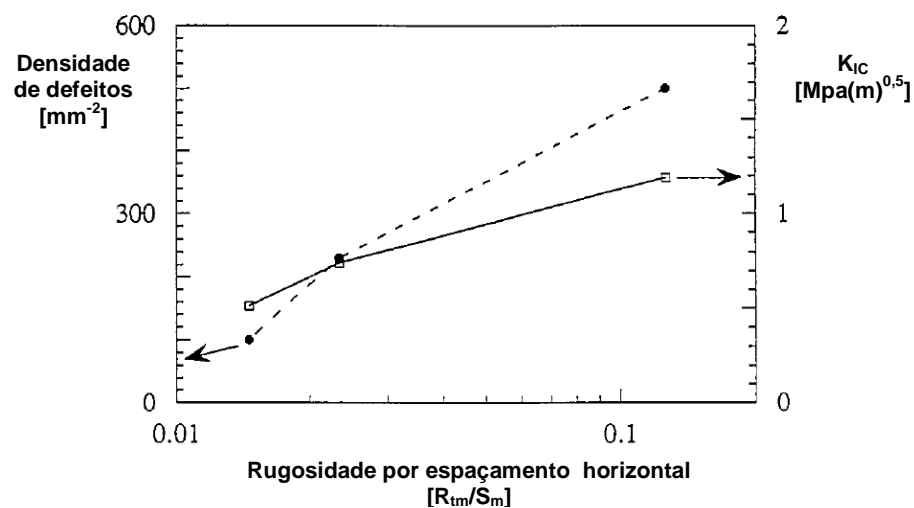


Figura 3.24 – Variação da densidade de defeitos e da tenacidade a fratura em relação à rugosidade do substrato (SORO J. M. *et al*, 1998).

A morfologia do revestimento é importante também na determinação de propriedades magnéticas e elétricas dos conjugados. PULUGURTHA S. R. *et al* (2007) determinaram que a variação da orientação dos planos cristalinos do substrato alteram a rugosidade final, assim como a morfologia do revestimento. Deste modo, a maneira como o filme começa e continua a ser depositado (a espessura de filme aumenta) pode influenciar na morfologia e nas propriedades finais do conjugado.

Relações entre rugosidade e corrosão também foram estudadas por alguns autores. Segundo MUNEMASA J; KUMAKIRI T. (1991), o fator mais importante para evitar que processos corrosivos se iniciem é eliminar a existência de defeitos pontuais (poros). Pensando nisto, eles estudaram a variação da densidade de poros em relação à rugosidade do substrato, espessura do revestimento e número de camadas depositadas. Foi realizada a deposição, por PVD, de filmes Ti e TiN em substratos de aço (SS400) e ligas de níquel (Hastelloy C-276). A rugosidade do substrato foi controlada e variada de $R_a = 0,2\mu\text{m}$ a $17\mu\text{m}$. Foram depositadas quatro espessuras diferentes de revestimento: 3, 6, 10 e $12\mu\text{m}$. Os resultados demonstraram uma correlação exponencial entre a rugosidade do substrato e a existência de poros (Figura 3.25).

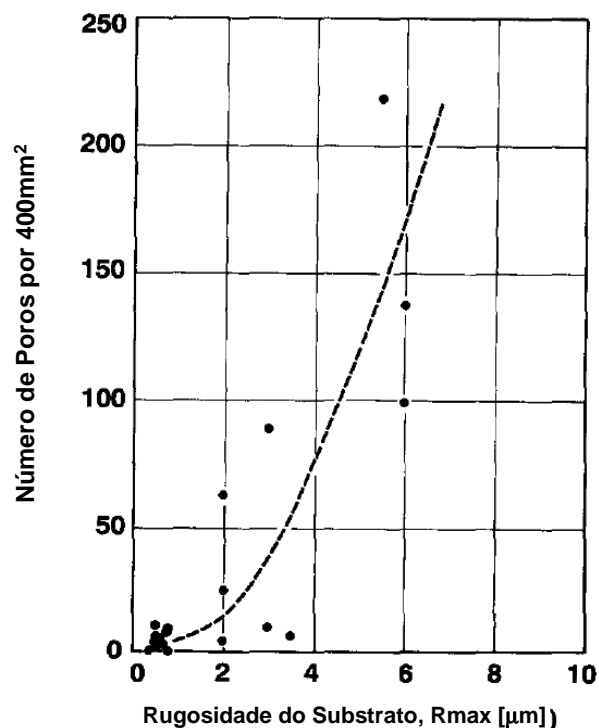


Figura 3.25 – Variação da densidade de defeitos pontuais (poros) em relação à rugosidade do substrato. Revestimento de Ti. Espessura da camada: $3\mu\text{m}$. (MUNEMASA J.; KUMAKIRI T., 1991).

De acordo com a Figura 3.25, a partir de uma rugosidade do substrato igual a aproximadamente $3\mu\text{m}$, a densidade de defeitos aumenta consideravelmente, passando de 20 para 250 defeitos por milímetro quadrado. Esta foi considerada uma rugosidade crítica para o sistema. Além disto, foi observada também um espessura mínima crítica da camada do revestimento a partir da qual a presença de poros começa a diminuir, chegando aos mesmos níveis da rugosidade do substrato quando era inferior a $3\mu\text{m}$. MUNEMASA J; KUMAKIRI T sugerem então que a maneira de se controlar a densidade de defeitos no conjugado é controlando a rugosidade do substrato e a espessura da camada revestida. Multicamadas acima de $10\mu\text{m}$ também diminuem a quantidade de poros.

LIU C. *et al* (1995) também estudaram os efeitos da rugosidade do substrato na susceptibilidade à corrosão do conjugado. Foi constatado que, assim como a

presença de poros, a adesão tem papel fundamental na resistência à corrosão. A densidade de poros controla o tamanho e a frequência dos sítios iniciais de corrosão, enquanto a adesão controla a propagação da corrosão depois desta iniciada. Os estudos de LIU *et al* comprovam que a rugosidade do substrato afeta os dois parâmetros.

3.2.2 – Revestimentos ($\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x$)N

Revestimentos a base de titânio foram muito utilizados para aumentar vida útil de ferramentas de corte e matrizes onde a sollicitação mecânica era severa. Mas, como o aumento das velocidades de usinagem e das sollicitações termomecânicas dos trabalhos de conformação, este tipo de revestimento se mostrou limitado, principalmente devido a sua baixa estabilidade química a altas temperaturas. Como solução, uma das alternativas estudadas foi o desenvolvimento de filmes a base de cromo. FUENTES G. G. *et al* (2005) estudaram as propriedades mecânicas e tribológicas de revestimentos de CrN depositados por três métodos distintos (*electron beam*, *sputtering* e arco catódico) em dois diferentes tipos de substratos (aço rápido e metal duro). Os resultados demonstraram bom desempenho, principalmente em termos de melhorias das propriedades das ferramentas de aço rápido. Comparando-se com a ferramenta sem revestimento, a dureza aumentou e coeficientes de desgaste diminuíram, chegando a reduzir os valores para menos da metade. Em todos os sistemas foi detectada boa adesão, apresentando cargas críticas acima de 35N no *scratch test*. Foi observada uma estrutura cristalina preferencialmente cúbica para os processos de deposição por *electron beam* e *sputtering*, enquanto para o processo de arco catódico, houve somente presença da fase cúbica.

A incorporação de átomos de alumínio aos filmes de CrN, ao contrário do que se imagina, aconteceu na tentativa de se aumentar a resistência à oxidação e a dureza a quente. Isto explica o fato de que, na atualidade, revestimentos processados por PAPVD, produzindo o filme ($\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x$)N, serem os mais indicados para aplicações tais como ferramentas para usinagem a alta velocidade e matrizes de forjamento a quente. Observa-se que, mesmo a temperaturas ambientes, a dureza do revestimento comercial ALCRONA (($\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x$)N) mantém sempre superior a outros revestimentos comumente utilizados em aplicações onde se exige alta resistência mecânica. Ao

comparar o desempenho de insertos de metal duro sem revestimento com conjugados revestidos com ALCRONA, LIN Y. J. *et al* (2007) sugeriram que filmes $(Cr_{1-x},Al_x)N$ seriam a próxima geração de revestimentos a serem largamente utilizados na indústria, substituindo os revestimentos a base de titânio existentes. MAKINO Y. *et al* (1998) e LUGSCHEIDER E *et al* (2003) compartilham da mesma opinião, prevendo o surgimento de uma nova geração de revestimentos, com propriedades mecânicas e tribológicas capazes de impulsionar a usinagem sem ou com pouco fluido de corte.

Segundo PULUGURTHA S.R *et al* (2007), que compararam as propriedades tribológicas do revestimento comercial ALCRONA com filmes de CrN e $(Cr_{1-x},Al_x)N$ produzidos em laboratório, a pressão parcial do nitrogênio utilizado durante o processo de deposição influencia na microestrutura, na composição de fase, dureza e resistência ao desgaste do revestimento. PULUGURTHA observou também que a resistência ao desgaste de revestimentos $(Cr_{1-x},Al_x)N$ aumenta, tanto à temperatura ambiente quanto a 700°C, à medida que se acrescenta alumínio até o limite de 12%. Depois, a resistência começa a diminuir com a concentração de alumínio. SCHEERER H. *et al* (2005) alertam para o aumento da concentração de cromo para níveis superiores a 15%. O aumento do cromo pode degradar o desempenho do conjugado até a níveis de resistência inferiores ao do material sem revestimento. Porém, os revestimentos com níveis controlados de cromo e alumínio apresentaram um potencial para exceder o desempenho dos revestimentos a base de titânio, principalmente em usinagem sem fluido de corte.

Estudos realizados por HASEGAWA H. *et al.* (2004) evidenciaram que o aumento do teor de alumínio altera a microdureza Vickers, aumentando a mesma para teores de até 0,6% de Al (Figura 3.26). A explicação para o fato está na estrutura cristalina dos filmes $(Cr,Al)N$, que é basicamente a estrutura cúbica CFC- $Cr_{1-x}Al_xN$, protótipo B1-NaCl, para percentuais atômico de alumínio variando entre $x = 0$ e $x = 0,6$. Entre $x = 0,7$ e $x = 0,8$ ocorre mudança da estrutura cristalina de B1-NaCl para uma estrutura cristalina denominada B4-Wurtzite, protótipo ZnS, que é uma estrutura hexagonal com os sítios octaédricos ocupados, no caso, com a composição química correspondente a $h-Cr_{1-x}Al_xN$. (HASEGAWA H *et al*, 2004). O parâmetro de rede dos filmes $(Cr_{1-x},Al_x)N$, entre ($x=0$ e $x=0,6$), sofre um decréscimo de 0,416 nm para 0,413 nm, devido à substituição de átomos de Cr por átomos de Al, cujo raio atômico é menor em

comparação ao Cr. A partir da solubilidade máxima de alumínio na rede CFC, ocorre o aparecimento da fase hexagonal, e a dureza decresce.

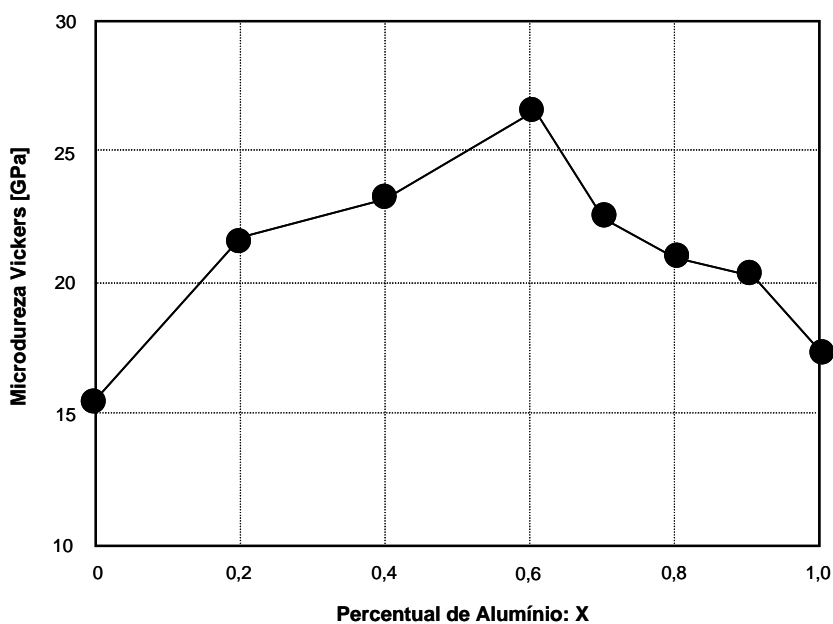


Figura 3.26 – Variação da microdureza Vickers em função de teor de Al em filme de $(Cr_{1-x}, Al_x)N$ (HASEGAWA H. *et al.*, 2004)

Valores de dureza do filme $(Cr_{1-x}, Al_x)N$ para diferentes valores de cargas utilizadas foram determinados por UCHIDA *et al.* (2004) (Figura 3.27). Para cargas de 250mN, HASEGAWA *et al.* (2004) encontraram uma dureza máxima de 27GPa enquanto UCHIDA *et al.* determinaram, para esta carga, uma dureza máxima de 35GPa. Estes resultados indicam que a dureza depende da composição química do filme produzido, donde sempre se deve utilizar a nomenclatura do filme relativa á composição química ou seja, $(Cr_{1-x}, Al_x)N$. Dependendo do valor de x, a dureza adquire valores diferenciados.

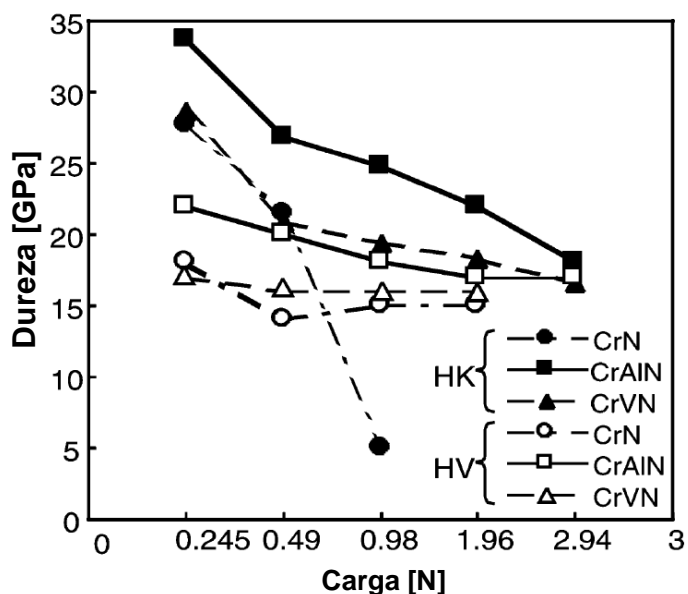


Figura 3.27 – Variação da dureza Vickers e dureza Knoop em função da carga aplicada (UCHIDA *et al*, 2004)

UCHIDA *et al.* (2004) também fizeram indentações Rockwell A, utilizando carga igual a 588N, no topo da superfície de filmes CrN, CrVN e CrAlN e concluíram, pelo padrão de fratura produzido, que o filme CrAlN mostrou-se com melhor adesão e menor fragilidade (maior tenacidade).

VETTER J. *et al* (1998), em estudos para verificar as alterações de propriedades dos filmes de CrN com introdução de alumínio, verificaram aumento considerável da resistência elétrica do revestimento para graduais aumentos da porcentagem de alumínio. A Figura 3.28 mostra esta relação em um gráfico. Neste mesmo estudo, VETTER *et al* sugeriram, como forma de melhorar ainda mais as propriedades do CrN, além da introdução de alumínio, a utilização de multicamadas do tipo CrN/(Cr:Al)N. Apesar da arquitetura complexa de uma estrutura multicamada em comparação a estruturas monocamada, VETTER *et al* acreditaram que as condições de resistência à oxidação e resistência mecânica seriam otimizadas com uma solução que levasse em consideração a introdução de elemento ternário e deposição de mais uma camada no revestimento.

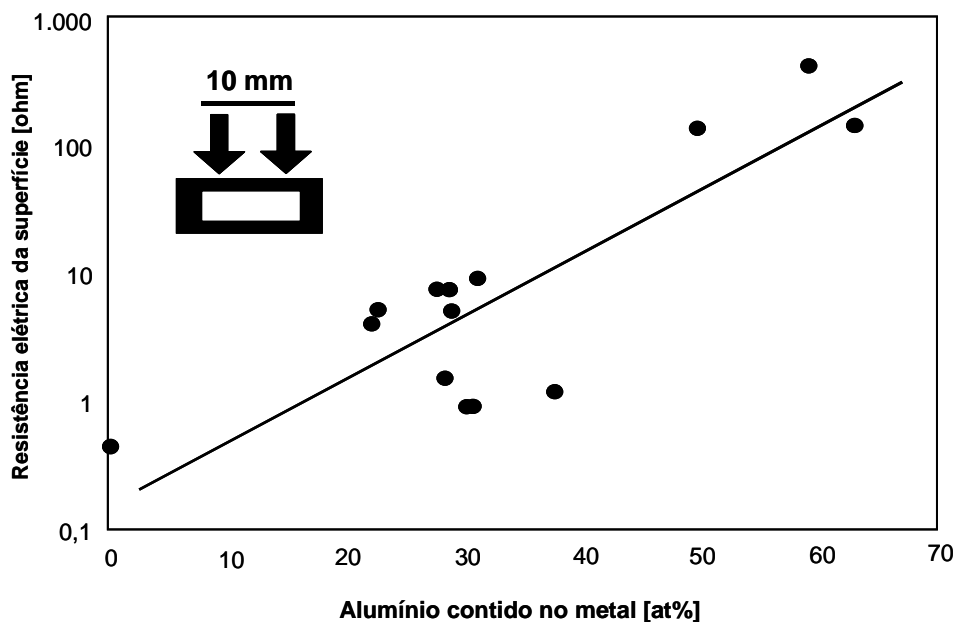


Figura 3.28 – Variação da resistência elétrica em função do teor de Al em filme de $(Cr_{1-x},Al_x)N$ (VETTER J. *et al*, 1998)

As propriedades mecânicas e tribológicas determinadas para filmes de $(Cr_{1-x},Al_x)N$, observadas em diversos estudos comparativos entre revestimentos a base de titânio e cromo com introdução de alumínio (SPAIN E. *et al*, 2005; CHEN L. *et al*, 2007; BRIZUELA M. *et al*, 2005), sugerem que, desde que a estrutura cristalina do revestimento seja controlada através da composição química, é possível obter filmes com alta dureza associada a uma estrutura austenítica, com características de alta taxa de encruamento. Comparando resultados de dureza obtidos por MACHADO, R (2005) e MANCOSU, R (2005) para o filme de CrN, com a força de 200mN, (valor de dureza máxima para CrN igual a 17GPa) com valores observados nas mesmas cargas para filmes de $(Cr_{1-x},Al_x)N$ (27GPa e 35 GPa), pode-se concluir que a introdução de alumínio ao filme CrN garante uma maior resistência mecânica que, associada ao valor de módulo de elasticidade relativamente baixo (alta resiliência) e uma boa tenacidade, refletirá em uma maior resistência ao desgaste abrasivo.

O grande desafio futuro será, devido à crescente demanda por realizar conformação mecânica sem utilização de fluidos de corte, melhorar ainda mais as propriedades de resistência ao desgaste a altas temperaturas de ferramentas e matrizes revestidas,

principalmente as com base em filmes de $(Cr_{1-x},Al_x)N$. Introdução de outros elementos de liga aos revestimentos existentes são sugeridos como tentativa de melhorar o desempenho dos conjugados. Existem trabalhos recentes neste sentido, como PFLÜGER E. *et al* (1999), que introduziram ítrio e cromo em filmes comerciais de TiAlN e TiN, obtendo bons resultados a extremas temperaturas; HASEGAWA H *et al* (2007), que analisaram e compararam o desempenho de revestimentos quaternários de $(Cr,Al)N$, onde foram introduzidos ítrio e silício ($(Cr, Al, Y)N$; $(Cr, Al, Si)N$ e $(Cr, Al, Si, Y)N$); BASNYAT P. *et al* (2007), que sugeriram a inclusão de prata em filmes de $(Cr,Al)N$ para manter o coeficiente de atrito a baixos níveis, mesmo a altas temperaturas, produzindo revestimentos de filmes de nanocompósitos e EZURA H. *et al* (2008), que propuseram o desenvolvimento de um novo filme para revestimentos: $(Ti, Cr, Al, Si)N$.

3.3 – Caracterização da Superfície

A maioria das superfícies tem espaçamentos (regulares e irregulares) que tendem a formar um padrão de acabamento, avaliados em termos macrométricos (dimensão, forma e orientação) e micrométricos (rugosidade). Este acabamento é gerado a partir de uma combinação de fatores, que vão desde características do próprio material (microestrutura, resistência mecânica etc) até o processo de fabricação utilizado na sua confecção (velocidade de corte e avanço de usinagem, tipo de ferramenta de corte etc).

A avaliação macrométrica e micrométrica do acabamento da superfície tornou-se importante a medida que, além de indicar a diferença entre a superfície real e a superfície geométrica, provê informações típicas de projeto. Ademais, tendo um entendimento do acabamento superficial, é possível prever comportamentos e controlar desempenho (mecânica, elétrica e óptica) de peças e componentes. Uma superfície típica para suportar cargas (mancal), por exemplo, requer uma rugosidade tal que seja capaz de reter lubrificante e ao mesmo tempo permitir contato com outra superfície com o nível mínimo de atrito. Deste modo, se for rugosa demais, vai piorar a segunda condição, mas se for polida demais, não será capaz de reter o lubrificante como desejado. A Figura 3.29 exemplifica a influência da rugosidade na vida útil de

um mancal de deslizamento em termos das capacidades de suportar carga e temperatura.

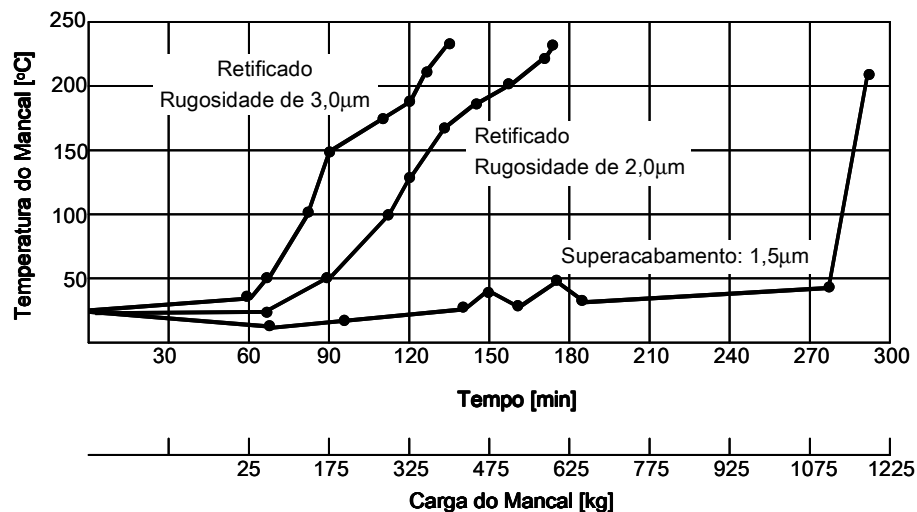


Figura 3.29 – Influência da rugosidade superficial na vida e temperatura de funcionamento de mancais de deslizamento (adaptado de AGOSTINHO O. L. *et al.*, 1997).

Vários autores na literatura demonstram as possibilidades de aplicação da caracterização superficial. PFESTORF M. *et al* (1998) estudaram o desempenho de matrizes de conformação mecânica associado a caracterização tridimensional de sua superfície. A análise foi feita sob a óptica dos parâmetros de razão máxima da área de vazios material/meio e volume de vazios material/meio, fazendo-se uma correlação com o coeficiente de atrito.

BLUNT L., EBDON S. (1996) procuram dimensionar as propriedades funcionais de um rebolo de retífica através de resultados de medição de parâmetros de caracterização superficial. Concluíram que a densidade de pico de rugosidade pode ser associada a densidade de pontos cortantes dos grãos de corte da superfície. NGUYEN A. T., BUTLER D. L. (2008) também estudaram a correlação de parâmetros de caracterização da superfície do rebolo com o desempenho do processo de retífica,

mostrando ser possível utilizar a caracterização em três dimensões para realizar análises quantitativas e qualitativas deste processo de fabricação.

DONG W. P. *et al* (1995) utilizaram a caracterização superficial em três dimensões para compreender a variação do desgaste ao longo do comprimento da camisa de um cilindro de motor a combustão interna.

Exemplos de aplicação para previsão de desempenho podem ser dados também em outras áreas do conhecimento, como a bioengenharia. Prever desempenho de implantes como próteses, válvulas de coração e até mesmo lentes de contato é relevante para evitar seu desgaste prematuro, o que implicaria em necessidade de intervenções cirúrgicas para correções. STOUT K. J., BLUNT L. A. (1995) resumiram a importância e aplicação da caracterização superficial em três dimensões para a bioengenharia e LAS CASAS E. B. *et al* (2008) mostram um exemplo de aplicação ao relacionar mecanismos de desgaste de dentes com a alteração da rugosidade superficial de seu esmalte. Parâmetros de rugosidade em três dimensões foram utilizados para caracterizar a superfície do esmalte.

Os resultados da avaliação da superfície podem ser aplicados nas mais diversas áreas. Todavia, a quantificação dos valores que classificam esta superfície não é trivial. Existe uma diversidade muito grande de processos de fabricação, funções e condições operacionais que influenciam na aquisição e avaliação dos resultados da medição. CHIFFRE L. de *et al* (2000) propõem um modelo de interação entre um dos fatores geradores da superfície (processos de fabricação), a função que a superfície deverá exercer e a sua caracterização (medição, visualização e quantificação). Para cada aplicação específica, é necessário observar as relações com cuidado, considerando as áreas de engenharia de superfície, controle de qualidade e controle de processo (Figura 3.30). Neste mesmo trabalho, CHIFFRE, L. de *et al* sugeriram a redução do número de parâmetros de caracterização de superfície. Somente a norma ISO prevê 57 diferentes tipos de parâmetros para caracterização em duas dimensões e mais 14 estão previstos para caracterização, apesar e ainda não regulamentada, em três dimensões. Esta quantidade de parâmetros, quando mal interpretados, causam ambigüidade e perdem sua função na prática industrial. A causa da existência de tantos parâmetros está associada a introdução, a partir da década de 1960, de técnicas digitais que incrementaram o desempenho dos instrumentos de medição,

permitindo a análise em três dimensões e a flexibilidade na filtragem e análise de dados (LONARDO P. M. *et al*, 2002)

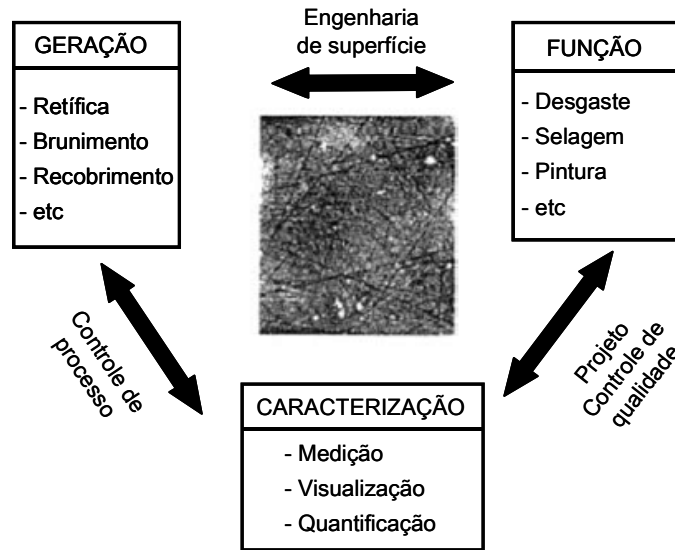


Figura 3.30 – Interação entre processos de fabricação, funções das superfícies e sua caracterização (adaptado de CHIFFRE L. *et al*, 2000)

Associado ao fenômeno de surgimento da grande variedade de parâmetros, está o desenvolvimento dos métodos e técnicas de medição, que também evoluíram com o aumento da capacidade de aquisição e processamento de dados a partir da década de 60. Atualmente, existem várias novas técnicas sendo estudadas e testadas, o que permite uma grande diversidade de aplicação. Algumas envolvem exame da superfície por métodos ópticos (de não contato), outros por contato físico através de um ponta e outros através de medidas térmicas, elétricas, pneumáticas por ultrassom, utilizando microscopia eletrônica ou até mesmo por vazamento de líquido entre a superfície e um plano oposto (HUTCHINGS I. M., 1992). Existem proposições de combinação de técnicas existentes como, por exemplo, a associação das técnicas de ondulação com a do modelamento por fractais, resultando na técnica chamada de híbrida por fractais-ondulações (STACHOVIK G.W.; PODSIADLO P, 2004). Há estudos para alterações no modo como calcular os parâmetros, modificando formulações matemáticas. CIULLI E. *et al* (2007) por exemplo, consideram que a abordagem estatística, utilizando a

análise estocástica para cálculo da rugosidade de superfícies depois do período de *running in* (período inicial de desgaste por deslizamento) produz resultados pobres e cita que a abordagem determinística é mais apropriada. Parábolas são então utilizadas para descrever o perfil real da superfície. PFEIFER T. *et al* (1997) mostram uma nova abordagem para o cálculo da rugosidade utilizando interferometria eletrônica. A técnica mostra-se vantajosa quando se mede rugosidade em superfícies com descontinuidade. HANADA H. *et al* (2007) desenvolveram uma técnica de filtragem digital robusta para medição de topografia em três dimensões. A técnica proposta agrega flexibilidade e praticidade aos métodos de medição existentes, pois minimiza os efeitos de borda que provocam distorções em áreas retangulares medidas.

Para cada tipo de método ou técnica há a possibilidade da existência de mais de um tipo de instrumento de medição, que utilizam diferentes princípios de medição. LONARDO P. M. *et al* (2002) procuraram resumir e descrever os instrumentos de medição utilizados para caracterizar superfícies (rugosidade e integridade superficial) em diversos níveis de escala (macro, micro e nanométricos), aplicáveis a diferentes métodos. STOUT K. J., BLUNT L. (1994) classificaram os instrumentos de medição mais comumente utilizados em três grandes categorias, a saber:

- sistema de aquisição de dados por perfilometria com utilização de pontas

utiliza o método mais antigo de medição e caracterização superficial. Através do contato físico de uma ponta com a superfície é possível reproduzir o perfil de rugosidade. Os instrumentos de medição para três dimensões foram derivados diretamente dos instrumentos para medição em duas dimensões. São compostos basicamente de duas partes: mecânica, responsável pela medição, amplificação e saída do sinal e a eletrônica (microcomputador), responsável pelo controle da ponta, processamento dos dados e caracterização da superfície. Este instrumento não é recomendado para medir superfícies macias, pois, devido a pressão de contato da ponta, pode danificar a superfície medida. Outras limitações do uso deste instrumento são o longo tempo de medição para análises em três dimensões, a influência do raio da ponta na aquisição de dados, o formato da ponta e a característica dinâmica da medição.

- sistema de aquisição de dados com utilização de sistemas ópticos

a utilização destes instrumentos para medição de rugosidade em três dimensões vem crescendo a medida que os avanços tecnológicos nos sistemas de aquisição vão ocorrendo. Sua preferência é entendida por utilizar métodos onde o contato físico com a superfície não é necessário. Os instrumentos podem ser baseados em três diferentes métodos de medição: interferometria, luz refletida e detecção de foco. As limitações de utilização destes instrumentos estão nas interações da luz emitida como o meio e com a própria superfície medida, que podem causar distorções nos resultados.

- digitalização por imagem e seus derivados

inclui instrumentos como o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e o microscópio de tunelamento (STM), que são os mais precisos instrumentos de medição de rugosidade superficial disponíveis. Com eles, é possível se observar e obter dados em escalas atômicas, apesar da faixa de medição ser reduzida. As limitações são o alto custo, a pouca praticidade para uso em linhas de fabricação, o longo tempo de preparação das amostras e o tamanho das mesmas.

A Tabela III.4 resume os tipos de instrumentos e suas principais características.

Tabela III.4 - Características de Sistema para Medição de Rugosidade em Três Dimensões (STOUT K. J., BLUNT L., 1994)

	Perfilometria	Óptico	Digitalização de Imagem
Resolução Vertical	Alta	Alta	Muito alta
Faixa Vertical	Grande	Pequena	Muito pequena
Resolução Horizontal	Média	Alta	Muito alta
Faixa Horizontal	Grande	Média	Muito pequena
Modo de medição	Contato	Não contato	Não contato
Tempo de Preparação	Curto	Razoável	Longo
Custo do Instrumento	Médio	Médio	Alto
Influência da Inclinação da Amostra	Não	Sim	Sim
Influência do Meio	Não muito alta	Alta	Muito alta
Influência da Reflexividade da Amostra	Não	Sim	Não
Dependência da Condutividade da Amostra	Não	Sim	Sim
Danos a Superfície da Amostra	Facilmente	Não	Não
Áreas de Aplicação	Automobilística, máquinas de usinagem	Pintura, bioengenharia, meios ópticos	Meios ópticos, materiais eletrônicos, bioengenharia

Devido a diversidade de técnicas e instrumentos disponíveis, existem estudos na literatura que procuram avaliar a consistência entre resultados obtidos por diferentes meios. LEACH R. (2004) descreveu discrepâncias de resultados entre medições de topografia superficial em duas e três dimensões utilizando-se a perfilometria. A utilização de algoritmos diferentes para adquirir, filtrar e calcular os dados entre

- projetadas e estruturadas
- resultantes de prototipagem rápida
- biomateriais
- ópticas
- macias
- com reentrâncias

Mesmo utilizando a metodologia, LONARDO P. M (2002) chamaram a atenção para o fato de que, ao utilizar diferentes técnicas para caracterizar a mesma superfície, resultados diferentes podem ser obtidos, o que exige atenção na análise dos dados.

3.3.1 – Perfilometria

A perfilometria com utilização de ponta é dos métodos mais comuns e mais utilizados para caracterização superficial. Seu princípio é relativamente simples e pode ser observado na Figura 3.32. Consiste em passar uma ponta fina a uma velocidade baixa e constante ao longo da superfície a ser examinada. A medida que a ponta passa através da superfície, ela movimenta-se para cima e para baixo. O deslocamento vertical da ponta é convertido em um sinal elétrico, que é amplificado antes de ser transformado em um sinal digital. Este sinal digital é então analisado numericamente através de formulações matemáticas e o resultado é apresentado sob duas formas distintas: um gráfico ou uma tabela, com valores numéricos correspondentes a parâmetros de rugosidade pré-selecionados. Com a eletrônica moderna, a maioria dos componentes citados cabe dentro de uma única unidade portátil para análise, chamada de apalpador.

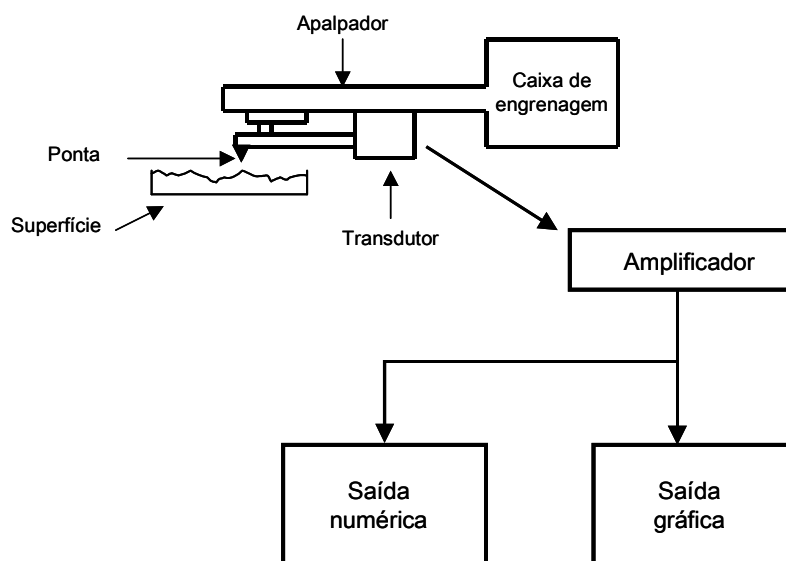


Figura 3.32 - Princípio de funcionamento de um perfilômetro (adaptado de HUTCHINGS I. M., 1992)

O equipamento utilizado para fazer as medições chama-se perfilometro e a representação gráfica gerada como resultado da medição não reproduz exatamente a mesma forma real da superfície por diversas razões (HUTCHINGS I. M., 1992). A primeira e mais significativa delas é a escala empregada pelo instrumento das direções horizontal e vertical. As dimensões associadas a posição vertical são inúmeras vezes menores que as da direção horizontal. Portanto, há uma necessidade de se comprimir os dados da direção vertical para que se possa ter alguma distinção visual de valores nesta direção. A compressão usual em relação aos dados na direção horizontal é de 50:1. Ao analisar os resultados, deve-se sempre ter em mente que os dados na direção vertical estão comprimidos e que, portanto, o perfil real é bem menos íngreme do que o apresentado na imagem.

Uma segunda razão que influencia e limita a utilização da perfilometria é o formato da ponta que é normalmente cônica ou piramidal, com ângulo de 60° ou 90° e raio variando de 1 a 5µm. A combinação de formato e tamanho não permite que a ponta penetre completamente nos vales mais estreitos da superfície, ocasionando erros e medição. A Figura 3.33 mostra uma fotografia de uma ponta utilizada em perfilometria.

Outro fator limitador é a força exercida pela ponta na superfície. Apesar de muito pequena, pode ser suficiente para danificar superfícies macias.

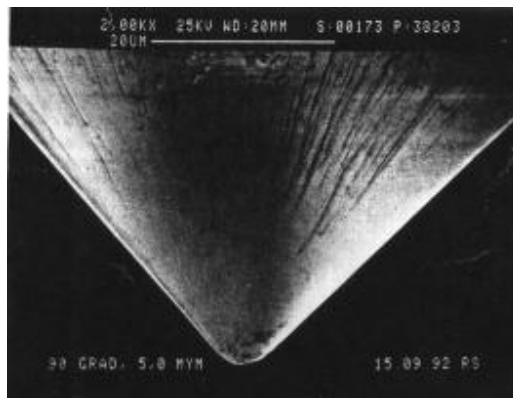


Figura 3.33 – Ponta de diamante de raio igual a $5\mu\text{m}$. Foto tirada por microscópio eletrônico, aumento de 2.000x. (MUMMERY L., 1992)

MUMMERY L. (1992) descreve detalhadamente cada componente de um perfilômetro, desde o seu sistema de aquisição de dados até o seu processamento. Segundo o autor, o primeiro componente a ser considerado é chamado de apalpador. Ele é o contato do instrumento de medição com a superfície a ser analisada. Um apalpador é composto por três outros componentes: a ponta propriamente dita, o transdutor e o patim. A ponta é normalmente feita de diamante e é ela quem faz o contato entre a superfície e a carcaça do apalpador. Está sujeita a desgaste ao longo do tempo e exige que a integridade de seu formato seja verificada de tempos em tempos. A ponta pode ter vários formatos, sendo o mais usual o cônico de 90° . Ela constitui o primeiro filtro do perfilômetro (chamado filtro de baixa) a medida que o seu formato e a diferença de raio limita a sua capacidade de penetrar em todas as reentrâncias da superfície. Deste modo, resultados diferentes podem ser obtidos utilizando-se pontas diferentes. A Figura 3.34 exemplifica esta diferença.

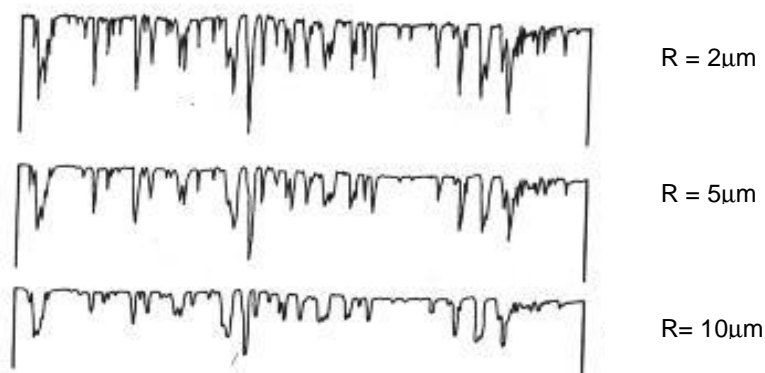


Figura 3.34 - Comparação entre medidas de perfilometria obtidas com diferentes tamanhos de raio de ponta (MUMMERY L., 1992)

O transdutor, segundo componente do apalpador, é responsável por captar os movimentos da ponta e transformá-lo em sinal elétrico. Existem pelo menos quatro tipos diferentes de transdutores: indutivo, piezoelétrico, bobina e laser interferométrico. O transdutor indutivo é o mais comumente utilizado nos perfilômetros de alta precisão.

O terceiro componente divide os apalpadores em duas categorias: os com patins e os sem patins. Os patins são estruturas que ficam em contato direto com a superfície que esta sendo medida. O apalpador fica suportado pelo patim, e, a medida que o movimento ocorre, o mesmo acompanha as macro irregularidades da superfície (ondulações e formas). Devido ao seu princípio e funcionamento, o patim funciona como o segundo tipo de filtro de aquisição de dados de um perfilômetro, chamado filtro de alta, pois somente a rugosidade é percebida pela ponta. Um apalpador com patim é mais robusto que um sem patim, permitindo seu uso em áreas de produção industrial sem muitos problemas. Como a ponta está próxima da referência de medição (patim), um apalpador com patim também é menos sensível a vibrações.

Os demais componentes de um perfilômetro são os conversores de sinal analógico em digital e um *software* de análise de dados, que normalmente está instalado em um computador com capacidade de armazenamento de dados e telas com saídas gráficas e numéricas. Atualmente, com o avanço das técnicas computacionais, os *softwares* disponíveis para tratar os dados adquiridos são capazes de trabalhar com alto desempenho e realizar cálculos estatísticos para caracterização superficial em duas e

três dimensões, antes demorados e dispendiosos. É através dos filtros digitais disponibilizados pelos *softwares* que se consegue identificar e isolar as características de uma superfície, distinguindo os diferentes tipos de desvios existentes (Figura 3.35), sendo que os principais deles são o desvio de forma, a ondulação e a rugosidade.





Desvio de Forma (figuras ilustrativas)	Exemplos de tipos de Desvios	Exemplos de Causas
Classe 1: desvio de forma 	Arredondamentos, desalinhamentos, etc	Fixação incorreta da peça, distorções de resistência mecânica, desgaste, problemas nas guias de usinagem, deformações da máquina
Classe 2: desvio de forma 	Ondulações	Excentricidades, desvios na geometria da ferramenta, vibração da máquina de usinar
Classe 3: rugosidade 	Estrias	Formato da aresta da ferramenta de corte, avanço da ferramenta
Classe 4: rugosidade 	Protuberâncias, marcas de aragem, descamação	Processo de formação de cavaco, deformação de material durante jateamento, formação de protuberâncias durante tratamento eletrolítico
Classe 5: rugosidade <u>Nota:</u> sem capacidade de reprodução de figura em escala	Estrutura cristalina	Processo de cristalização, modificação da superfície através de reação química (tratamento ácido), corrosão etc
Classe 6: rugosidade <u>Nota:</u> sem capacidade de reprodução de figura em escala.	Defeitos cristalinos	

Figura 3.35 - Classificação das categorias de características de um perfil de uma superfície (adaptação de MUMMERY L., 1992)

Para utilizar corretamente os recursos computacionais, a escolha e aplicação de filtros, assim como de parâmetros de rugosidade deve ser criteriosa. O uso dos filtros, por exemplo, é regulamentado por normas. O filtro utilizado para separar o que é ondulação (desvio macrogeométrico) de rugosidade (desvio microgeométrico) é denominado comprimento de *cut off*. A Tabela III.5 mostra um exemplo de seleção de comprimento de *cut off* sugerido pela norma DIN4768. Nela, o comprimento deve ser escolhido de acordo com o espaçamento periódico entre os picos de rugosidade do perfil.

Tabela III.5 – Seleção do comprimento de *cut off* de acordo com a norma DIN4768
(adaptado de MUMMERY L., 1992)

Cut off λ_c [mm]	Espessamento Periódico entre Picos [mm]	Rugosidade Medida	
		Ra [μm]	R _z (DIN) [μm]
0,08	<0,032	-	-
0,25	0,032 – 0,1	<0,1	<0,5
0,8	0,1 – 0,32	0,1 – 2	0,5 – 10
2,5	0,32 – 1	2 – 10	10 – 30
8	>1	>10	>30

A Figura 3.36 ilustra as possibilidades de respostas devido a utilização de filtros distintos para o mesmo perfil de rugosidade.

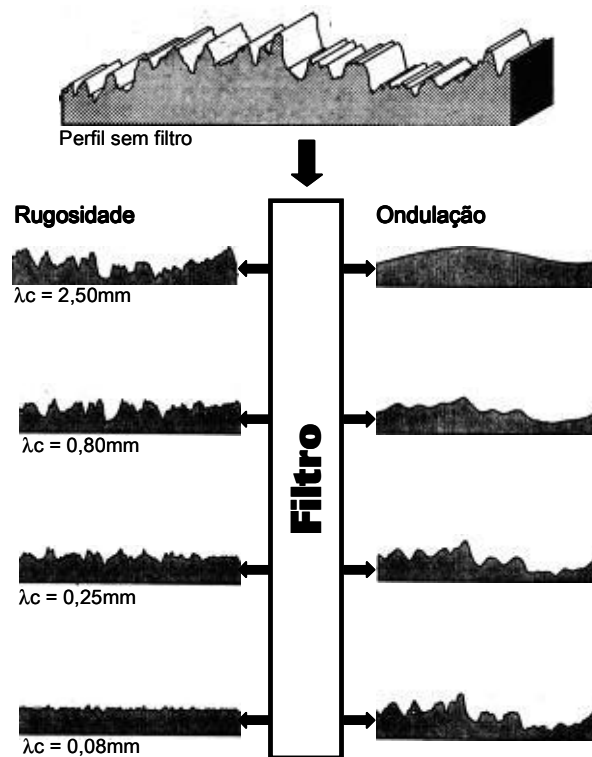


Figura 3.36 - Exemplos de utilização de diferentes comprimentos de *cut off* para o mesmo perfil de rugosidade (adaptado de MUMMERY L., 1992).

O advento do computador e de novas técnicas de perfilometria (perfilometria óptica, por exemplo), veio a facilitar a aquisição e tratamento de dados, o que resultou na criação de inúmeros parâmetros de análise. O grande problema da avaliação de superfícies passou a ser então a escolha dos parâmetros que melhor reproduzem a superfície analisada, fornecendo informações úteis a seu respeito. Se duas superfícies com características de rugosidade diferentes entre si apresentarem o mesmo valor para o mesmo parâmetro, deve-se suspeitar que algo está errado. Outros parâmetros, mais sensíveis as diferenças entre as superfícies, devem então ser escolhidos de modo que reflitam as mesmas. Um parâmetro de rugosidade somente deve ser utilizado se ele se mostrar sensível à característica que se está avaliando da superfície. Devido a grande quantidade de parâmetros hoje disponíveis para análise de superfícies, eles são normalmente classificados em grupos para facilitar a sua escolha. ABRÃO A. M. *et al* (2009) classifica os parâmetros em três grandes grupos, a saber:

- parâmetros de amplitude: considera somente as alturas dos picos e profundidades dos vales, sem considerar o espaçamento entre eles

- parâmetros de espaço: determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície

- parâmetros híbridos: combina os parâmetros de amplitude com os de espaço.

Além dos parâmetros citados, MUMMERY L. (1992) cita os parâmetros estatísticos e de ondulação e STOUT K. J., BLUNT L (1994) descrevem os parâmetros funcionais.

A seguir, será dada uma breve descrição acerca dos principais parâmetros de rugosidade utilizados na indústria.

a) Rugosidade média (R_a)

É amplamente utilizado devido a facilidade de medição. O equipamento que mede a rugosidade R_a deve ter alta repetibilidade, pois a medida é uma média de valores. É a soma das alturas dos picos e das profundidades dos vales a partir de uma linha média que separa as áreas médias dos picos das áreas médias dos vales.

b) Altura média entre pico e vale (R_z)

O cálculo da altura média entre pico e vale é feito entre os cinco comprimentos de *cut off* do comprimento útil L_m (comprimento total L_t excluindo-se as extremidades) A medida de R_z é útil para monitorar processo de produção, pois é mais sensível a variações do que o R_a . Juntamente com o parâmetro R_{max} (maior distância entre pico e vale), é uma importante ferramenta para monitoramento de variação de acabamento final de peças como selos mecânicos. Se o valor de R_z e R_{max} são próximos, há consistência no acabamento. Porém, se forem muito diferentes, há indicação de defeito puntual.

c) Altura média de pico (R_{pm}); máxima altura de pico (R_p); altura média de vale (R_{vm}) e máxima altura de vale (R_v)

São medidos de forma análoga ao R_z , porém, a distância será do pico (ou vale) até a linha média (determinada no cálculo do R_a). Estes parâmetros, em conjunto com o R_z , são muito utilizados para prever as características superficiais de um rolamento ou mancal. Uma ótima superfície de rolamento tem a forma de platô, com poucos picos e vales profundos. Deste modo, a relação R_{pm} por R_z deverá sempre ser baixa.

d) Contagem normalizada de picos (N_R)

Determina a quantidade de picos a partir de uma referência. Esta referência é chamada profundidade de corte e é determinada arbitrariamente, a partir da linha média de cada perfil. Os picos contados além do comprimento útil L_m são normalizados para se ter um número de picos por unidade de comprimento (ou área, se a análise for em três dimensões). Este parâmetro é muito utilizado na indústria de fabricação de chapas (siderurgia, estampagem etc) e ainda tem aplicações na indústria automobilística, de fabricação de moldes para plásticos e recobrimentos por *spray*. Um N_R baixo, por exemplo, indica presença de picos espaçados o que pode ser problema para adesão de tintas na superfície.

e) Razão de material (T_{pa}/T_{pi})

Mede a razão entre a quantidade dos materiais do meio e da superfície. A medição deste parâmetro é feita através de uma curva, denominada Curva de Abbot-Firestone. Quanto mais agudo o ponto de inflexão, mais abrupta é a transição de um material para o outro e menos rugosa é a superfície. Deste modo, a profundidade total de transição coincide com a profundidade total da rugosidade. A referência inicial para construção da curva é o pico mais alto do perfil da superfície, mas ela pode ser alterada arbitrariamente.

f) Altura reduzida de pico (R_{pk}) e altura reduzida de vale (R_{vk})

Estes parâmetros são exclusivamente utilizados para superfícies tipo platô, com rugosidade assimétrica. O resultado é uma curva de razão de material de onde são

deduzidos os pontos de inflexão que são a base de cálculo para as alturas reduzidas de pico e vale. Este método minimiza a influência de picos e vales isolados no cálculo da altura média (para picos) e profundidade média (para vales). São muito utilizados na prática para determinar superfícies características de superfícies cerâmicas que funcionam como selos mecânicos.

g) *Skewness* (S_k)

É um parâmetro do tipo estatístico que mostra o modo de distribuição de amplitudes. O *skewness* de um perfil indica a simetria da curva de distribuição das amplitudes dos picos e vales em relação a linha média do perfil. Valores negativos deste parâmetro revelam concentração de material próximo ao topo da superfície. É um parâmetro muito sensível a picos e/ou vales isolados, não sendo, portanto, muito indicado para avaliação de superfícies do tipo platô.

h) *Kurtosis* (K_u)

Assim como o *skewness*, a *kurtosis* é um parâmetro estatístico que mostra o modo de distribuição de amplitudes, porém, é uma função de momento de quarta ordem. O parâmetro revela se o perfil de rugosidade apresenta picos e/ou vales agudos e grandes. Um valor de K_u maior que três indica perfis com esta característica. Se for menor que três, há a presença de muitos picos e/ou vales pequenos e arredondados na superfície. Também é muito sensível a presença de picos e vales isolados. Esta alta sensibilidade inviabiliza a sua utilização em termos práticos para análise de rugosidade superficial.

i) Índice de suporte de carga (S_{bi})

É a razão do desvio da raiz quadrática média sobre uma altura de perfil que forneça 5% de área de mancal do material. A Equação (3.2) mostra como é efetuado o cálculo do S_{bi} . Um alto índice de suporte de carga indica uma boa propriedade de mancal. Para um perfil com distribuição Gaussiana, o índice é 0.608.

$$S_{bi} = s_q/\eta_{0,05} = 1/h_{0,05} \quad (\text{Equação 3.2})$$

3.4 – Desgaste

Embora reconhecidamente importante para economia, o estudo sobre o desgaste começou a ser aprofundado somente em 1966, a partir o surgimento de conceitos de tribologia e engenharia de superfície. O desenvolvimento de teorias modernas sobre o assunto se deu principalmente na década de 1970, mas ainda hoje a definição de desgaste é objeto de discussão na literatura. RABINOWICZ (1995) atribui este interesse tardio a três diferentes fatores: pouca importância em requisitos de projetos no passado, conseqüências do desgaste são observadas normalmente a longo prazo e a dificuldade inerente ao estudo dos mecanismos que envolvem o desgaste, exigindo conhecimentos mais aprofundados em áreas diversificadas da ciência, como física, química, metalurgia, mecânica e elétrica.

LUDEMA K. C. (1996) descreve pelo menos trinta e quatro termos diferentes utilizados na literatura para definir desgaste. Estes termos foram separados pelo autor em seis grandes grupos, classificados desde os mais subjetivos e específicos até os mais abrangentes e simples.

BAYER R. G. (2004) define desgaste com sendo “um dano progressivo a uma superfície causado pelo movimento relativo a outra substância”. Segundo BAYER R. G. (2004), esta definição é a que melhor atende a propósitos de engenharia. Um ponto importante a ser ressaltado é que dano, neste caso, não significa necessariamente perda de material, mas sim a aspectos que impliquem em perda de função básica de projeto, como, por exemplo, o aparecimento de trincas superficiais em janelas de avião, impedindo parcialmente a visão. Nesta definição, também considera-se que o contato entre as partes não se limita somente a escorregamento e rolagem, podendo ser considerado também impacto e contato envolvendo fluidos em movimento. Deste modo, esta definição é mais abrangente, o que implica em medir o desgaste utilizando diferentes parâmetros de engenharia, como nível de vibração, aparência visual, rugosidade etc.

Uma outra definição menos abrangente e mais clássica para desgaste é apresentada por BRESSAN J. D. (2007): “perda progressiva de massa da superfície operante”, corroborada por RABINOWICZ (1995), que diz que desgaste pode ser definido como

“remoção de material de uma superfície sólida como resultado de uma ação mecânica”.

Independente da sua definição, são conhecidas pelo menos três abordagens deferentes para classificação do desgaste. A primeira é a partir do exame das superfícies desgastadas. Palavras como polimento e ranhuras são utilizadas neste caso. A segunda é a partir dos mecanismos físicos que provocaram o desgaste, como adesão, abrasão e descamação. A terceira e última abordagem leva em consideração as condições que cercam o desgaste, descrevendo suas conseqüências. Palavras como leve e severo assim como frases do tipo “desgaste metálico a alta temperatura” são normalmente utilizadas. Apesar da existência e conhecimento das abordagens de classificação do desgaste, a classificação em si não está normatizada, podendo haver variações na literatura. RABINOWICZ (1995) explicita que a pesquisa moderna classifica o desgaste em quatro tipos: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por corrosão e desgaste por fadiga superficial (*fretting*). O autor ainda cita outros tipos de desgaste como sendo variações dos quatro principais citados. Estes outros tipos seriam uma descrição de diferentes maneiras de se introduzir o carregamento e o contato necessários para que ocorra o desgaste. São eles: erosão, erosão a baixa velocidade, erosão a alta velocidade, erosão por cavitação e erosão causada por gás. Nos parágrafos seguintes será feita uma abordagem sobre os quatro principais tipos de desgaste.

3.4.1 – Desgaste por Corrosão

Este tipo de desgaste ocorre quando o movimento entre as partes acontece em um ambiente corrosivo. Sem o movimento relativo, a corrosão, provocada por mecanismos químicos, deveria se concentrar na superfície naturalmente protegida do material (presença de óxidos, por exemplo), não evoluindo para o interior do material. Com o movimento entre dois materiais, a camada protetora é retirada ou diminuída constantemente, propiciando a propagação da corrosão.

3.4.2 – Desgaste por Fadiga Superficial

Desgaste por fadiga é normalmente observado em deslizamento repetitivo entre as partes. O mecanismo atuante neste caso é a deformação por ciclo repetitivo (BAYER R. G., 2004). O ciclo constante de cargas em sentidos opostos induz o aparecimento de trincas superficiais e/ou subsuperficiais. Eventualmente, com a continuidade do movimento, estas trincas podem evoluir para a quebra e arrancamento de material, formando vazios na superfície (Figura 3.37).

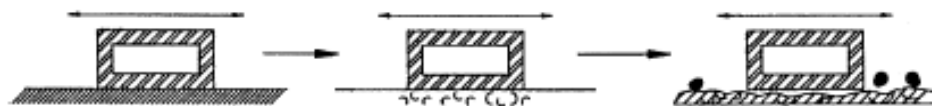


Figura 3.37 - Ilustração conceitual do mecanismo de deformação por ciclo repetitivo, ocasionando o desgaste por fadiga (BAYER R. G., 2004).

3.4.3 – Desgaste Abrasivo

No desgaste abrasivo, material é removido ou deslocado da superfície por partículas ou rugosidades (protuberâncias) duras presentes na superfície do contra corpo deslizante. O material mais macio é então forçado no sentido oposto do deslizamento, escorregando ao longo da superfície. As partículas duras podem estar livres para se movimentar entre as superfícies sólidas ou podem estar fixas nas protuberâncias na superfície do contra corpo. O primeiro processo é chamado de desgaste abrasivo de três corpos, enquanto o segundo é denominado de desgaste abrasivo de dois corpos. As partículas livres podem ser provenientes tanto do ambiente externo (contaminação) quanto do interno (partículas endurecidas previamente arrancadas da superfície de um dos materiais, como, por exemplo, provenientes de oxidação de um dos corpos). Um terceiro processo ainda pode ser identificado e ocorre quando partículas sólidas duras presentes em gases ou líquidos direcionados contra a superfície do material causam danos ao mesmo (HUTCHINGS I. M., 1992). Este terceiro tipo é chamado de erosão e ocorre normalmente com velocidade dos fluidos (gás ou líquido) variando de

5 a 500m/s. Através da Figura 3.38 é possível observar esquematicamente a diferença entre os três tipos de mecanismos.

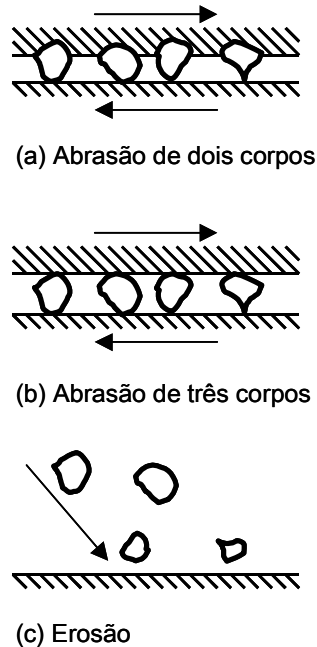


Figura 3.38 – Ilustração dos três tipos de desgaste abrasivo: a) por dois corpos; b) por três corpos e c) erosão (adaptado de HUTCHINGS I. M., 1992).

Outros termos às vezes são utilizados para distinguir o desgaste abrasivo. São baseados na tensão de compressão existente entre as partículas duras e a superfície do material. Deste modo, tem-se o desgaste abrasivo por alta tensão e o desgaste abrasivo por baixa tensão. O primeiro pressupõe a quebra das partículas duras durante o processo de desgaste. Está normalmente associado a retífica de superfície (*grinding*) e pode ocorrer tanto com dois quanto com três corpos. O termo *gouging* é normalmente utilizado para descrever formas particulares e severas de desgaste abrasivo por alta tensão (BRESSAN J. D., 2007). No desgaste abrasivo por baixa tensão, as partículas duras permanecem intactas e são movimentadas através da superfície de deslizamento, cortando e marcando a superfície mais macia em escala microscópica (*ploughing*).

De um modo geral, o desgaste abrasivo, desde de que controlado, é muito utilizado na indústria de construção mecânica. Processos de jateamento e polimento envolvem o

desgaste abrasivo de três corpos. Sua utilização se deve à sua facilidade de uso, alta reprodutibilidade e alta produtividade.

Para se controlar o processo de desgaste abrasivo, é necessário entender os parâmetros que influenciam no comportamento do desgaste em si. CZICHOS H. (1978) e BAYER R. G. (1985) categorizam estes parâmetros conforme abaixo:

- parâmetros do material: composição, microestrutura, propriedades mecânicas (tensão de escoamento, ruptura, ductilidade etc), tenacidade a fratura, condutividade térmica, dureza etc;
- parâmetros de projeto: formato, carregamento, nível de força/impacto, tipo de movimento (escorregamento, rolamento), acabamento superficial, vibração e tempo de ciclo;
- parâmetros do meio ambiente: temperatura, umidade, pressão externa, pH, presença de contaminantes etc;
- parâmetros de lubrificação: tipo de lubrificante, estabilidade do lubrificante, existência ou não do mesmo etc.

Além dos parâmetros citados acima, as características das partículas abrasivas é de suma importância. Fatores como formato, tamanho, dureza, tensão de escoamento e concentração influenciam muito na severidade do desgaste abrasivo. A Figura 3.39 mostra um exemplo da influência do tamanho das partículas no desgaste abrasivo de dois e três corpos assim como na erosão.

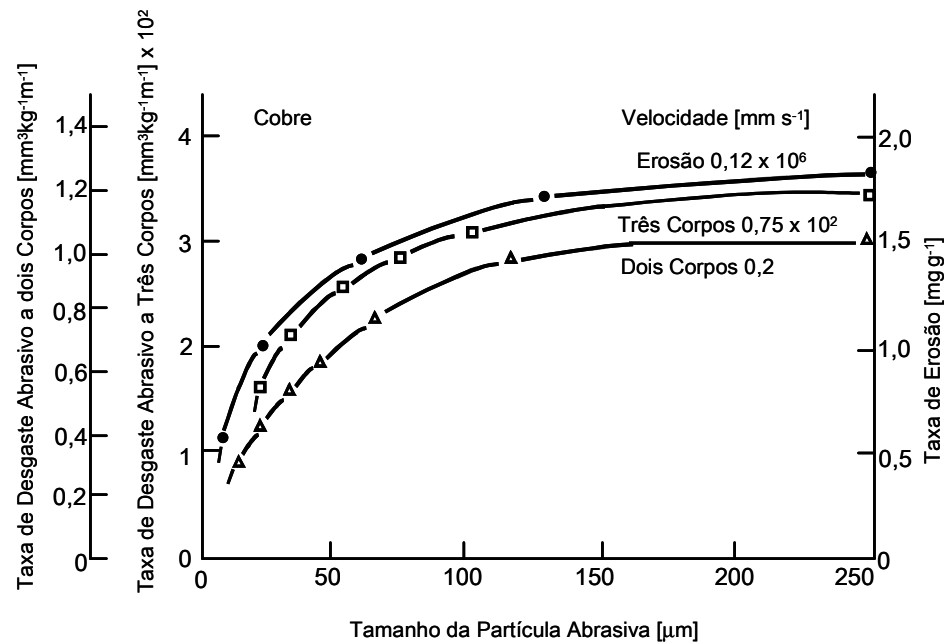


Figura 3.39 – Taxa de desgaste de cobre sob condições de desgaste abrasivo de dois e três corpos e erosão, contra partículas de carbeto de silício de diferentes tamanhos (adaptado de HUTCHINGS I. M., 1992).

3.4.4 – Desgaste por Deslizamento

Este tipo de desgaste ocorre quando duas superfícies sólidas deslizam uma sobre a outra, com ou sem a presença de lubrificantes. Segundo HUTCHINGS I.M. (1992), no processo de desgaste por deslizamento, a adesão desempenha importante papel, mas não pode ser entendida com um tipo de desgaste, mas sim como um dos muitos mecanismos físico-químicos envolvidos no desgaste por deslizamento. RABINOWICZ E. (1995) já considera a adesão como realmente uma forma de desgaste existente quando uma superfície sólida desliza ou é pressionada sobre a outra, sempre havendo transferência e/ou perda de massa.

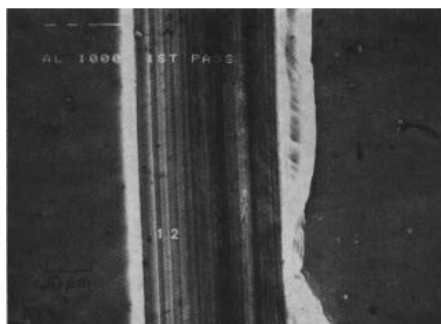
A despeito da discussão se a adesão é uma forma ou processo de desgaste, no desgaste por deslizamento podem existir simultaneamente vários mecanismos atuantes, como a própria adesão e o corte, ou outros associados a desgaste mais severo, como *scuffing* ou *scoring* (dano localizado da superfície associado a soldagem

no estado sólido entre as superfícies deslizantes, podendo implicar em riscagem por partículas duras) e *galling* (mais severo que o *scuffing* e está associado a descamação da superfície). É importante ressaltar que sempre um mecanismo irá se sobrepor aos demais, atuando de forma predominante.

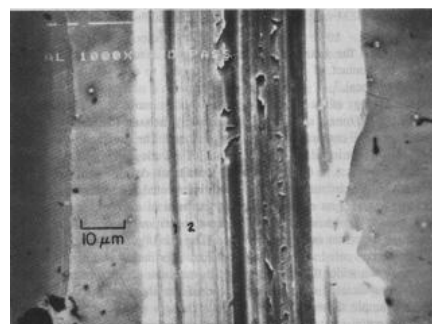
De modo geral, pode-se separar o desgaste por deslizamento em três fases distintas, independente do mecanismo atuante: período de *running in*, período de regime permanente e período de *run out*. Dos três períodos, o primeiro é normalmente o associado ao acomodamento entre as superfícies. Nesta fase, o regime é instável. As asperezas das superfícies estão em contato intenso, sendo deformadas e quebradas, fazendo com que a área de contato real mude o tempo todo, até que se alcance uma área constante, capaz de suportar a carga normal aplicada (HUTCHINGS I., 1992). Este período apresenta uma alta taxa de desgaste, associada a um regime severo, marcado pelo mecanismo da adesão e deformação plástica das asperezas. Alcançado o equilíbrio, o sistema entra em regime constante, com taxa de desgaste invariável e mecanismo oxidativo de desgaste predominante até o período de *run out*, onde há novamente um aumento da taxa de desgaste devido a falha efetiva do material. Para cada período citado, há um comportamento de transição em termos de mecanismos de desgaste. VIAFARA C.C.(2010) constatou que, ao se alterar as condições de operação do sistema tribológico, o tempo de transição se altera. Em seu trabalho, a relação de dureza de dois materiais que deslizam entre si foi modificada e constatou-se que a dureza do material mais duro exerceu papel importante no tempo de transição de um regime para o outro. Foi identificado, após o *running in*, um período de mecanismo severo de desgaste antes de se iniciar o moderado. A operação dos mecanismos de desgaste possui então uma forte dependência das características do sistema tribológico e a variação de fatores como carga, velocidade e geometria contituem-se como a causa deste primeiro tipo de transição. Um segundo tipo de transição pode ser reconhecido por aquele que ocorre durante o processo de deslizamento, com um sistema tribológico determinado. Esta segunda transição de um regime severo para um moderado, quando ocorre logo após o *running in*, é por vezes confundida com a própria fase um do desgaste por deslizamento.

Várias são as técnicas utilizadas para tentar caracterizar e definir os mecanismos de desgaste atuantes durante o desgaste por deslizamento. Estudo das superfícies da trilha de desgaste e do contra corpo com microscópio eletrônico de varredura (MEV)

e/ou microscópio óptico é feito para identificar evidências de transferência de material, para se analisar as marcas de desgaste e observar dimensões. Análise química das superfícies através de difração de raios X ajuda a confirmar e quantificar a presença de elementos de um material em outro, além de observar formação de novas substâncias, como óxidos. Elaboração das curvas de força de atrito e coeficiente de atrito pela distância deslizada como consequência direta de ensaios de desgaste fornece informações sobre o comportamento dos materiais ao longo do tempo. A medição da rugosidade da trilha em duas ou três dimensões ajuda a entender as alterações superficiais ao longo do desgaste e, com o avanço das técnicas de perfilometria, é possível calcular volumes e apurar valores de parâmetros de rugosidade com maior facilidade e precisão (LAS CASAS E. B. *et al*, 2008; ROSEN B.G., *et al*, 1996). Dados complementares sobre mecanismos de desgaste também podem ser deduzidos a partir das partículas de desgaste. Sobre algumas dessas técnicas, RUFF *et al* (1981) realizaram três diferentes experimentos para desenvolver a aprimorar os estudos sobre os mecanismos de desgaste em materiais metálicos. No primeiro deles, um dispositivo foi construído para que fosse possível tirar fotos da trilha de desgaste de um sistema pino sobre disco (esfera de aço AISI 52100 e corpo de prova de alumínio). Para tanto, um microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi utilizado, capturando uma imagem a cada volta completa do disco, que girava a uma velocidade de 0,1rpm. A intenção foi analisar em tempo real a evolução do desgaste no corpo de prova. Neste experimento, observou-se que houve transferência de material do corpo de prova para a esfera logo na primeira volta. Como consequência desta adesão, a trilha de desgaste começou a apresentar-se mais profunda e menos larga (Figura 3.40).



(a)



(b)

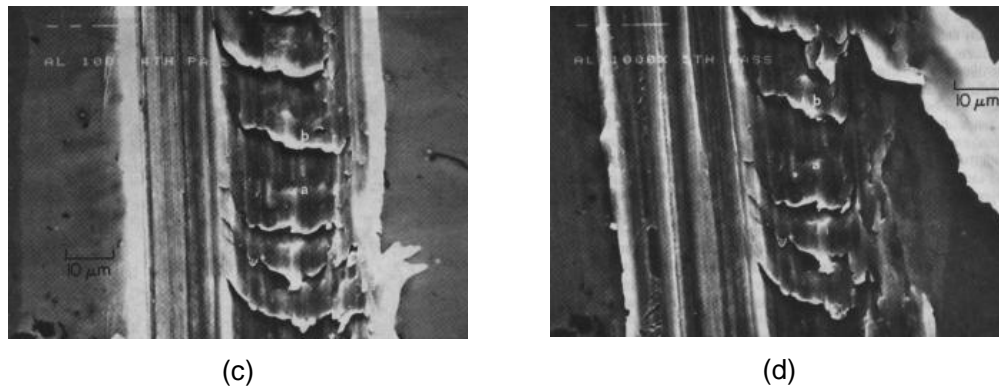


Figura 3.40 - Desgaste de corpo de prova de alumínio na seqüência de passes de deslizamento em ensaio pino sobre disco (a) primeiro passe, (b) segundo passe, (c) terceiro passe e (d) quarto passe. Direção de deslizamento: debaixo para cima (RUFF A. W. *et al*, 1981)

Em um segundo experimento, RUFF *et al* (1981) procuraram observar o efeito do trabalho da deformação plástica dos aços nas suas características de desgaste por deslizamento a seco. Para tanto, foi dada ênfase no estudo das partículas de desgaste de um sistema anel/bloco. Este sistema consiste em um anel de aço 52100 deslizando sobre um bloco. Este bloco é pressionado contra o anel com uma força conhecida. Foram utilizados três tipos de blocos, diferenciados somente pelo material utilizado: aço AISI 1015, aço DP80 (HSLA) e aço AISI O-2 (aço ferramenta). Respectivamente, as microdurezas apuradas foram: 178, 235 e 233kg/mm². As análises do pó de desgaste indicaram a presença de dois tipos distintos de partículas para o sistema utilizando o aço AISI 1015. Em menor quantidade, foram observadas partículas grandes (10 a 40µm) e planas (1µm de espessura) e, em maior quantidade, outras bem menores (0,1 a 1µm) e equiaxiais. As partículas menores usualmente estavam juntas, formando aglomerados próximos das de maior tamanho. A Figura 3.41 nos mostra as partículas encontradas. Para o sistema utilizando o aço DP80, além das partículas mencionadas, foram também encontradas outras de tamanho grande, porém com diferente morfologia (ver Figura 3.42). Nos dois sistemas, as partículas grandes e planas foram associadas a deformações plásticas em escala microscópica, enquanto as menores, foram identificadas como conseqüência do polimento entre as asperezas na região de contato do anel com o bloco. As partículas

maiores, porém com morfologia diferente, foram associadas a pequenas partículas que foram compactadas na zona de contato entre o anel e o bloco. Este fato explicaria a presença de poros nestas partículas.

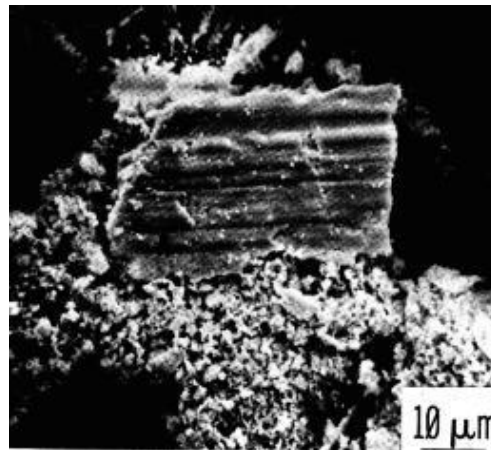


Figura 3.41 - Partículas de desgaste encontradas em testes de desgaste pino sobre disco. Partículas maiores misturadas com menores. (RUFF A. W. *et al*, 1981)

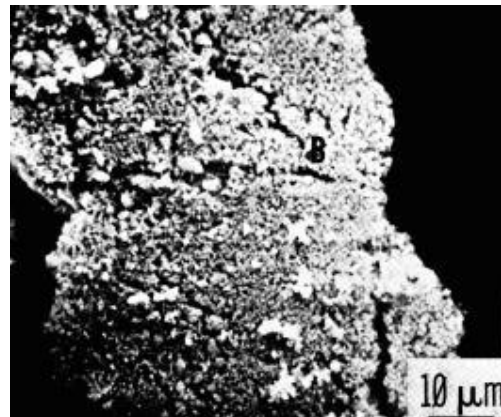


Figura 3.42 - Partículas de desgaste menores compactadas na zona de contato entre esfera e corpo de prova (RUFF A. W *et al*, 1981)

No terceiro experimento de RUFF *et al*, um microscópio eletrônico de transmissão (TEM) foi utilizado para analisar as superfícies e partículas de desgaste de um sistema grafite/cobre, similar a contato de escovas de grafite e barras de cobre de motores elétricos de potência. Para utilizar o TEM para análises de pó de desgaste, cuidados foram tomados como limpeza e escolha de partículas cuja espessura não fosse superior a 300nm. Apesar de algumas limitações em comparação ao uso do microscópio eletrônico de varredura, o TEM apresentou-se como uma boa ferramenta para análise individual de partículas pequenas (1 μ m), onde informações como tamanho, formato e estrutura interna podiam ser estudadas.

Além de caracterizar os mecanismos de desgaste, identificando o modo como os materiais desgastaram ao longo do tempo, quantificar o desgaste também é importante para estabelecer parâmetros de comparação entre sistemas tribológicos. Para tentar quantificar o desgaste, estudos começaram a ser elaborados na década de 30. Tabor foi um dos primeiros autores que descreveu uma teoria aceita mundialmente sobre o assunto (LUDEMA K.C., 1996), mas foi Archard que desenvolveu uma análise teórica simples sobre o tema. Ele postulou, assim como outros autores, que o desgaste por deslizamento se dá através do contato entre as asperezas das duas superfícies em contato. Toda a teoria foi desenvolvida para um único contato, sendo extrapolada depois para toda a superfície. Deste modo, conseguiu-se elaborar uma equação onde quantidades macroscópicas pudessem ser relacionadas. A Equação 3.3, também conhecida como equação de desgaste de Archard, mostra as relações entre a razão de desgaste Q (volume retirado por unidade de distância percorrida) com a carga normal W e a dureza H da superfície mais mole.

$$Q = KW/H \quad \text{(Equação 3.3)}$$

Na equação acima, K é uma constante adimensional sempre menor que 1 chamada de coeficiente de desgaste adimensional. Nele está embutida a probabilidade do contato entre as rugosidades formarem partículas de desgaste. Seu cálculo é particularmente importante para se fazer comparações entre severidade de desgaste para diferentes tipos de sistemas tribológicos. No entanto, o cálculo da dureza superficial (H) não é tão trivial se considerarmos materiais como os elastômeros. Além disto, a dureza pode variar quando analisamos superfícies de materiais com composições e/ou características de resistência mecânica diferentes ao longo de sua

sessão transversal, como os tratados termicamente ou com deposição de filmes de recobrimento. Deste modo, para aplicações práticas de engenharia, o melhor coeficiente para se medir a taxa de desgaste seria o coeficiente dimensional de desgaste, k . Este coeficiente representa o volume de material perdido por unidade de comprimento percorrida por unidade de força (carga normal). Normalmente é expresso em mm^3/mN .

Uma importante observação sobre a Equação 3.3 é que, do ponto de vista fundamental, ela deriva da hipótese de que o volume desgastado por unidade de distância deslizada é dependente somente da carga normal, da dureza e do limite de escoamento do material mais mole. No entanto, além da área representada pela relação de volume por distância percorrida, a relação carga normal (W) sobre a dureza (H) explicita uma área importante dentro do processo de contato: a área de real de contato para deformações totalmente plásticas das rugosidades. Deste modo, o coeficiente K também pode ser interpretado como a relação entre as duas áreas citadas.

As relações entre as quantidades macroscópicas expostas pela Equação 3.3 mostram que, dado um sistema tribológico, o volume perdido por desgaste deve ser proporcional a distância deslizada e a carga normal aplicada (W). Estas relações foram experimentadas na prática através de ensaios específicos (em sua maioria para materiais metálicos) e mostraram-se consistentes com a teoria (HUTCHINGS I., 1992, RABINOWICZ E., 1995). No entanto, a proporcionalidade exata entre a taxa de desgaste e a carga normal foi poucas vezes encontrada. Em muitos sistemas a taxa de desgaste variou diretamente com a carga, mas transições repentinas, caracterizadas por rápidos aumentos ou diminuições da taxa, foram observadas a medida que a carga foi aumentado.

Especificamente para materiais cerâmicos, a Equação de Archard, mostrou-se também aplicável. Todavia, diferenças e particularidades de mecanismos de desgaste merecem ser destacadas. HUTCHINGS I. (1992) descreve que, devido a sua restrita capacidade de deformação plástica a temperaturas ambientes, em comparação com os materiais metálicos, os materiais cerâmicos estão muito mais susceptíveis a fraturas frágeis como resposta a atuação de tensões externas. A deformação plástica, apesar de também ocorrer em materiais cerâmicos, é então bem menos importante no

direcionamento dos mecanismos do que os efeitos e reações triboquímicas, que passam comandar os modos de desgaste. Neste aspecto, a interação com meio ambiente exerce maior influência nas repostas ao desgaste devido às reações químicas possíveis. A umidade, por exemplo, afeta fortemente a taxa de crescimento de trincas no alumínio. Outra importante consideração em relação ao comportamento dos materiais cerâmicos em comparação com os metálicos é a redução da força normal mínima necessária para iniciar um trinca quando aplicada uma força tangencial, como no deslizamento. Sendo assim, durante o deslizamento, os cerâmicos estão bem mais susceptíveis a formação de trincas superficiais do que materiais que tenham tenacidade a fratura menor. Este surgimento de trincas é favorecido por altas pressões de contato e por grandes trações na superfícies (por exemplo, altos coeficientes de atrito). Os regimes brando ou severo de desgaste são regidos por mecanismos que envolvem fratura, efeitos triboquímicos e deformação plástica. O regime brando é caracterizado por baixa taxa de desgaste, um traço de atrito estável, superfícies suaves e partículas finas divididas homoganeamente e quimicamente diferentes dos materiais originais (devido a oxidação). Os mecanismos atuantes normalmente são as reações triboquímicas e o deformações plásticas. No regime severo, em contrapartida, são encontradas superfícies rugosas após o desgaste, altas taxas de desgaste, um traço de atrito flutuante e partículas geralmente angulares e de material similar ao encontrado nos materiais originais. O mecanismo atuante é predominantemente por fratura frágil.

3.4.5 – Ensaio para Medir Desgaste

Ensaio de laboratório são comumente utilizados na tentativa de se obter informações confiáveis e importantes para as aplicações práticas sobre resistência ao desgaste e como controlá-lo e/ou prevê-lo. O desgaste não é propriedade exclusiva do material, mas depende de parâmetros de processo. Diante disto, o teste definitivo da resposta ao desgaste de qualquer material deverá ser feito em campo, na aplicação em serviço.

Os elementos gerais de ensaios de desgaste em laboratório são a simulação, aceleração, preparação do corpo de prova, controle do ensaio, medição do desgaste e relatório. Destes, o mais importante é a simulação, pois ela tenta garantir uma igualdade do comportamento entre o laboratório e a prática. A aceleração torna-se

importante a partir do momento que custos e esforço de testes possam ser reduzidos. A preparação e o controle influenciam diretamente na dispersão dos dados obtidos, indicando o grau de precisão e a reprodutibilidade do ensaio. A medição, no caso do desgaste, depende do tipo e da quantidade de desgaste gerados, além do objetivo do ensaio em si (estudos fundamentais, controle de qualidade, solução de problema, desenvolvimento de produto etc). Parâmetros comuns medidos e associados a desgaste são perda de massa, perda de volume ou deslocamento, medidas geométricas da trilha de desgaste (altura, largura etc), análises químicas de elementos que compõem os materiais antes e após o teste, carga normal, coeficiente de atrito, distância de deslizamento, velocidade de deslizamento, temperatura, umidade e resistência do contato elétrico. Além destes, análises das partículas (quantidade, distribuição, tamanho, formato etc) geradas com o desgaste também são feitas. O relatório deve ser completo, contendo todos os elementos envolvidos e que ajudam a suportar o entendimento dos fenômenos de desgaste. O número de testes de cada ensaio é também importante e é recomendado pelo menos três réplicas de cada teste. A necessidade de mais réplicas depende da dispersão dos dados obtidos.

De um modo geral, os testes de desgaste existentes não representam adequadamente a realidade e o ambiente de interesse de quem os executa. Como resultado, foram desenvolvidos ao longo dos anos testes específicos, aplicáveis em cada indústria e companhia. A ASTM fez uma tentativa de agrupar os testes mais conhecidos e populares em normas, cuja aplicabilidade foram corroboradas por testes realizados em vários laboratórios simultaneamente, com razoável precisão e tendência. BRESSAN J. D. (2007) resume os ensaios de desgaste normatizados pela ASTM na Tabela III.6, mostrada abaixo.

Tabela III.6 –Ensaio de Desgaste Normalizados pela ASTM (BRESSAN J. D., 2007)

ASTM	Material	Aplicações	Equipamentos
B611	Carbeto tungstênio	Abrasão úmida	Plano contra disco rebolo
C131	Agregado mineral	Resistência ao impacto	Moinho de bolas
C418	Concreto	Jateamento	Areia soprada com ar
C448	Cerâmica	Porcelana	Máquina de lapidação NBS
C501	Cerâmica	Azulejo, piso	
C585	Agregado mineral	Resistência a britagem	Moinho de bolas
C704	Cerâmica	Tijolo refratário	Jato erosivo a temperatura ambiente
C779	Concreto	Impacto para deslizamento abrasivo	Vários equipamentos
C808	Carbono - grafite	Selos	
C944	Concreto	Corte rotativo	Pressionar com broca
D658	Revestimento orgânico	Pintura, verniz	
D968	Revestimento orgânico	Pintura, verniz	
D1395	Revestimento orgânico	Revestimento de pisos	Como na D658 e D968
D1630	Borracha	Sola de sapato e saltos	Máquina abrasão com tambor NBS
D2714	Metal, cerâmica e plástico	Desgaste por escorregamento	Anel sobre bloco Máquina Falex
D2981	Lubrificante úmido	Deslizamento oscilante	Anel sobre bloco Máquina Falex
D3181	Têxteis	Roupas	Dado humano subjetivo
D3702	Metais	Materiais autolubrificados	Máquina Falex para arruelas sob pressão
D3884	Têxteis	Resistência a abrasão	
G6	Isoladores	Revestimento em tubulações	Tambor giratório
G32	Metal, cerâmica e plástico	Cavitação	Vibração em banho líquido
G56	Tecido	Cinta, faixa pintada	Tira enrolada em tambor
G65	Metais	Abrasão por areia seca	Fluxo de areia e roda de borracha
G73	Metal, plástico	Erosão líquida	
G75	Metais	Abrasão por partícula em suspensão	Sobrep alternada, abrasivo em suspensão
G76	Metal, cerâmica e plástico	Erosão	Partículas contra plano ou placa
G77	Metal, cerâmica e plástico	Desgaste por escorregamento	Anel sobre bloco Máquina Falex
G81	Metais, compósitos	Desgaste em britador de mandíbulas	Placas de britador angulosas
G83	Metais	Desgaste por deslizamento	Cilindros cruzados
G99	Metais e cerâmicos	Desgaste por deslizamento	Pino sobre disco
G105	Metais	Abrasão para partes em suspensão	Semelhante e G65

3.4.5.1 – Ensaio de Desgaste Pino sobre Disco

O ensaio de desgaste por deslizamento pino sobre disco é um entre vários métodos de medição de desgaste de deslizamento existentes (HUTCHINGS I. ,1992, cita pelo menos oito tipos diferentes de métodos). O ensaio consiste em deslizar, a velocidade constante, um dos materiais com um percurso em forma de círculo com raio fixo sobre o outro material, que permanece fixo. Um dos materiais é chamado de contra corpo e tem o formato de um pino. O outro material é o corpo de prova e normalmente tem um formato circular, com baixa espessura e demais dimensões determinadas pelo tamanho do porta amostra do equipamento, conhecido como tribômetro. A força normal é estática e exercida através de pesos de valor conhecido. O ensaio pode ser feito a seco ou com lubrificante. A aquisição de dados normalmente é feita através de um *software* instalado em um computador acoplado ao tribômetro. Este mesmo *software* controla os parâmetros de teste como rotação e distância percorrida. Os relatórios obtidos são sob a forma de gráficos ou planilhas, que retratam a variação da força e coeficiente de atrito com a distância percorrida, tempo de ensaio ou número de revoluções do corpo de prova. Os dados referentes a força de atrito normalmente são calculados a partir da medição de deslocamento tangencial do braço do suporte do pino, feita via *strain gages* instalados no mesmo. A Figura 3.43 mostra um croqui indicando os principais componentes do ensaio.

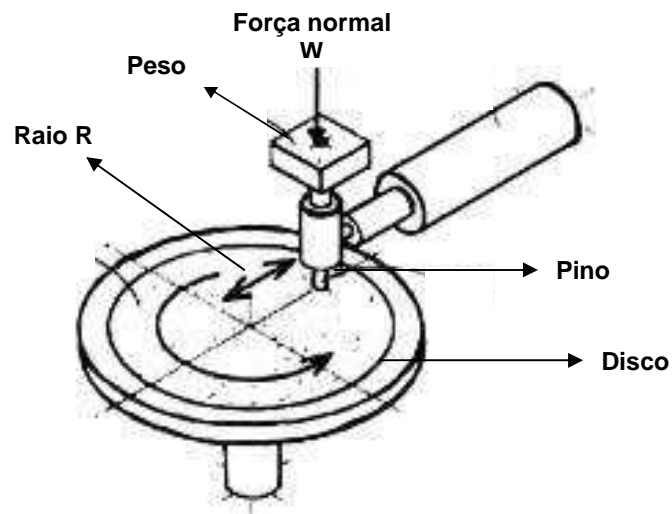


Figura 3.43 - Croqui de ensaio de desgaste por deslizamento tipo pino sobre disco
(adaptação de BRESSAN J. D, 2007)

O ensaio de desgaste pino sobre disco é objeto da norma internacional ASTM.G99. Nela são descritos todos os parâmetros (carregamento, velocidade, distância, temperatura e atmosfera) para se realizar o ensaios, além de indicar como deve ser feito o cálculo do volume desgastado final tanto do corpo de prova quanto do contra corpo. Muitos cuidados devem ser tomados antes e durante a realização dos ensaios. Os resultados são fortemente influenciados por pequenas alterações nas condições ensaiadas (como umidade, temperatura, vibração etc), o que dificulta a repetibilidade e reprodutibilidade dos testes. GUICCIARDI S. *et al* (2002) realizaram testes deslizando pinos de carbeto de tungstênio em discos de nitreto de silício em ensaios de pino sobre disco para observar a dispersão dos resultados de desgaste e atrito ao se variar a velocidade de rotação e a carga normal aplicada. Os resultados mostraram uma faixa de variação de 28 a 47% e 32 a 56% para o disco e pino respectivamente. Os dados mostraram-se menos dispersos (5 a 15%) com a aplicação de carga normal mais alta, independente da velocidade utilizada. No geral, 20% dos dados foram considerados *outliners* nas avaliações estatísticas. O resultado deste trabalho nos mostra que, apesar de normatizado, o ensaio exige atenção na análise dos resultados.

Na tentativa de entender a dispersão dos dados e a sua extensão nos resultados dos testes do ensaio de deslizamento pino sobre disco, alguns autores propuseram alterações em equipamentos, compararam metodologias e sugeriram novas formas de aquisição de dados. YANG L. J. (1999) propôs a utilização de um pino móvel em conjunto com um torno horizontal e comparou os resultados com a utilização do pino fixo. Do mesmo modo, SO H. (1996), fez testes com arranjos de rotação somente do pino e depois somente do disco e encontrou diferença nos resultados. PRIETO I. G. *et al* modificou o teste da ASTM G99 para garantir o desalinhamento máximo previsto na norma de $\pm 1\%$ entre os eixos do pino e do disco e encontrou menor desvio padrão nos dados para o teste modificado. A carga normal aplicada foi variada durante os testes e observou-se, para ambos ensaios, que o desvio padrão aumenta com o aumento da carga. Existem também trabalhos bem sucedidos propondo formulações matemáticas e simulações computacionais como alternativas a utilização de equipamentos e realização de ensaios físicos (HEGADEKATTE V. *et al*, 2006) e outros trabalhos que propõem uma utilização mais abrangente do ensaio, para mensuração de parâmetros que não a taxa de desgaste força de atrito (NAIR, R.P., *et al*, 2009).

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA

Para realizar os estudos da influência da rugosidade superficial do substrato nas propriedades mecânicas de ferramentas de metal duro, foram realizados experimentos com conjugados com três níveis de rugosidades do substrato diferentes: lixado, parcialmente polido e polido. Para cada sistema (substrato mais revestimento), foram preparadas oito réplicas, sendo que no mínimo cinco foram utilizadas em ensaios de desgaste. Os sistemas foram classificados como:

- L1: lixamento com lixa a 220
- L2: lixamento parcial a $9\mu\text{m}$
- F: polido a $0,04\mu\text{m}$

Para cada sistema, cada réplica foi identificada de E1 a E8. Sendo assim, foram preparados 40 corpos de prova ao todo. O formato adotado para os corpos de prova foi o quadrangular, com dimensões de $(20 \times 20 \times 5)\text{mm}$.

O material do substrato utilizado foi metal duro (WC-6%Co), adquirido da empresa Dunamis/SP. O revestido utilizado foi o $(\text{Cr}_{1-x}, \text{Al}_x)\text{N}$, depositado por PAPVD. Para a realização da deposição do revestimento, foi utilizado o laboratório TECVAC, na Inglaterra. A espessura de camada depositada foi fixa, variando de 2,5 a $3\mu\text{m}$. A qualidade da deposição foi verificada através de ensaio de adesão Rockwell C.

A escolha do substrato/revestimento se deve ao fato de sua indicação para utilização na indústria em aplicações como ferramentas para usinagem de alta velocidade e matrizes de forjamento a quente. O bom desempenho observado destes conjugados motiva estudos para otimizar, através do entendimento de seus mecanismos de falha, a fabricação e utilização dos mesmos.

Foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento esfera contra disco para observar a resposta dos sistemas recobertos quanto ao desgaste. Ensaios complementares de desgaste por microabrasão foram feitos para comparar os resultados. Além de poder observar a resposta ao desgaste, através do ensaio de microabrasão foi possível verificar a espessura da camada de revestimento depositada.

Para caracterização dos sistemas antes da realização dos ensaios de desgaste e após (trilhas de desgaste, contra corpo, partículas etc) foram utilizadas as técnicas de perfilometria tridimensional (medição de perfil e taxa de desgaste), microscopia eletrônica de varredura (MEV), além de microdureza Vickers.

4.1 – Equipamentos e Parâmetros

4.1.1 – Rugosidade Superficial

Antes da deposição por PAPVD, os substratos foram lixados e polidos de maneira a controlar a rugosidade superficial final. O equipamento utilizado foi a politriz LaboPol, fabricada pela Struers. A seqüência de lixamento/polimento utilizada pode ser observada na Tabela IV.7. Todas as amostras foram primeiro submetidas ao mesmo lixamento (lixamento PG). A partir desta mesma base, foram sendo feitos polimentos progressivos até se chegar ao polimento de último nível (polimento OP). Tanto o lixamento quanto o polimento foram feitos de modo a deixar as marcas de rugosidade aleatórias, sem direcionamento específico.

Tabela IV.7 – (a) Parâmetros utilizados para o controle da rugosidade superficial do substrato. (b) Seqüência utilizada para cada sistema

PARÂMETROS	PASSOS			
	Lixamento		Polimento	
	PG	FG 1	P1	OP
Disco politriz	MD-Piano 220	MD Allegro	MD Dac	OP Chem
Tipo de abrasivo	-	DiaPro Allegro/Largo	DP Paste M (3 μ m)	OP AA
Tipo de lubrificante	Água	-	DP Blue	-
Velocidade [rpm]	300	150	150	150
Tempo [min]	1	4	4	1

(a)

SISTEMA	PASSOS			
	Lixamento		Polimento	
	PG	FG 1	P1	OP
Lixada (L1)	X			
Polimento Parcial (L2)	X	X		
Polimento (F)	X	X	X	X

(b)

A seqüência de polimento indicado na Tabela IV.7 corresponde ao método de número 2020 sugerido pelo próprio fabricante da politriz. Todos os insumos utilizados são de fornecimento da própria Struers. Para realização dos ensaios, todas as amostras foram identificadas e embutidas em resina poliéster, com tempo de cura mínimo de 2 horas. Após cada preparação, as amostras foram protegidas com algodão e embaladas para envio para adição do recobrimento. Na Figura 4.44 é possível observar uma foto do equipamento utilizado.



Figura 4.44 – Fotografia da politriz LaboPol, fabricada pela Struers.

As imagens topográficas tridimensionais das rugosidades superficiais antes do recobrimento, após o mesmo e das trilhas de desgaste foram feitas utilizando a o perfilômetro T4000 da Hommelwerke (Figura 4.45).



Figura 4.45 - Perfilômetro T4000 da Hommelwerke

Com o apalpador TKL 100/17 (ponta de 90° de inclinação e $5\mu\text{m}$ de raio), utilizando o suporte fixo modelo FHZ, foram feitas, para cada corpo de prova, 221 medições com passo de $50\mu\text{m}$ em uma área varrida de $11 \times 11\text{mm}$. A velocidade de medição utilizada foi de $0,3\text{mm/s}$. Os filtros de *cut-off* utilizados foram compatíveis com o comprimento transversal mínimo (L_t), seis vezes maior do que o comprimento de *cut-off*.

A obtenção de imagens topográficas e a obtenção de parâmetros estatísticos de rugosidade superficial (rugosidade e ondulação) foram realizadas respectivamente através do uso do software *Turbo Roughness* e do software *Hommelmap Expert 3.0 (Mountains)*.

4.1.2 – Deposição por PAPVD

O processo de deposição do filme fino utilizado foi a evaporação por feixe de elétrons assistido a plasma (*coatings were deposited by electron beam plasma-assisted physical vapour deposition - EBPAPVD*). A temperatura de deposição, para o recobrimento de CrAIN foi de 400-450°C.

4.1.3 - Microdureza Vickers

A dureza superficial de cada sistema foi medida utilizando-se o equipamento Microhardness Tester FM, da Future Tech Corp. Foi aplicada carga de 1kgf por tempo padrão de dez segundos. Foram realizadas dez medidas para cada amostra recoberta. Os resultados foram comparados com a dureza da amostra sem recobrimento. A dureza da esfera também foi medida utilizando a mesma metodologia.

4.1.4 – Caracterização Estrutural por Difração de Raios X

Foram realizados testes de difração de raios X para a caracterização dos sistemas estudados em relação as fases cristalinas presentes no substrato e no conjugado. Foi utilizado o difratômetro PHILIPS, modelo PW 1710, a partir da radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056\text{\AA}$, voltagem do tubo = 40kV, corrente = 20mA) e cristal monocromador de grafita. O parâmetro de rede das fases cristalinas cúbicas foram calculados utilizando-se a Lei de Bragg.

4.1.5 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O Microscópio Eletrônico de Varredura da JEOL JSM 6360LV, e o Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS – *Energy Dispersive Spectrometer*) *Thermo Noram – Quest*, foram utilizados para obter imagens do pó de desgaste e das superfícies antes e após os ensaios de desgaste por deslizamento esfera sobre disco, assim como identificar e estimar a quantidade em peso de cada elemento químico presente na superfície dos corpos de prova e no pó de desgaste.

O MEV também foi utilizado para verificação da espessura da camada de recobrimento depositada. Para a obtenção das imagens transversais, as amostras foram inicialmente cortadas em um equipamento de corte de precisão (ISOMET 1000) e posteriormente imersas em nitrogênio líquido e golpeadas para indução de fratura do tipo frágil e separação das partes.

4.1.6 - Ensaio de Adesão Rockwell C

A adesão do recobrimento ao substrato foi medida qualitativamente a partir da impressão do teste de dureza tipo Rockwell C. Para tanto, foi utilizado o Durômetro Zwick δ Co. KG- Einsinger bei ULM (modelo Z302), com penetrador cônico padrão Rockwell C. Foram realizadas mínimo de três medidas em cada amostra de cada sistema. A carga adotada para os testes foi de 150kgf. O registro posterior das imagens das impressões das cargas aplicadas foi feito por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As imagens geradas foram comparadas com o padrão de morfologia de falhas indicado por HEINKE *et al.* (1995), já descrito na revisão bibliográfica deste trabalho (capítulo 3, item 3.2.1.2).

4.1.7 - Ensaio de Desgaste por Microabrasão

Os ensaios de microabrasão foram realizados para complementar os resultados dos ensaios de desgaste por deslizamento esfera sobre disco. Foi utilizado um equipamento fabricado pela empresa Phoenix Tribology Ltda, modelo TE66 Micro-Scale Abrasion Tester, controlado via sistema SLIM 2000. Os ensaios foram realizados no laboratório de Tribologia e Corrosão de Materiais da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), o qual o equipamento pertence (Figura 4.46). Os parâmetros utilizados em cada ensaio encontram-se listados abaixo.

- material esfera: aço AISI 52100
- diâmetro esfera: 25 mm ($r = 12.5\text{mm}$)
- velocidade de rotação da esfera: 75rpm
- carga normal (N) = 0,25N

- tempo total de cada ensaio: aproximadamente 14min (1050 rotações)
- distância total deslizada (S): 82,47m
- velocidade de deslizamento (v): 0,0982m/s
- abrasivo: SiC
- concentração do abrasivo: 35g/100ml de água destilada
- granulometria do abrasivo: 2 a 10 μ m
- frequência de gotejamento: 1 gota/s



Figura 4.46 – Fotografia do equipamento de desgaste por microabrasão. Fabricação: Phoenix Tribology Ltda, modelo TE66 Micro-Scale Abrasion Tester.

Além de todos os sistemas (L1, L2 e F), foram também testados sistemas sem recobrimento.

4.1.8 - Ensaio de Desgaste por Deslizamento

Foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento para todos os sistemas descritos. O equipamento utilizado foi o tribômetro esfera sobre disco fabricado pela Micro Photonics Inc, modelo MT60 (Figura 4.47). O software Nanovea Tribometer V1.5 foi utilizado para controlar, monitorar e apurar resultados de coeficiente de atrito e força de atrito em tempo real. Filtros padrão do software foram usados para elaboração das curvas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tribologia da

Universidade Federal de Minas Gerais, com umidade e temperatura monitorados. Ao início de cada ensaio procurou-se manter a sala de teste climatizada, buscando uma variação mínima das condições ambientais externas. Todos os testes foram feitos com umidade variando entre 45 e 50% e temperatura variando entre 19 e 22°C.



Figura 4.47 - Tribômetro esfera sobre disco fabricado pela Micro Photonics Inc.

Antes de se iniciar os ensaios, a célula de carga do equipamento foi calibrada segundo procedimento padrão do fabricante (ver Figura 4.48, item a). A cada teste, o nivelamento do suporte do corpo de prova, assim como do braço sustentação da carga foi verificado (ver Figura 4.48, item b).

A planicidade das amostras foi verificada utilizando o equipamento Tesa Micro-Hite, modelo MH-3D, fabricado pela Tesa Technology, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Foram medidos cinco pontos de cada amostra para se calcular o possível desvio existente.



(a)



(b)

Figura 4.48 - (a) Calibração da célula de carga do tribômetro. Procedimento executado antes dos ensaios. (b) Verificação do nivelamento. Procedimento executado a cada teste.

A esfera utilizada foi de nitreto de silício (Si_3N_4), com raio de 6mm. Sua dureza foi verificada, assim como a sua composição química. Foi utilizada uma esfera para cada teste e, antes de cada ensaio, cada esfera foi limpa utilizando um aparelho de ultrassom. Foi utilizada água destilada e o tempo de permanência do aparelho foi de quinze minutos. O tempo de degaseificação da água foi de cinco minutos antes de se colocar a esfera.

Foi aplicada carga normal de 40N, rotação de 500rpm e tempo de ensaio de quatro horas, o que equivale a uma distância de deslizamento de aproximadamente 3.000m e a 120.000 revoluções.

Para medida do volume desgastado, novamente foi utilizado o perfilômetro T4000 da Hommelwerke. Foram adotados exatamente os mesmos parâmetros utilizados para medir a rugosidade inicial (velocidade, filtros, ponta, apalpador etc). Os volumes das trilhas foram calculados utilizando recursos dos próprios softwares de análise: *Turbo Roughness* e *Hommelmap Expert 3.0 (Mountains)*. No entanto, a metodologia de cálculo foi desenvolvida especificamente para cálculo do volume da trilha de desgaste. A seguir, é mostrada a seqüência de todas as etapas utilizadas para o cálculo do volume a partir da geração da imagem por perfilometria.

a) Reamostragem (*resampling*)

O espaçamento em Z adotado foi de 0,0001nm para todos os casos. A Figura 4.49 mostra imagem após a reamostragem

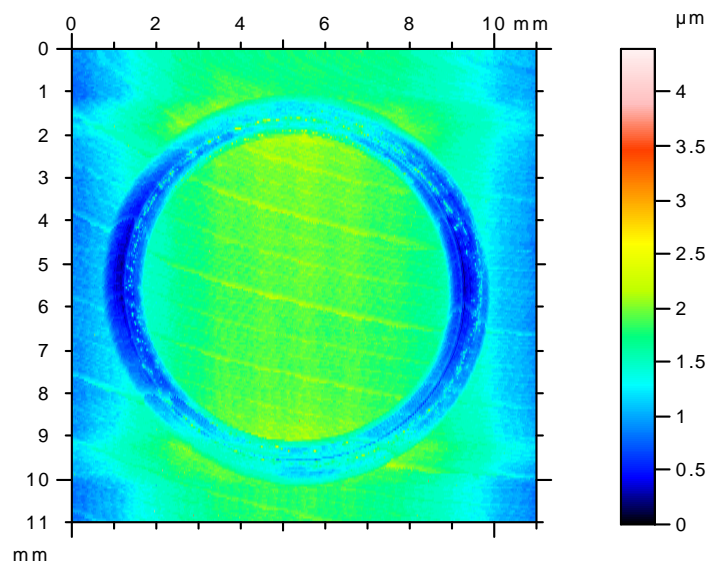


Figura 4.49 - Imagem da amostra após a reamostragem com espaçamento em Z redefinido.

b) Geração de imagem tridimensional – malha em perspectiva axonométrica (*Meshed Axonometric*)

A Figura 4.50 mostra a imagem da amostra já com a malha de cálculo da rugosidade em perspectiva axonométrica.

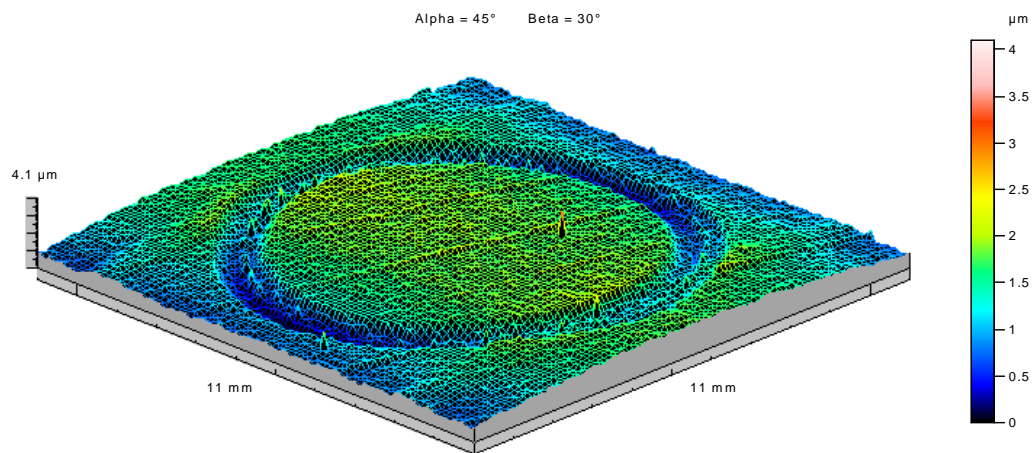


Figura 4.50 – Imagem da amostra em perspectiva axonométrica.

c) Remoção de forma (*Form Removal*)

Para remoção de forma foi utilizado um polinômio de grau 2 em todos os casos. A Figura 4.51 mostra a amostra após realizada a remoção de forma pelo programa.

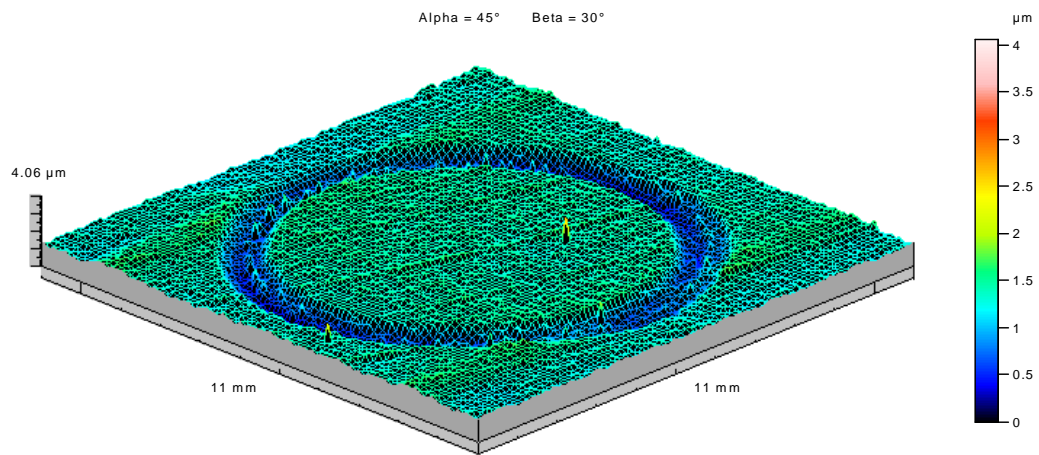


Figura 4.51 - Imagem da amostra após realizada a remoção do efeito de forma

d) Nivelamento (*Levelling*)

O nivelamento de forma foi executado em toda a extensão da área varrida, de 11 x 11mm. A Figura 4.52 mostra a imagem da amostra após o nivelamento.

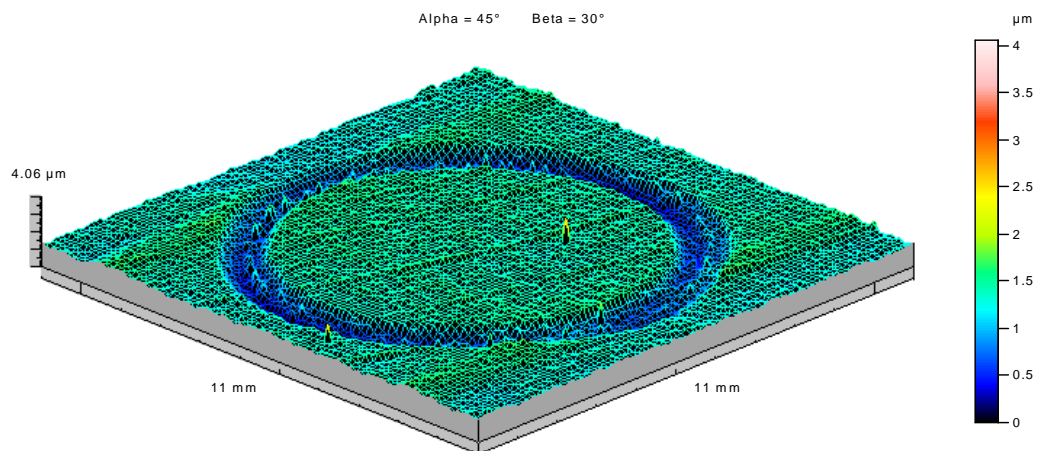


Figura 4.52 - Imagem da amostra após o nivelamento.

e) Remoção de defeitos (*Erase Defects*)

Os defeitos (picos e vales atípicos) foram removidos manualmente. Os pontos da malha foram substituídos por pontos mais suaves (menos agudos). A Figura 4.53 mostra uma imagem com os defeitos já removidos. É possível perceber que alguns picos atípicos já não existem.

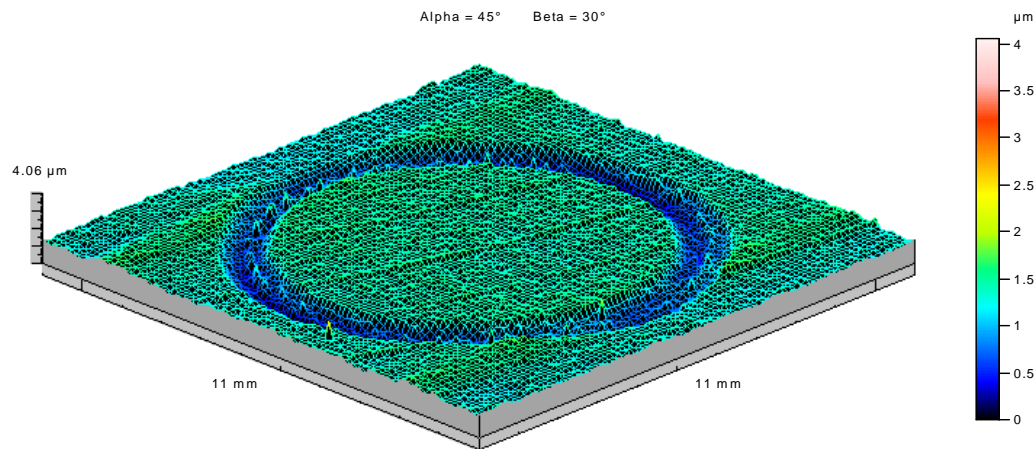


Figura 4.53 – Imagem da amostra com o resultado da remoção manual dos defeitos.

f) Cálculo do volume de um buraco/pico (*Volume of a Hole/Peak*)

Para o cálculo do volume de um buraco, o programa disponibiliza quatro metodologias, todas baseadas em cálculo de volumes de colunas retangulares com espessura infinitesimal. A base superior do retângulo é definida a partir de uma referência, definida de acordo com a metodologia de cálculo adotada. A base inferior é traçada a partir do ponto mais distante do segmento superior (maior altura). O volume total é dado pelo somatório do volume de cada coluna.

A seguir são definidas as principais diferenças entre as metodologias de cálculo disponíveis. A Figura 4.54 ilustra as diferenças entre três dos métodos.

- Método 1:

a base superior do retângulo é definida por um segmento traçado a partir de dois pontos identificados na borda da cavidade. É recomendada para ser utilizada em cálculos onde o contorno da borda da cavidade não é um plano chato. Este método é sensível à rugosidade existente nas bordas da cavidade.

- Método 2:

utiliza o mesmo princípio do Método 1, porém os segmentos para definição da base superior do retângulo são traçados no sentido perpendicular ao sentido utilizado no método anterior. A escolha entre os Métodos 1 e 2 é feita de acordo com a orientação e formato do volume que se pretende medir.

- Método 3:

a referência para cálculo do volume do retângulo não é mais um segmento, mas sim um plano. Esta referência é plano dos mínimos quadrados calculado utilizando-se todos os planos que estão fora do contorno da cavidade. Este método só é aplicável quando o plano fora da cavidade pode ser considerado achatado o suficiente para ser considerado, por extrapolação, a face superior da cavidade (base superior de todos os retângulos).

- Método 4:

é equivalente ao Método 3, exceto pelo fato de que o plano de referência não é um plano dos mínimos quadrados, mas sim uma superfície polinomial. É recomendado para ser usado quando a superfície ao redor da cavidade não é um plano chato, mas sim uma superfície curva, porém ainda simples, como uma esfera, por exemplo. Utilizando o Método 3, esta superfície deveria ser aproximada de um plano chato para então ser utilizado. O Método 4 já faz esta consideração em seus cálculos.

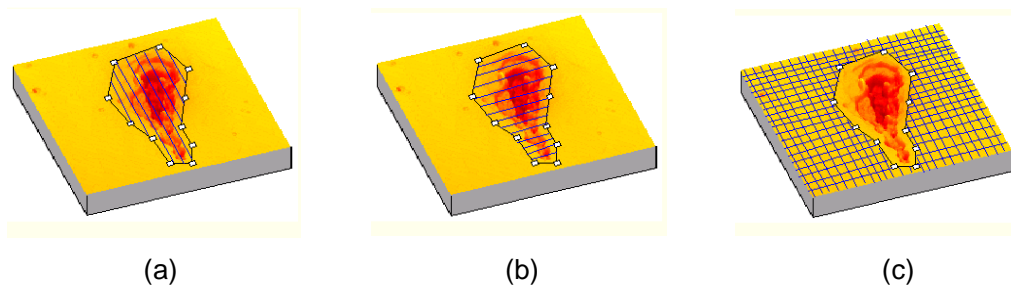


Figura 4.54 - Comparação entre os métodos de cálculo do volume de uma cavidade utilizando o resultado de uma medição por perfilometria. (a) Método 1 (b) Método 2 e (c) Método 3

O método adotado neste trabalho foi uma combinação dos Métodos 1 e 2, pois a trilha de desgaste é circular, apresentando oportunidade de cálculo nos dois sentidos de construção dos segmentos. Somente a trilha foi delineada como superfície a ser calculada. Deste modo, ao se indicar os pontos os mais próximos possíveis do contorno da trilha, eliminou-se o efeito da superfície presente no centro da mesma (ver Figura 4.55). O volume total foi calculado como sendo uma média entre os volumes calculados pelos Métodos 1 e 2.

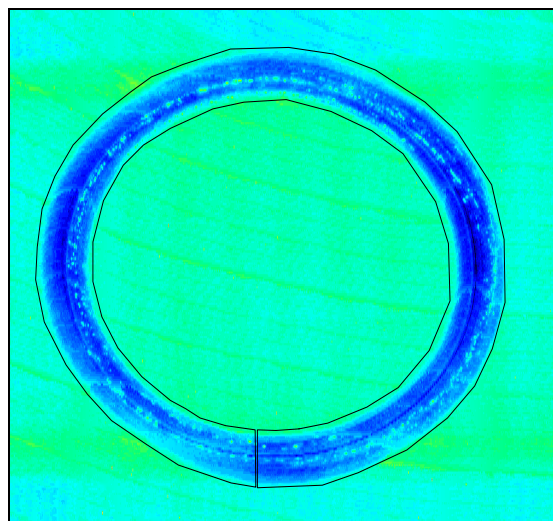


Figura 4.55 - Método de cálculo de volume adotado para quantificar o desgaste ocorrido durante ensaio de desgaste por deslizamento pino sobre disco. Trilha de desgaste definida como entidade única para o cálculo do volume.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes de se iniciar os testes de desgaste por deslizamento esfera sobre disco e analisar os resultados obtidos, todo o material foi caracterizado quanto a suas propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas.

5.1 – Caracterização

5.1.1 – Análises Química e Microestrutura

As pastilhas de metal duro foram submetidas a ensaios de análise química e difratometria para verificação de suas propriedades tanto antes quanto depois de serem recobertas. Abaixo, a Tabela V.8 mostra as percentagens em peso dos elementos encontrados. Para cada tabela, foram realizadas pelo menos três medidas diferentes. Percebe-se que após a deposição de filme de CrAlN houve uma diminuição da presença de tungstênio e cobalto e um aumento de cromo e alumínio na superfície do metal duro. Antes do recobrimento, existiam apenas traços dos dois últimos elementos.

Tabela V.8 - Composição química das pastilhas de metal duro. (a) antes do recobrimento e (b) depois do recobrimento.

Elemento	K-Razão	ZAF	% Atom	% Peso	Erro % Peso (1 Sigma)
Co-K	0,0618	0,859	14,55	5,31	+/- 0,56
W-K	0,9220	1,022	82,76	94,21	+/- 2,95
Al-K	0,0024	1,685	2,46	0,41	+/- 0,11
Cr-K	0,0007	1,055	0,23	0,07	+/- 0,16
N-K	0,0000	4,590	0,01	0,00	0
Total			100	100	

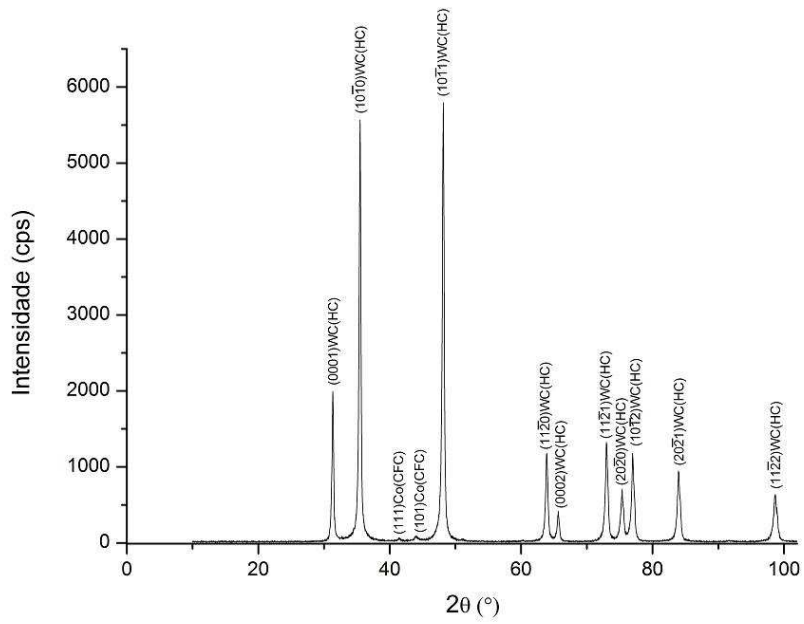
(a) antes do recobrimento

Elemento	K-Razão	ZAF	% Atom	% Peso	Erro % Peso (1 Sigma)
Co-K	0,0170	1,262	0,14	0,21	+/- 0,23
W-K	0,0226	1,370	0,66	3,10	+/- 0,92
Al-K	0,0863	2,774	34,77	23,94	+/- 0,42
Cr-K	0,6420	1,060	51,29	68,05	+/- 0,85
N-K	0,0129	3,638	13,13	4,69	+/- 0,59
Total			100	100	

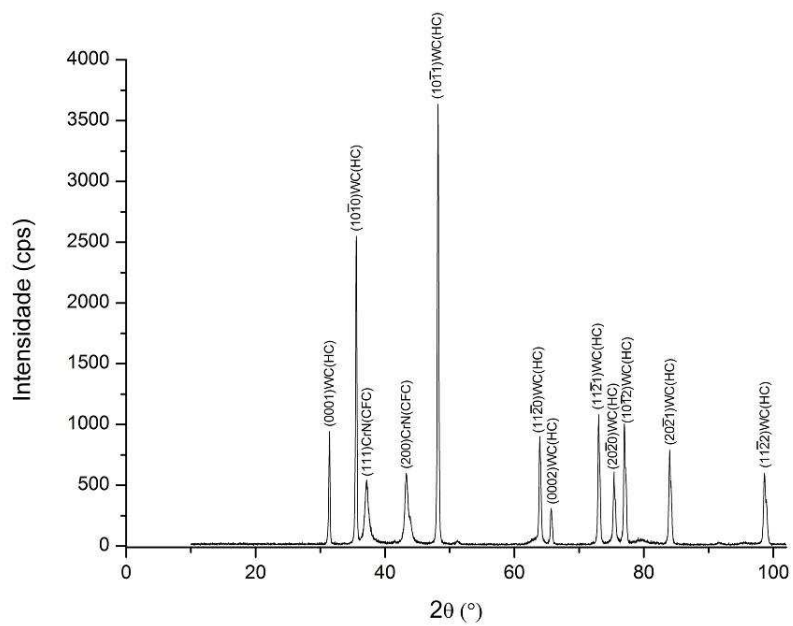
(b) depois do recobrimento

A Figura 5.56 mostra o difratograma de raios X do metal duro a ser recoberto e do mesmo com recobrimento, separado por sistemas (mais lixado – L1, lixado médio – L2 e mais polido - F). É possível perceber que houve uma alteração na estrutura cristalina antes a após o recobrimento: presença de picos de CrN a 37 e 43 graus nos difratogramas após o recobrimento. É também possível notar que a estrutura mostrasse a mesma após o recobrimento para os três sistemas estudados.

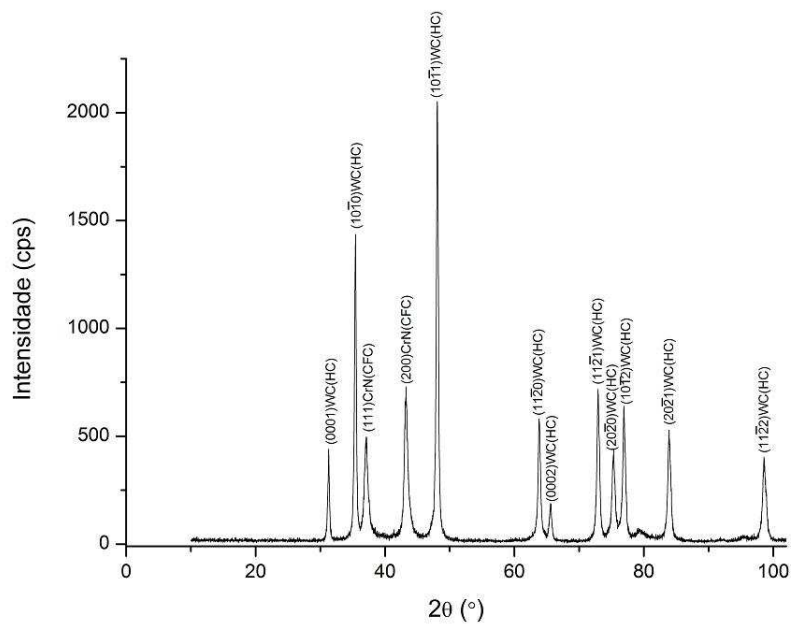
PARK W. *et al* (2006) estudou a microestrutura de substratos de metal duro recobertos com filmes de CrN, CrAlN e CrAlSiN e encontrou resultados que mostravam cristais de CrN do tipo B1 NaCl com múltiplas orientações de (111), (200), (220) e (311). Foi observado que a presença do alumínio e/ou outros elementos como o silício, alteram ligeiramente a posição dos picos de difração do CrN puro para a direita, no sentido de um ângulo de difração maior. Os resultados dos difratogramas para os sistemas recobertos coincidem com os encontrados por PARK W. *et al* (2006) para o recobrimento CrAlN em seus trabalhos.



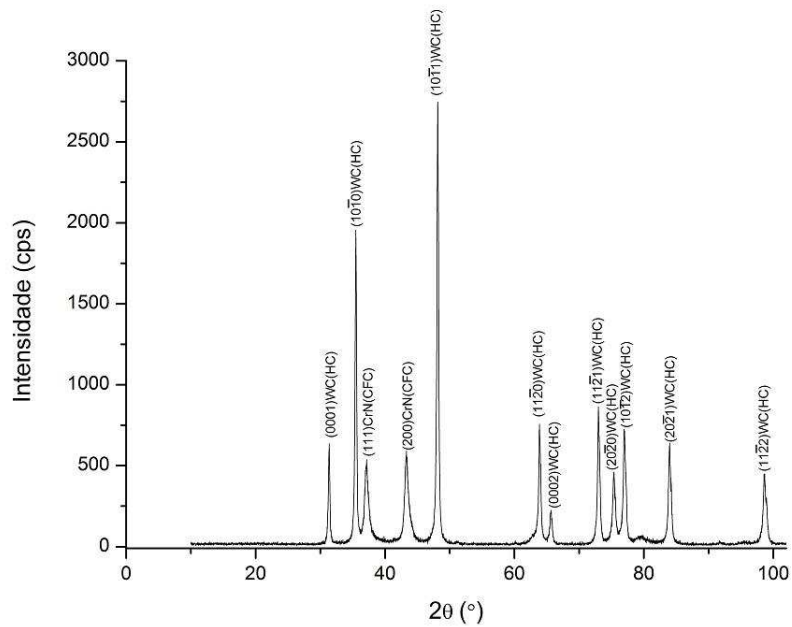
(a) antes do recobrimento



(b) depois do recobrimento – sistema F



(c) depois do recobrimento – sistema L1



(d) depois do recobrimento – sistema L2

Figura 5.56 - Resultados de análise de estrutura cristalina (a) antes de recobrir e (b), (c) e (d) depois de recoberto – sistemas L1, L2 e F.

Os resultados tanto da análise química quanto da difratometria mostram-se compatíveis com o esperado para as amostras utilizadas neste estudo.

5.1.2 – Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade tridimensional antes e após o recobrimento foram verificados. Os resultados por sistema estudado encontram-se na Tabela V.9.

Tabela V.9 - Resultados das medidas de rugosidade tridimensional para os sistemas estudados antes e depois de recobrir.

PARÂMETROS	ANTES DO RECOBRIMENTO			APÓS RECOBRIMENTO		
	COARSE (L1)	MEDIUM (L2)	FINE (F)	COARSE (L1)	MEDIUM (L2)	FINE (F)
<i>Parâmetros de Amplitude</i>						
Sa [μm]	0,0502	0,0536	0,0385	0,0525	0,036	0,0321
Sq [μm]	0,0672	0,07	0,0624	0,0671	0,0554	0,053
Sp [μm]	1,12	1,5	2,53	0,971	2,21	2,37
Sv [μm]	2,16	2,3	2,05	0,381	1,64	1,66
St [μm]	3,28	3,81	4,58	1,35	3,85	4,03
Ssk	-0,574	-0,673	-0,976	0,233	2,59	3,5
Sku	17,8	13,8	77,9	4,68	64,2	105
Sz [μm]	2,48	2,39	3,67	1,19	2,67	2,85
<i>Parâmetros de Área e Volume</i>						
STp [%]; 1 μm abaixo do pico mais alto	3,54	0,00	0,00	67,10	0,00	0,00
SHTp [μm]; 2.5% - 97.5%	0,257	0,272	0,209	0,264	0,205	0,203
Smmr [mm^3/mm^2]	0,00216	0,0023	0,00205	0,000381	0,00164	0,00166
Smvr [mm^3/mm^2]	0,00112	0,0015	0,00253	0,000971	0,00221	0,00237
<i>Parâmetros de Espaço</i>						
SPc [pks/ mm^2]; C1 = 0 μm e C2 = 0 μm	32,2	23,6	39,2	23,2	29,6	36,9
Sds [pks/ mm^2]	326	269	202	334	316	322
Str	0,25	0,395	0,53	0,182	0,0909	0,182
Sai [mm]	0,0219	0,0346	0,0465	0,0219	0,011	0,0219
Std [°]	1	0,5	1	1	0,5	0,5
Sfd	2,52	2,42	2,23	2,53	2,3	2,26
<i>Parâmetros Híbridos</i>						
Sdq [$\mu\text{m}/\mu\text{m}$]	0,00736	0,00755	0,00648	0,00743	0,00652	0,00608
Ssc [1/ μm]	0,000667	0,00086	0,000557	0,000704	0,000468	0,000396
Sdr [%]	0,00271	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Parâmetros Funcionais (filtro Gaussiano de 0,8 mm)</i>						
Sk [μm]	0,139	0,156	0,0677	0,161	0,0769	0,0481
Spk [μm]	0,0724	0,0694	0,0863	0,071	0,0812	0,103
Svk [μm]	0,0685	0,0766	0,0768	0,065	0,0751	0,0698
Sr1 [%]	13,80	10,20	21,10	10,50	17,40	17,00
Sr2 [%]	88,20	88,20	83,30	89,80	83,40	81,30
<i>Parâmetros Funcionais</i>						
Sbi	0,0663	0,0503	0,0257	0,078	0,0262	0,0233
Sci	1,51	1,49	1,36	1,57	1,5	1,61
Svi	0,122	0,128	0,141	0,113	0,154	0,145

As respostas obtidas para os sistemas Polido (F) e Lixado (L1 e L2) indicam características superficiais que os distinguem entre si tanto antes como depois de recobrir. Percebe-se também que ocorreram alterações de resultado das amostras

quando se compara individualmente cada sistema antes e depois de recobrir. Este resultado é mencionado na literatura para recobrimentos com espessura de camada abaixo de $5\mu\text{m}$ (HARLIN P. *et al*, 2006).

Os parâmetros de amplitude sugerem superfícies semelhantes entre si, distinguindo-se basicamente pelos valores de rugosidade média (S_a), que encontra-se mais baixo para o sistema Polido (F). Para os demais parâmetros, há alguma diferença em alturas máxima de pico e vale, que podem ser atribuídas a presença de picos/vales isolados. Porém, os resultados dos parâmetros de profundidade de rugosidade do núcleo (S_k), altura reduzida de pico (S_{pk}) e altura reduzida de vale (S_{vk}), associados a parâmetros funcionais, mostram que o perfil da superfície do sistema Polido (F) é característico do tipo platô se comparado ao perfil com presença de picos nas superfícies dos sistemas Lixado (S_k é no mínimo o dobro para os sistemas Lixado). Os vales, no entanto, têm um perfil similar, pois os valores atribuídos ao S_{vk} são equivalentes para os sistemas. Uma confirmação desta característica pode ser observada através dos índices de suporte de carga (S_{bi}), índice de retenção do fluido no núcleo (S_{ci}) e índice de retenção do fluido no vale (S_{vi}). Para o sistema Polido (F), o S_{bi} apresenta-se cerca de três (antes de recobrir) e quatro (depois de recobrir) vezes menor em relação ao sistemas L1. Neste caso, quanto menor o índice, maior a capacidade de suportar carga. Já os índices S_{ci} e S_{vi} não apresentam variação expressiva entre sistemas.

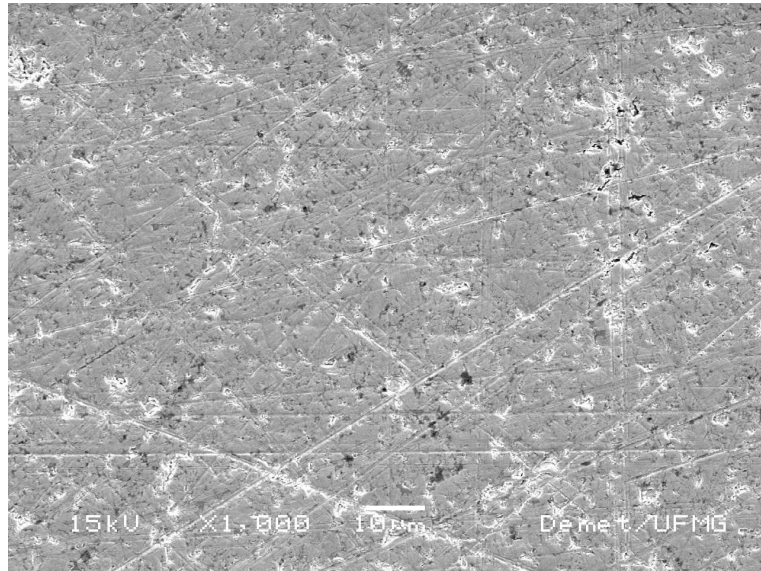
Em termos de parâmetros espaciais e híbridos (espaciais associados a parâmetros de volume), nota-se que para o sistema Polido (F) há uma quantidade de picos maior, tanto antes quanto depois de recobrir, em relação aos demais sistemas (parâmetro S_{Pc}). Isto significa que, apesar de possuir um perfil do tipo platô, com picos com menor altura, o sistema Polido (F) apresenta quantidade de picos por unidade de área maior que os demais sistemas. Para o cálculo da contagem de picos, as profundidades de corte utilizadas (C1 e C2) foram igualadas a linha média do perfil.

Os parâmetros de amplitude *skewness* (S_{sk}) e *kurtosis* (S_{ku}), utilizados para análises estatísticas das rugosidades tridimensionais, mostram expressiva diferença de resultado entre os sistemas e entre as superfícies, antes e após o recobrimento. Este fato é explicado pela alta sensibilidade dos dois parâmetros a presença de picos e vales isolados (atípicos), mais altos que a média existente na superfície. No entanto,

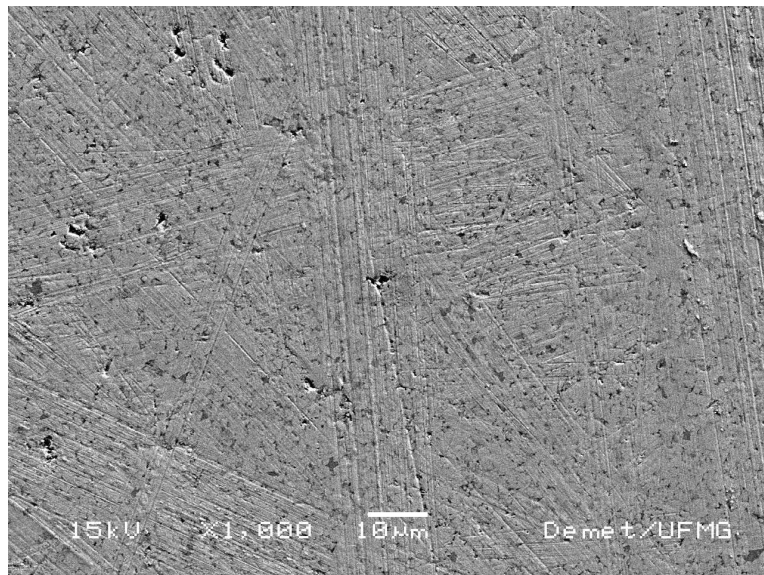
pode-se concluir que, como a *kurtosis* está acima de três para todos os casos, que o perfil de todas as superfícies apresenta picos e vales grandes e agudos. Do mesmo modo, pode-se concluir também que, apesar do *skewness* não ser o parâmetro mais indicado para análise de superfícies com concentração de material perto do topo, os perfis de todos os sistemas se aproximam do tipo platô, pois o S_{sk} é sempre negativo antes do recobrimento, tornando-se positivo somente após o mesmo. Este fato reforça e evidencia o que foi observado nos resultados dos parâmetros de amplitude e funcionais (S_{bi} , S_{ci} e S_{vi}). Os parâmetros de área e de volume também reforçam esta hipótese, uma vez que o valor do parâmetro de razão de material (S_{Tp}) é zero para quase todos os sistemas, indicando uma transição rápida de região sem material (ar) para região com material.

Outra importante observação acerca da Tabela V.11 é que, entre os sistemas Lixado (L1 e L2), o sistema Lixado intermediário (L2) apresenta características de perfil que se aproximam tanto do sistema Polido (F) quanto do sistema Lixado (L1). O sistema Lixado L2 apresenta alturas de pico e rugosidade média de um perfil lixado, porém, com densidade de picos e área de suporte de carga que se aproximam do perfil do sistema Polido (F).

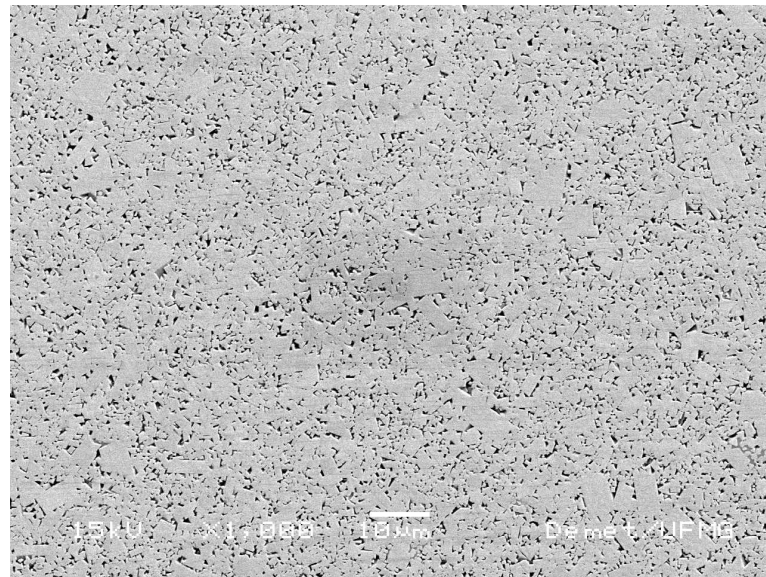
As Figura 5.57 e 5.58 mostram imagens obtidas por MEV das superfícies antes e depois do recobrimento. É possível perceber a diferença entre as rugosidades superficiais nos sistemas. A Figura 5.59 ilustra com imagens do perfilômetro as superfícies utilizadas para os cálculos dos parâmetros de rugosidade.



(a) lixada intermediário (sistema L2)

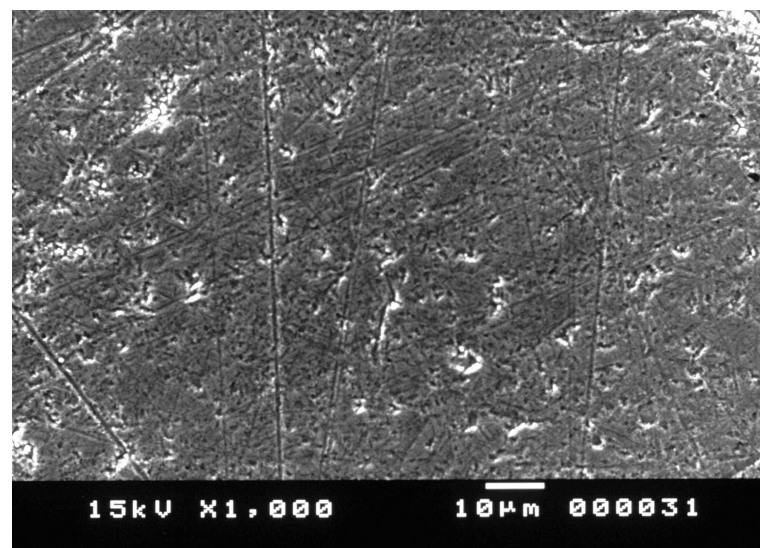


(b) mais lixada (sistema L1)

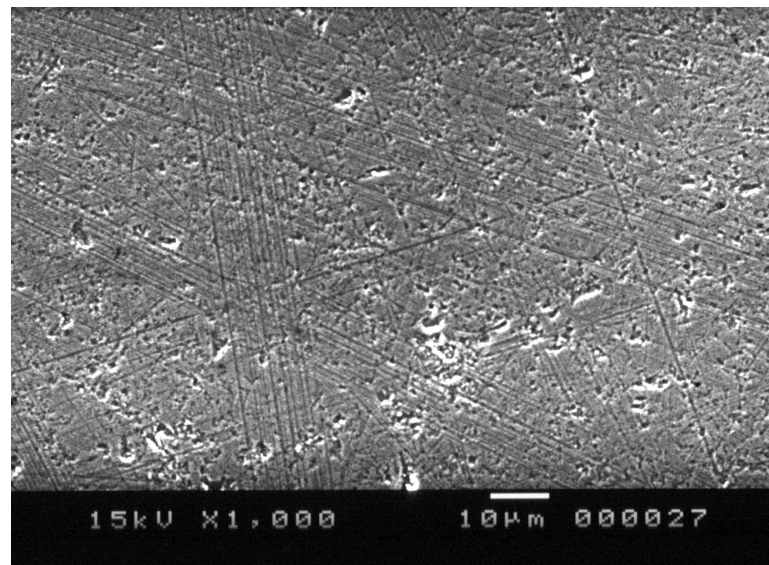


(c) polida (sistema F)

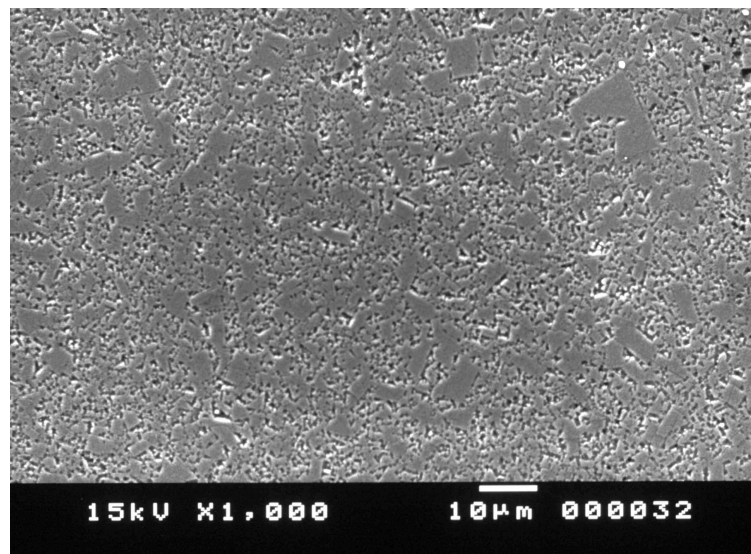
Figura 5.57 – Imagens obtidas por MEV (elétrons retroespalhados) das superfícies das amostras antes do recobrimento. Ampliação de 1.000x (a) sistema lixado intermediário (b) sistema mais lixado e (c) sistema polido.



(a) lixada intermediário (sistema L2)

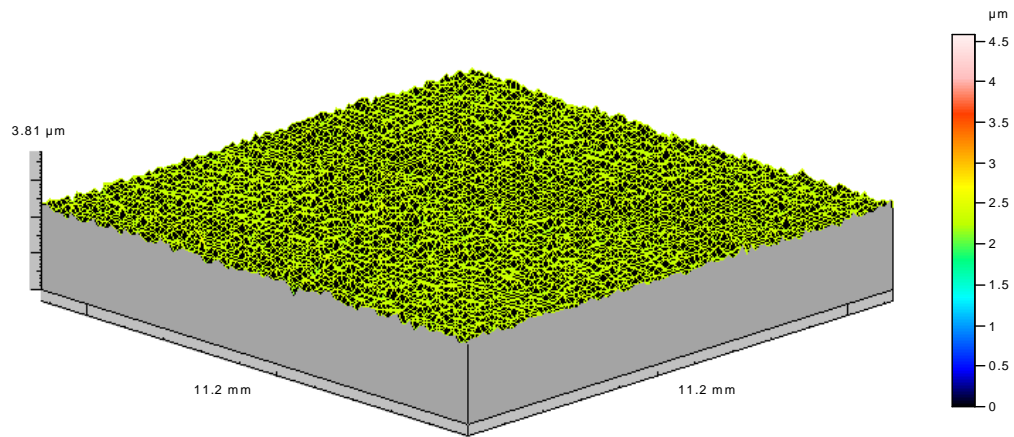


(b) mais lixada (sistema L1)

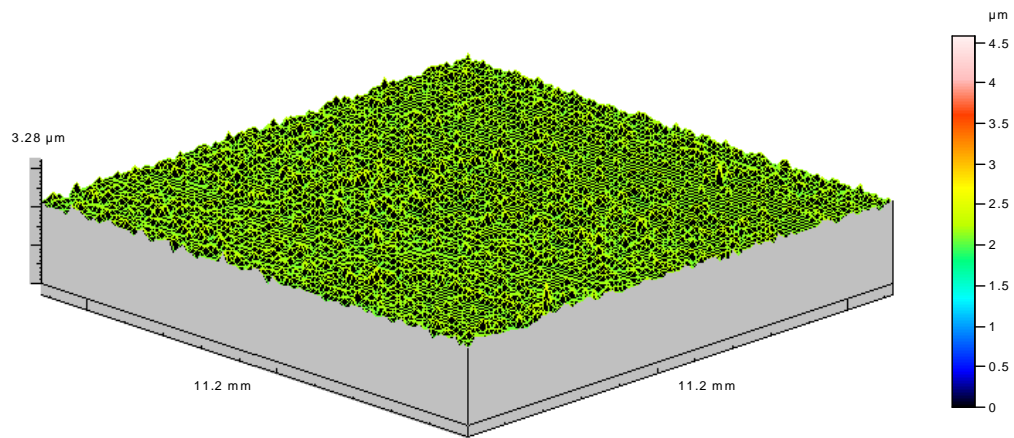


(c) polida (sistema F)

Figura 5.58 – Imagens obtidas por MEV (elétrons retroespalhados) das superfícies das amostras depois do recobrimento. Ampliação de 1.000x (a) sistema lixado intremediário (b) sistema mais lixado e (c) sistema polido



(a) lixada intermediário (sistema L2)



(b) mais lixada (sistema L1)

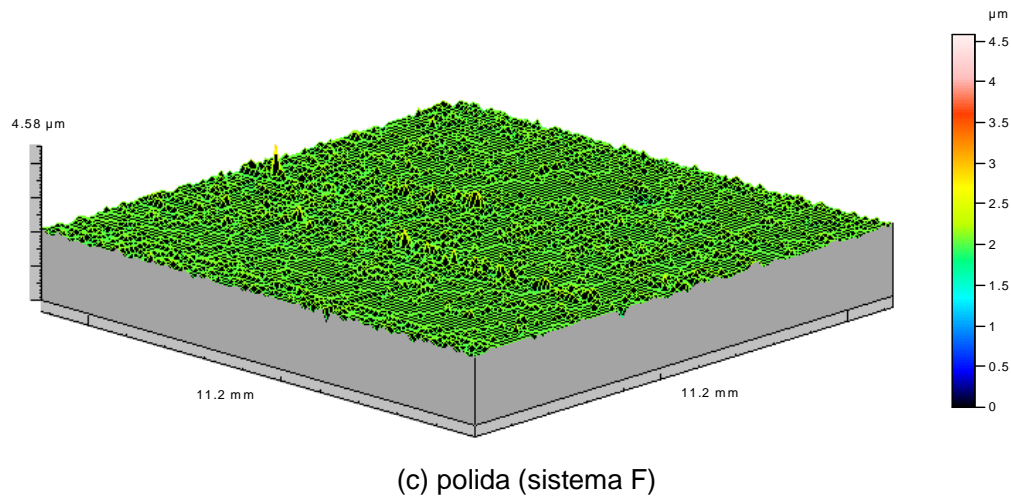
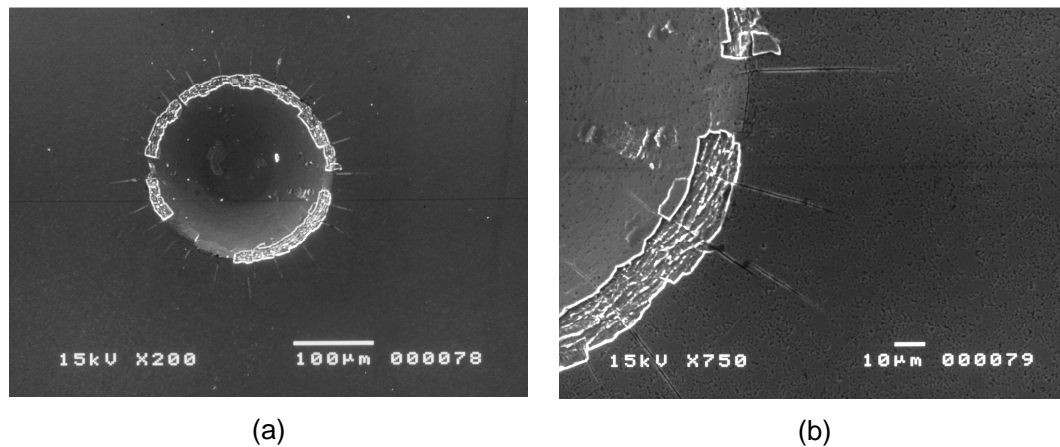


Figura 5.59 – Imagens obtidas para cálculo dos parâmetros de rugosidade (a) sistema lixado intermediário (b) sistema mais lixado e (c) sistema polido.

5.1.3 – Deposição do Recobrimento: Adesão e Espessura de Camada

Após as amostras serem recobertas, foi feito o teste de adesão Rockwell C por amostragem para verificação qualitativa da adesão do filme ao substrato. Imagens no MEV foram geradas para a análise comparativa com padrão de ensaio. Exemplos de imagens geradas podem ser observadas na Figura 5.60.



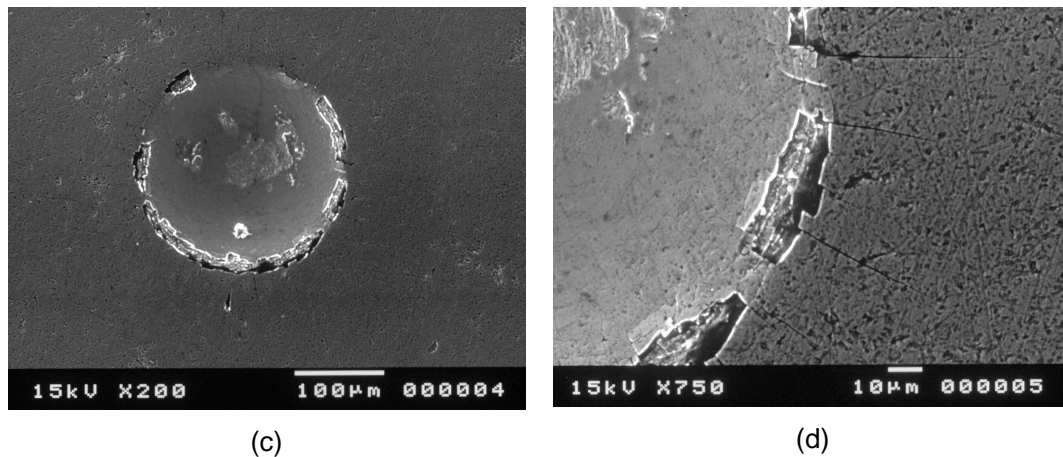


Figura 5.60 - Imagens do teste de adesão Rockwell C. Substrato: WC-Co. Recobrimento: CrAlN. (a) sistema polido. (b) ampliação de (a). (c) sistema lixado. (d) ampliação de (c). Aumentos de 200x e 750x.

Pelas imagens, pode-se concluir que não foi detectado problema de adesão do filme de CrAlN no substrato de metal duro, pois não foi encontrada nenhuma morfologia de trinca ou falha próxima ao padrão H5 ou H6.

A espessura da camada depositada também foi verificada. Com o uso do microscópio eletrônico de varredura foi possível realizar uma imagem de corte transversal da amostra. Através desta imagem pode-se estimar a espessura da camada utilizando a escala da fotografia. Para as imagens geradas, não foi encontrada espessura inferior a especificada: $2,5\mu\text{m}$ (Figura 5.61). Os valores da espessura de camada foram também avaliados quantitativamente através do ensaio de microabrasão e apresentaram-se compatíveis com os encontrados através de imagens do MEV.

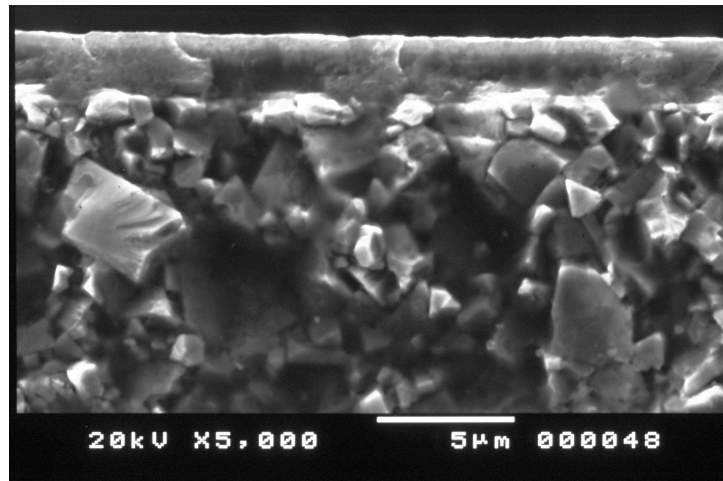


Figura 5.61 -.Espessura da camada de recobrimento de CrAlN depositada sobre substrato de WC-Co.

5.1.4 – Dureza

As durezas dos sistemas e da esfera foram verificadas utilizando-se equipamento de microdureza Vickers. Os resultados encontram-se na Tabela V.11.

Tabela V.10 - Tabela comparativa de dureza para os sistemas estudados. Carga de 1kgf por 10s.

AMOSTRA	MÉDIA [kgf/mm ²]	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO [%]	RELAÇÃO DE DUREZAS COM A ESFERA
Esfera	1.639,39	71,31	4,35	1,00
Sem recobrimento	1.438,30	28,12	1,96	1,14
Após recobrimento	1.772,48	51,25	2,89	0,92

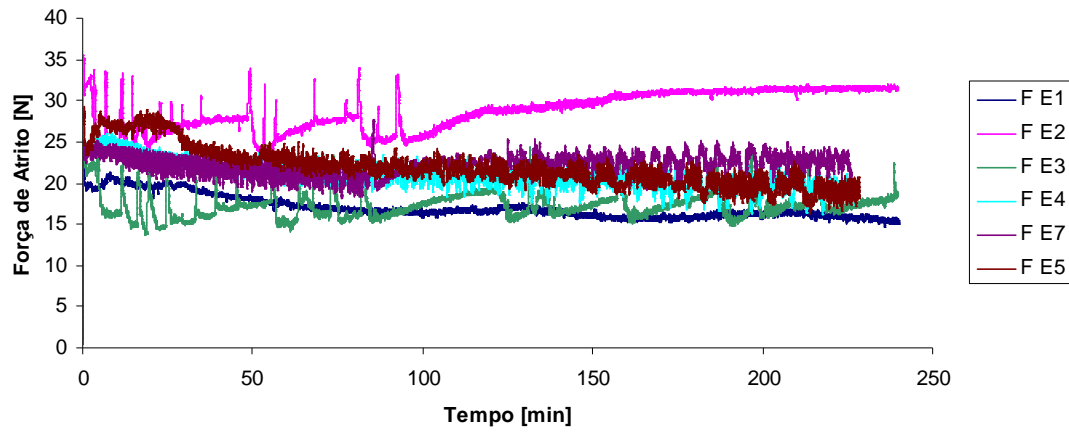
Pela Tabela V.10 é possível observar que os valores de dureza da esfera e das amostras antes e depois de recobrir são muito próximos. Após fazer o teste estatístico

t-student para verificar se as médias são equivalentes, pode-se concluir, com intervalo de confiança de 95%, que não há evidências suficientes para dizer que as médias são iguais. Deste modo, o teste confirma que as variações de 14% e 8% das durezas das amostras respectivamente sem e com recobrimento em relação ao valor de dureza da esfera são estatisticamente independentes. O aumento de dureza das amostras antes e depois do recobrimento indicam que a adição de filme fino de CrAIN melhora as propriedades de resistência mecânica do metal duro. Não foi observada variação de dureza entre sistemas (Polido e Lixado). Os valores de microdureza encontrados para o corpo de prova recoberto estão compatíveis com valores para filmes com composição de 30%at de alumínio (HASEGAWA, H. *et al*, 2004). É importante ressaltar aqui que os resultados das medidas de microdureza são influenciados pela presença do substrato. Para se obter resultados isentos desta influência, foram realizados pré-testes com equipamento de dureza instrumentada. Porém, para se obter resultados consistentes, a capacidade máxima de ensaio (carga de 1900N) precisou ser utilizada. Deste modo, o uso continuado do equipamento não era recomendado para este caso, sob pena de danificar o mesmo. No pré-teste, o resultado encontrado foi de 25GPa, próximo a valores de dureza de 32GPa encontrados na literatura para filmes de CrAIN (MO J. L. e ZHU M.H., 2009).

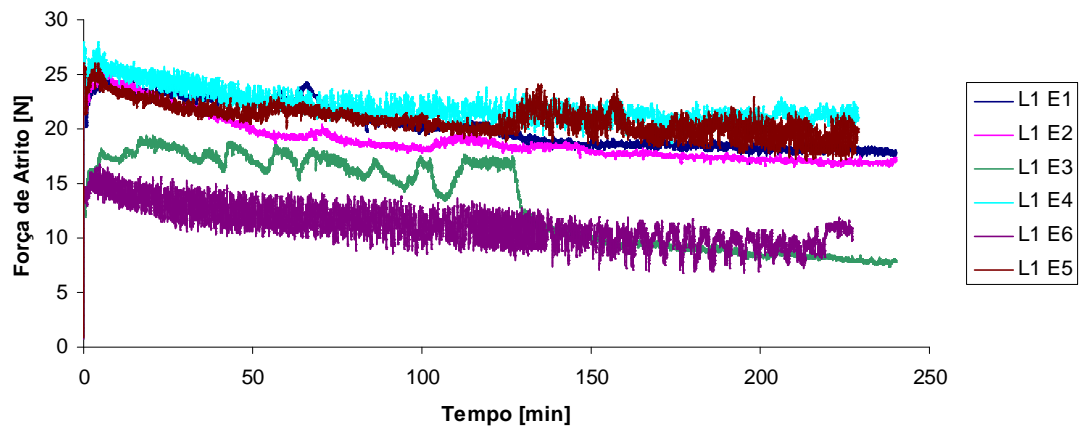
A Tabela V.10 mostra ainda as relações de dureza da esfera com os corpos de prova antes e depois do recobrimento. Percebe-se que após o recobrimento, a relação dureza da esfera sobre dureza do corpo de prova é 0,92, indicando que a esfera é cerca de 10% menos dura.

5.2 – Desgaste por Deslizamento Esfera sobre Disco

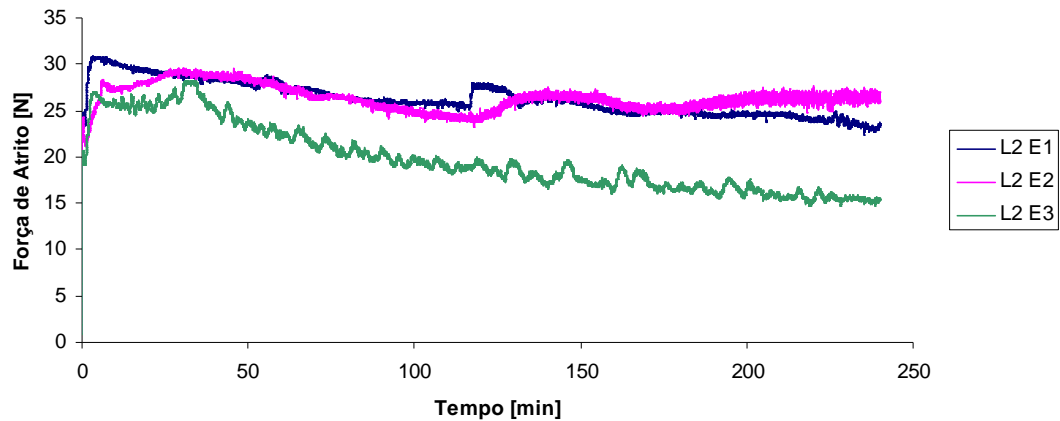
Os resultados dos ensaios de desgaste por deslizamento dos três sistemas estudados podem ser observados através das curvas da Figura 5.62. Foram feitos gráficos de força de atrito por tempo de ensaio. Cada ponto da curva dos gráficos foi obtido através da média dos valores dos vinte pontos mais próximos. Ao utilizar este filtro, é possível visualizar melhor os efeitos e tendências sem perder informações relevantes da aquisição de dados.



(a) Sistema polido (F)



(b) Sistema lixado (L1)



(c) Sistema lixado (L2)

Figura 5.62 - Resultados de ensaios de desgaste por deslizamento. Gráficos de força de atrito por tempo. (a) Sistema polido. (b) Sistema lixado (c) sistema lixado intermediário.

Ao observar o gráfico do sistema Polido (F), percebe-se que as curvas das amostras F E2 e F E3 comportam-se de maneira bem diferente das demais. Através de análise visual das trilhas de desgaste após os ensaios, foi identificada uma tendência de existência de trilha mais profunda e mais larga, com geração de maior de volume de partículas de desgaste comparando-se com os demais testes para o mesmo sistema Polido (F). Estas amostras foram então submetidas a uma análise de elementos químicos ao longo da superfície, passando pela trilha de desgaste. O resultado pode ser observado na Figura 5.63.

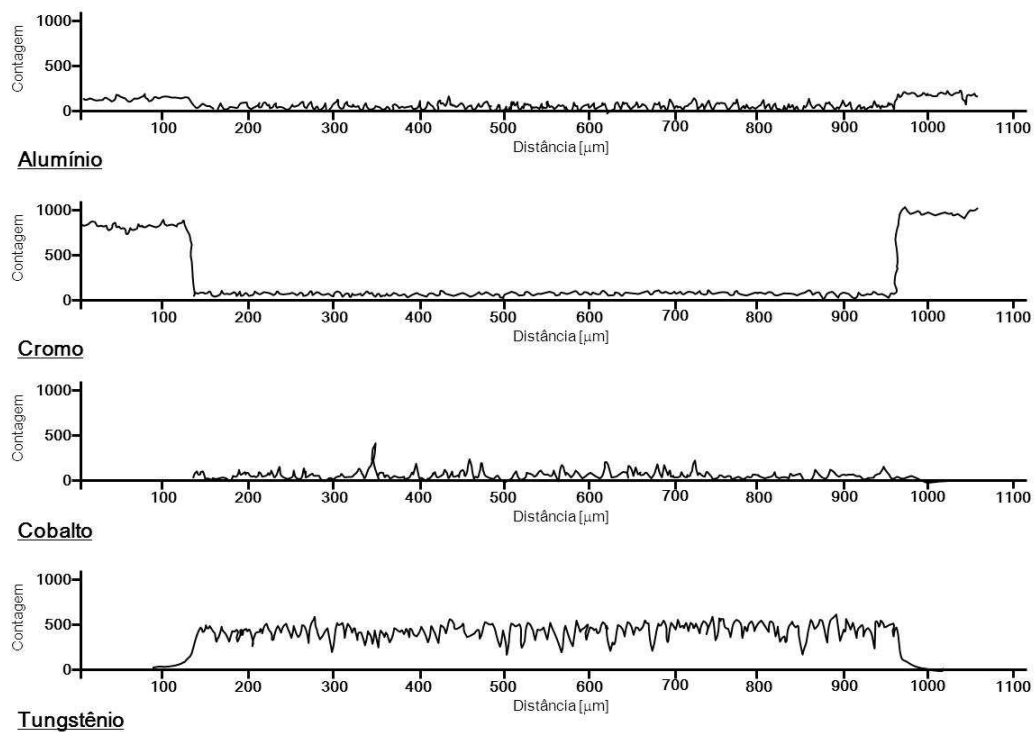


Figura 5.63 - Perfil dos componentes químicos ao longo da superfície da amostra F E2 após o ensaio de desgaste por deslizamento.

A Figura 5.63 nos mostra que, na região da trilha de desgaste, o tungstênio, material do substrato, aumentou sua concentração de zero para valores consideráveis, enquanto o cromo, material do recobrimento, sofreu redução drástica, indicando que o desgaste atingiu o metal duro. Medidas de raios X foram feitas na região da trilha e resultados similares foram encontrados. Para ter certeza que o problema não era de adesão do filme de CrAlN no substrato de WC-Co, foram feitas indentações com penetrador Rockwell C e as amostras dos dois sistemas foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura para análise das impressões. A Figura 5.64 mostra a imagem da impressão da amostra F E3. Nela é possível perceber que, apesar da adesão mostrar-se boa, sem marcas de descamação no seu entorno, há indícios de falha de recobrimento durante o processo de deposição. Este fato explica o comportamento do desgaste das duas amostras, F E2 e F E3, cujas as curvas de força de atrito por tempo demonstraram-se atípicas. Sendo assim, as amostras em questão foram descartadas das análises posteriores. Do mesmo modo, ao se observar a Figura 5.62,

gráfico (b), sistema lixado L1, há duas curvas cujos valores de força de atrito estão abaixo do observado para os demais ensaios. Estes testes, L1 E3 e L1 E6, apresentam comportamento diferenciado das demais curvas do mesmo sistema (Lixado), indicando ser alguma variação não controlada de parâmetros de ensaio, como temperatura, umidade etc. Estas duas amostras também foram excluídas das análises posteriores deste trabalho.

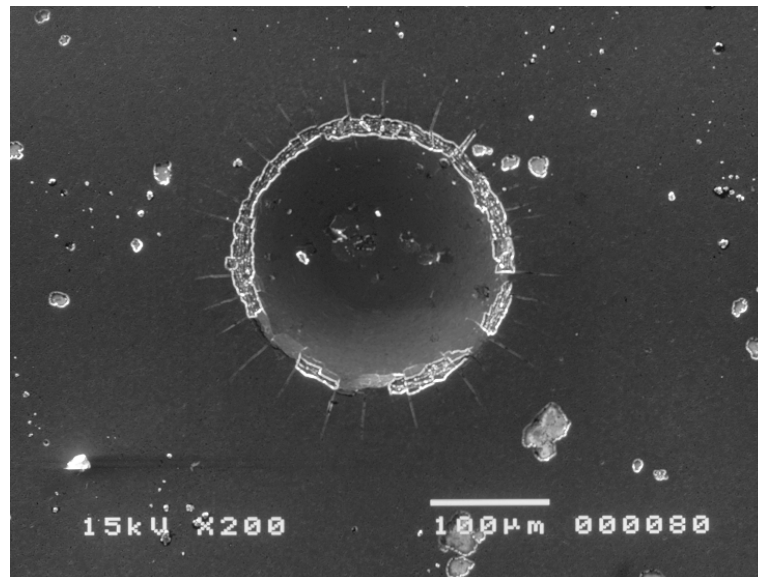


Figura 5.64 - Imagem por MEV da impressão de indentação Rockwell C em sistema Polido. Amostra F E3.

Com as curvas restantes, foi feita uma média dos resultados e os sistemas foram colocados em um mesmo gráfico, que pode ser observado na Figura 5.65.

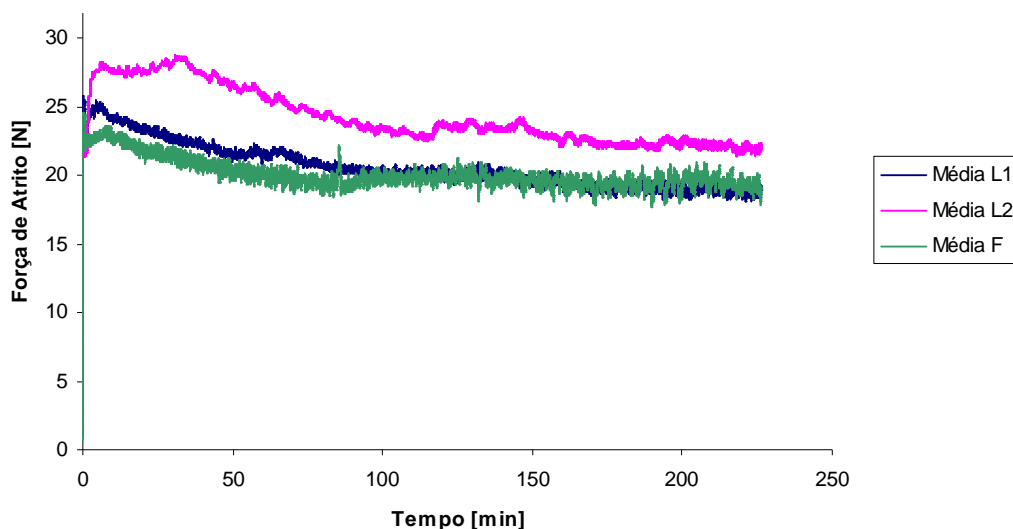


Figura 5.65 - Gráficos do comportamento da força de atrito por tempo. Média entre os sistemas polido (P), lixado (L1) e lixado intermediário (L2).

O gráfico da Figura 5.65 nos mostra que a força de atrito inicialmente se eleva a valores próximos de 25N e que, a longo prazo, há uma queda constante, com tendência de convergência dos três sistemas para o valor estável em torno de 20N. As curvas mostram comportamento parecido entre os sistemas, porém, durante o período de transição de alta taxa de crescimento da força de atrito para início de sua queda, (período inicial do ensaio) as curvas associadas aos sistemas lixados atingiram patamares maiores de valor de força de atrito do que o sistema polido. Este fato pode ser atribuído a força necessária para deformar e quebrar as asperezas existentes na superfície dos sistemas Lixado (L1 e L2), que são mais proeminentes que no sistema Polido (F). A curva do sistema Lixado L2 apresenta valores mais elevados de força de atrito tanto no período inicial quanto ao longo de todo o ensaio. A característica híbrida do perfil de rugosidade, tendo elementos tanto do sistema Lixado L1 quanto do sistema Polido podem explicar este fato. O perfil do sistema Lixado L2 tem picos menos altos que o sistema Lixado L1, porém em maior quantidade. O seu perfil do tipo platô, com índice de suporte de carga próximo do sistema Polido, parece favorecer a adesão e interação entre as asperezas dos dois materiais, fazendo com que a força de atrito fique sempre alguns níveis acima dos demais sistemas.

Para melhor observar o período inicial do teste, novas curvas foram feitas, alterando-se a escala do tempo de ensaio. O resultado pode se visto na Figura 5.66.

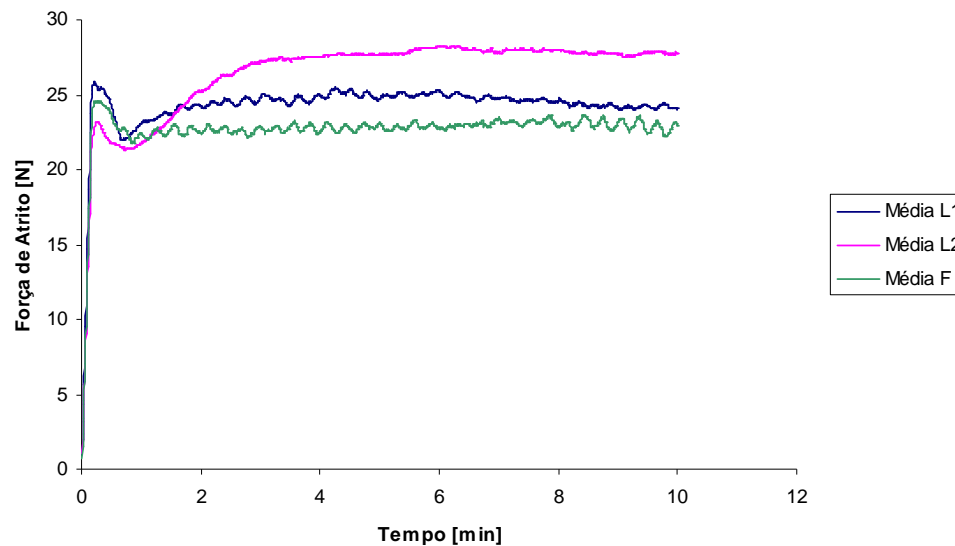


Figura 5.66 - Gráficos do comportamento da força de atrito por tempo. Escala de tempo alterada para valor máximo de 10min. Média entre os sistemas polido (P), lixado (L1) e lixado intermediário (L2).

Com a redução do valor máximo da escala do tempo no gráfico, é possível perceber de forma mais clara que para todos os sistemas a taxa inicial de crescimento da força de atrito foi a mesma durante o período inicial de acomodação (*running in*). Após este crescimento, a força de atrito decresceu e logo em seguida assumiu a tendência de atingir valor estável ao longo do tempo. Este comportamento de transição de regimes instável para estável é típico de deslizamento entre metais sem utilização de lubrificantes (BLAU P., 1981). Porém, observando as três curvas, percebe-se que a força de atrito volta a crescer de maneira mais suave, se comparada com o crescimento inicial, antes de começar decrescer para valores menores até atingir a estabilidade. A força de atrito para o sistema Polido (F) cresce com uma taxa menor que o os Lixados (L1 e L2). O aumento da força de atrito após a queda inicial sugere que o período de acomodação ainda não se encerrou. A tendência ao desgaste severo parece continuar existindo, porém com menor intensidade que nos primeiros

segundos do ensaio. A taxa menor do novo crescimento para o sistema Polido (F) é um indício de que o equilíbrio está mais próximo de ser atingido que nos sistemas Lixados (L1 e L2).

Com a alteração da escala, é possível também perceber com maior nitidez as oscilações da força de atrito com o tempo. GODFREY D. (1995) observou que estas oscilações de força de atrito e/ou coeficiente de atrito presentes no ensaio de desgaste esfera sobre disco podem ser devidas a presença de vários fatores externos e internos ao ensaio, dentre eles: oscilação e/ou desnivelamento do disco, rugosidade unidirecional do disco, alteração de material na mesma peça, presença de lubrificante e transferência de material. Baixas amplitudes de variação do coeficiente de atrito foram associados com pouca transferência de material e os altos, como maior transferência. Dos fatores citados, GODFREY D sugere que o que mais influencia a oscilação em termos de amplitude é a transferência de material. Uma outra contribuição a presença de oscilações foi observada também por outros autores e sumarizada por BLAU P. (2001). É caracterizada pela presença de picos agudos na superfície e acontece quando da interação com a outra superfície durante o movimento relativo entre as mesmas. Quando os picos estão em contato, os corpos não se movimentam e a força tangencial cresce até atingir o limite para início do movimento, onde ocorre o deslocamento relativo e a força volta a cair até que novo contato de pico seja estabelecido e a força então volta a crescer. As oscilações presentes sugerem que, mesmo tendo aparentemente atingido o regime permanente de força de atrito, há uma alternância entre mecanismos severo e moderado de desgaste, com interações entre asperezas e transferência de material ocorrendo ciclicamente.

Análise visual com auxílio de instrumentos e de elementos químicos presentes nas trilhas e partículas de desgaste foram feitas para complementar as observações sobre as curvas de força de atrito dos sistemas. Fotografias com microscópio eletrônico de varredura foram tiradas tanto da trilha quanto das partículas de desgaste. As imagens podem ser vistas na Figura 5.67. Os resultados das análises químicas dos elementos presentes na trilha, na esfera e no detrito de desgaste podem ser observadas na Tabela V.12.

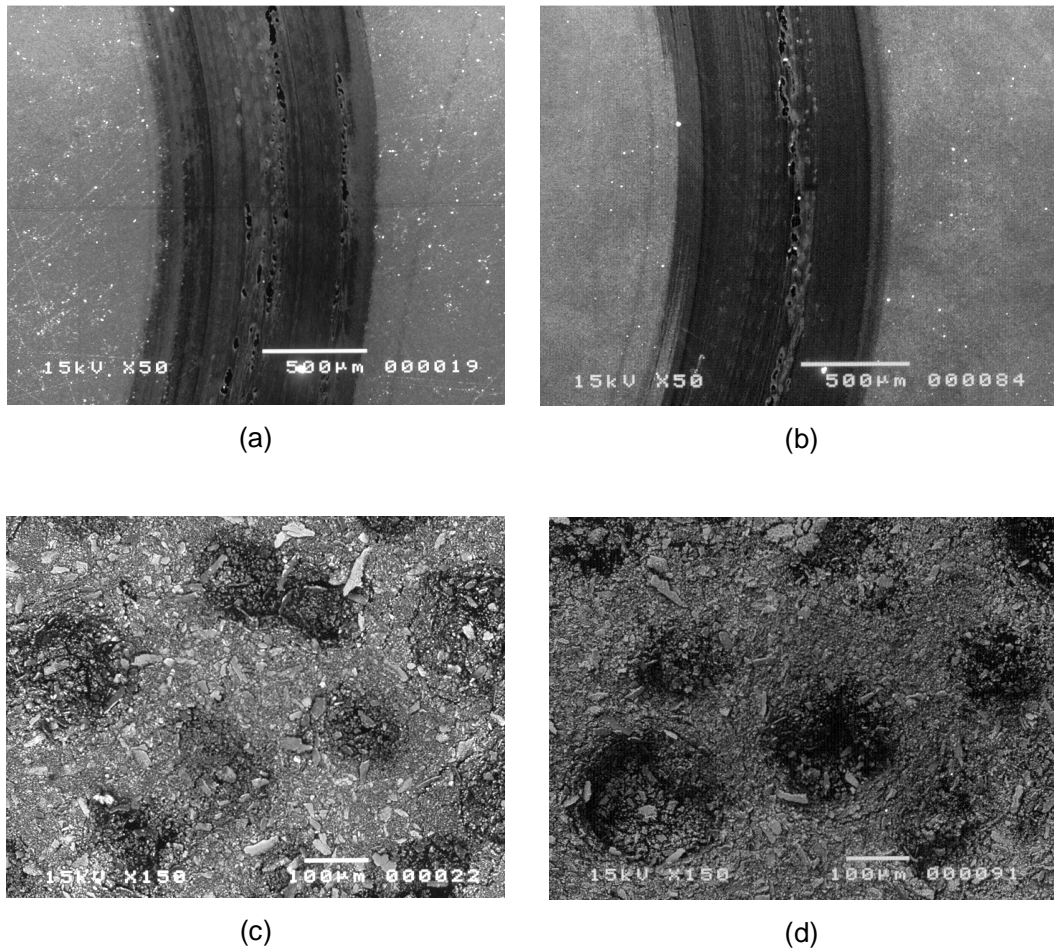


Figura 5.67 - Imagens típicas da trilha e dos detritos após ensaio de desgaste por deslizamento (a) e (c) sistema lixado e (b) e (d) sistema polido. Imagens obtidas por MEV.

Tabela V.11 – Análise da composição química por EDS das amostras após ensaios de desgaste por deslizamento. (a) interior da trilha (b) partículas de desgaste (c) superfície desgastada da esfera. Análises gerais em percentual atômico

Interior Trilha									
Ele.	F [% atômico]			L1 [% atômico]			L2 [% atômico]		
	E1	E4	E5	E1	E2	E4	E1	E2	E3
N	5,62	5,38	3,86	13,19	0	0	7,24	0	0
O	4,76	4,03	2,54	8,41	3,2	3,21	4,03	8,21	3,29
Al	39,85	39	41,81	35,66	43,44	42,2	38,49	36,42	45,21
Si	1,01	1,57	0,63	0,27	0,68	0,75	1,17	3,21	0,76
Cr	47,94	49,61	50,51	42,19	52,16	53,24	48,51	51,64	49,87
Co	0,14	0,05	0,16	0,15	0,04	0,04	0	0,18	0,19
W	0,69	0,35	0,49	0,11	0,49	0,56	0,56	0,34	0,67
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(a)

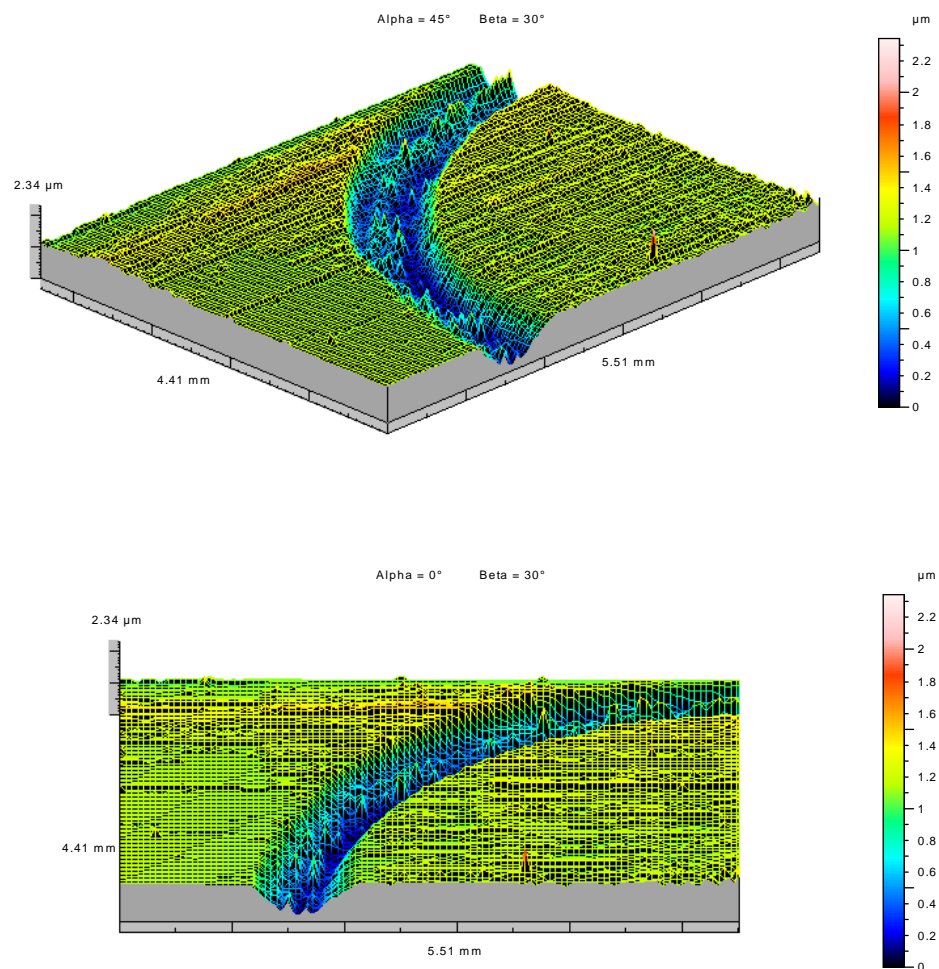
Partículas de Desgaste									
Ele.	F [% atômico]			L1 [% atômico]			L2 [% atômico]		
	E1	E4	E5	E1	E2	E4	E1	E2	E3
N	0	0	48,72	54,55	15,25	35,07	10,47	0	34,96
O	42,96	44,09	0	0	24,49	21,08	35,23	25,89	20,98
Al	9,74	8,93	8,49	7,03	9,61	7,82	8,66	13,94	8,06
Si	28,98	28,94	23,64	22,13	29,56	18,95	29,24	36,24	18,76
Cr	18,14	17,81	19,15	16,29	20,81	16,28	16,26	23,92	17,24
Co	0,18	0	0	0	0,01	0	0,13	0	0
W	0	0,23	0	0	0,27	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	99	100	100	100

(b)

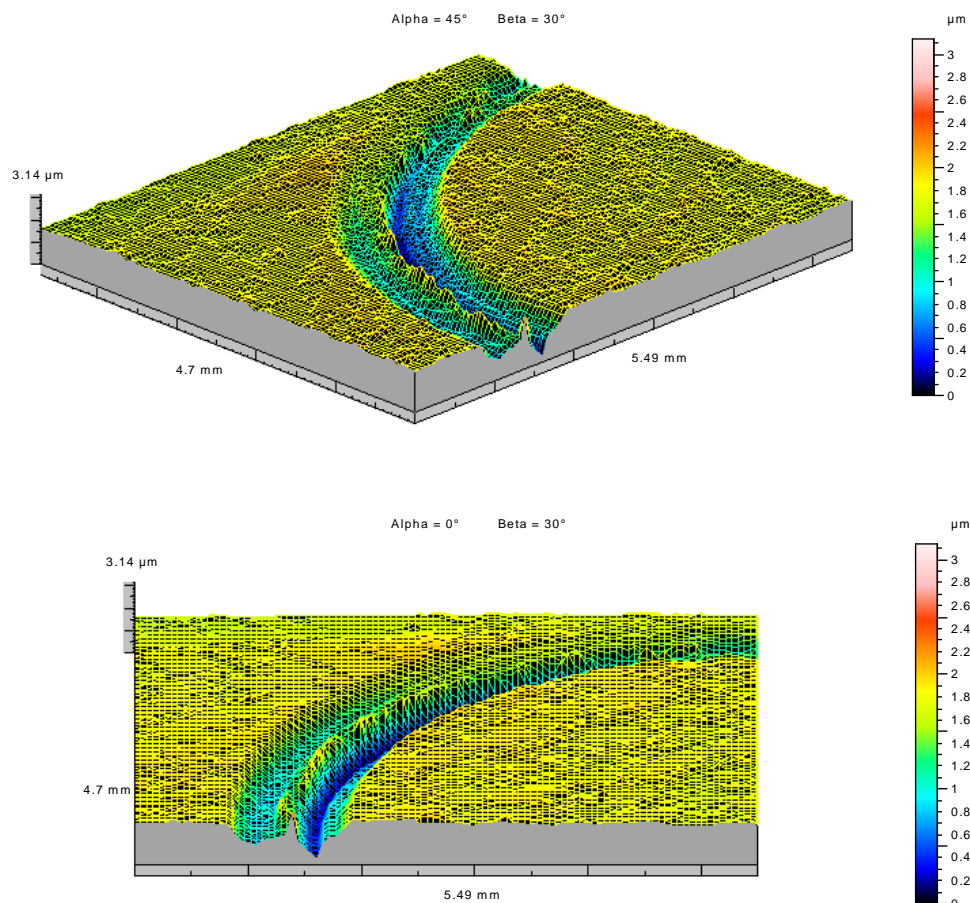
Esfera									
Ele.	F [% atômico]			L1 [% atômico]			L2 [% atômico]		
	E1	E4	E5	E1	E2	E4	E1	E2	E3
N	47,06	0	70,63	0	72,15	0	0	0	0
O	10,68	0	0	0	0	0	0	0	4,89
Al	3,8	3,93	0,93	3,99	1,43	4,92	5,87	4,76	3,83
Si	36,34	90,46	26,57	92,4	25,17	87,53	88,29	87,72	87,62
Cr	1,98	5,56	1,65	3,7	1,25	6,99	5,84	6,96	3,59
Co	0,09	0,05	0,11	0	0	0,21	0	0,18	0,07
W	0,05	0	0,11	0	0	0,34	0	0,38	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(c)

As fotografias do MEV mostram a presença de pontos escuros no centro da trilha de desgaste para todos os sistemas. Análises de raios X indicaram a presença de silício nestas regiões e as análises de EDS mostraram presença de oxigênio. O centro da trilha coincide com o contato inicial da esfera sobre o corpo de prova. A medida em que o desgaste foi ocorrendo, a trilha foi se alargando em distâncias equivalentes a partir do ponto inicial de contato. A presença do silício indica transferência de material da esfera para o corpo de prova e a presença de oxigênio, associado ao alumínio e cromo, mostra a possível existência de interação da esfera com partículas de desgaste do corpo de prova. Marcas profundas na região central da trilha mostram a presença de desgaste severo, abrasivo, possivelmente a três corpos (LACKNER J.M. *et al*, 2004). A Figura 5.68 mostra imagens de perfilometria da trilha de desgaste em corte, onde são mostradas as marcas de desgaste.



(a) Sistema Polido (F)



(b) Sistema Lixado (L1)

Figura 5.68 - Imagens de perfilometria da trilha de desgaste após teste de desgaste esfera sobre disco. (a) Sistema polido (F) e (b) Sistema lixado (L1)

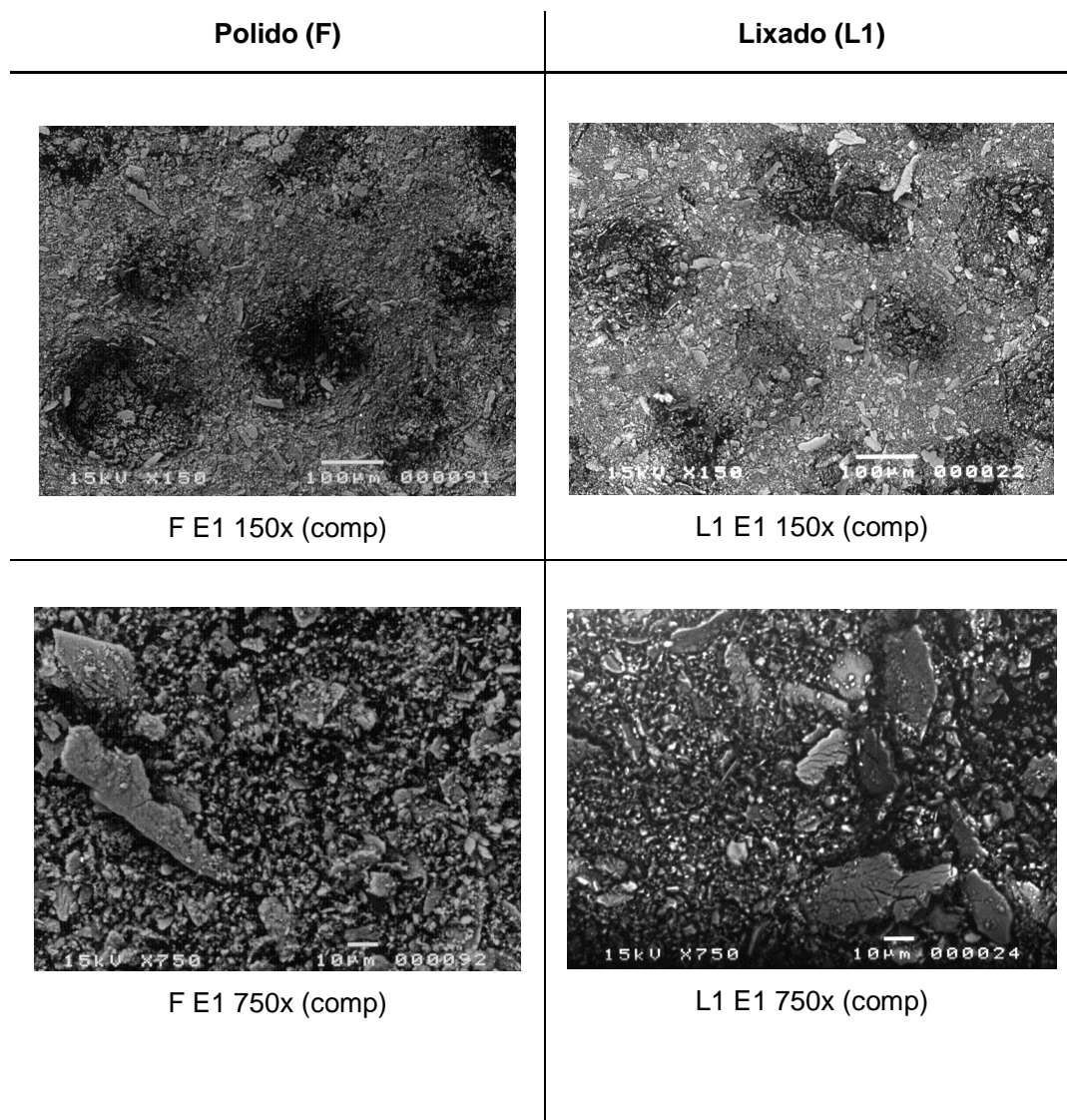
MO J. L. e ZHU M.H. (2009) observaram a possibilidade de interação entre a esfera e partículas de desgaste. Estudos de desgaste em sistemas com esfera de SiN deslizando contra corpos de prova de WC-Co recobertos de CrN, CrAlN e TiAlN a uma carga normal de 5N foram feitos. Eles sugeriram a existência de diferentes mecanismos de expulsão de partículas de desgaste da trilha que está sendo formada. A diferença de mecanismos foi atribuída ao formato e a natureza das partículas

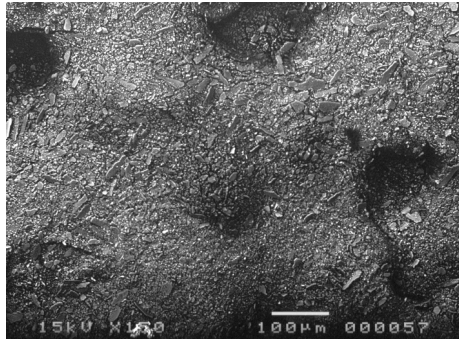
gerada pelos recobrimentos. A eficiência da expulsão das partículas pode influenciar no resultado da resposta ao desgaste, aumentando ou diminuindo sua taxa.

Na análise química das esferas, foram encontrados indícios de cromo e alumínio também em todos os sistemas, além do silício e nitrogênio, que são materiais do contra corpo. Deste modo, percebe-se que houve transferência de material do recobrimento para a esfera. Foi observado indício de oxigênio na esfera somente em duas amostras. Isto é explicado pelo fato do Si_3N_4 se oxidar a temperaturas acima de 1.000°C , em um processo complexo, liderado pela formação de uma camada de SiO_2 na superfície, separada do material base por uma fina camada de sub óxido (SiN_xO_y) ou um oxinitrito cristalino ($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$) (BEAUME F *et al*, 2006). A pouca presença de oxigênio na esfera se deve ao fato de óxidos de alumínio e cobre (materiais associados a detritos de desgaste) possivelmente terem sido contra transferidos da esfera.

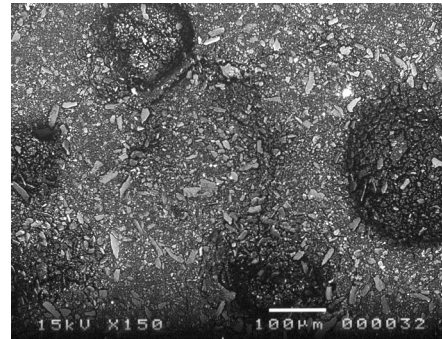
É possível perceber a presença de alumínio, cromo e silício em quantidades consideráveis (média: Al=10, Si=29 e Cr=19 %at.) nas partículas de desgaste. Estas partículas apresentam-se morfológicamente heterogêneas em todos os sistemas. A presença de partículas grandes (maiores que $10\mu\text{m}$), angulares, planas, com presença de trincas e constituídas principalmente de alumínio (8 a 15%at), cromo (30 a 40%at) e nitrogênio (30 a 40%at), indicam a presença de mecanismo de desgaste dominado por fratura frágil, com arrancamento de material do filme de recobrimento, característico de mecanismos de desgaste severo para materiais cerâmicos (HUTCHINGS I. M., 1992). Especificamente para o sistema Polido (F), também foi detectado oxigênio em partículas de tamanho maior, indicando a presença de óxidos nas mesmas. Também foram encontradas, em maior quantidade, partículas menores em tamanho (cerca de $1\mu\text{m}$), de formato equiaxial. A presença destas partículas é provavelmente devido a oxidação e ao polimento entre as asperezas na região de contato durante o período de acomodação entre as partes (RUFF A. W. *et al*, 1981) e também devido a presença de desgaste moderado. A análise química destas partículas menores indicaram presença constante de silício em quantidades não inferiores a 25%at. Foi observado presença também de oxigênio em quantidades significativas (10 a 40%at), além do cromo (10 a 20%at) e alumínio (7 a 14%at).

Apesar das análises das partículas de desgaste fornecerem fortes indícios de desgaste severo, não foi possível, somente através delas, distinguir diferenças consistentes entre as amostras com distintas rugosidades do substrato. A Figura 5.69 mostra um comparativo entre as partículas de desgaste de algumas amostras dos sistemas Lixado e Polido. Há presença de partículas grandes e pequenas, aparentemente com a mesma proporção para todos os sistemas. As partículas grandes não se diferem em termos de tamanho entre os sistemas, assim como há indícios de arrancamento por fratura frágil (presença de trincas em algumas partículas maiores) em todos os sistemas.

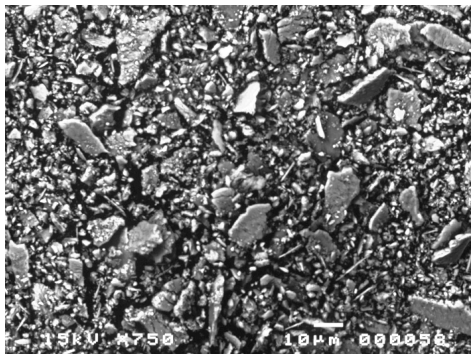


Polido (F)

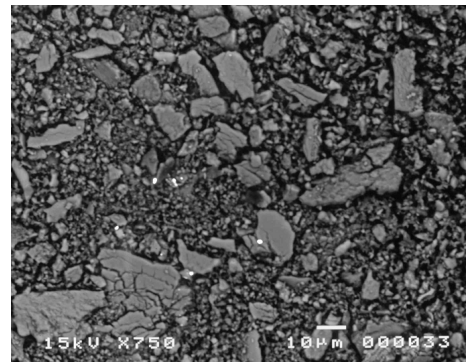
F E4 150x (comp)

Lixado (L1)

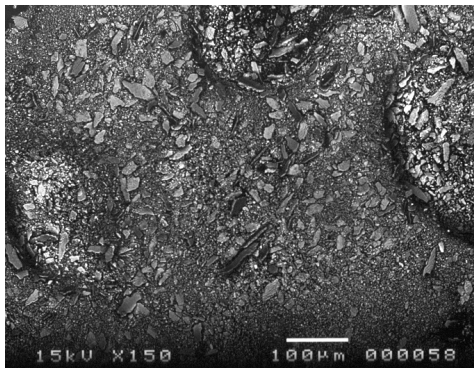
L1 E2 150x (comp)



F E4 750x (comp)



L1 E2 750x (comp)



F E5 150x (comp)



L1 E3 150x (comp)

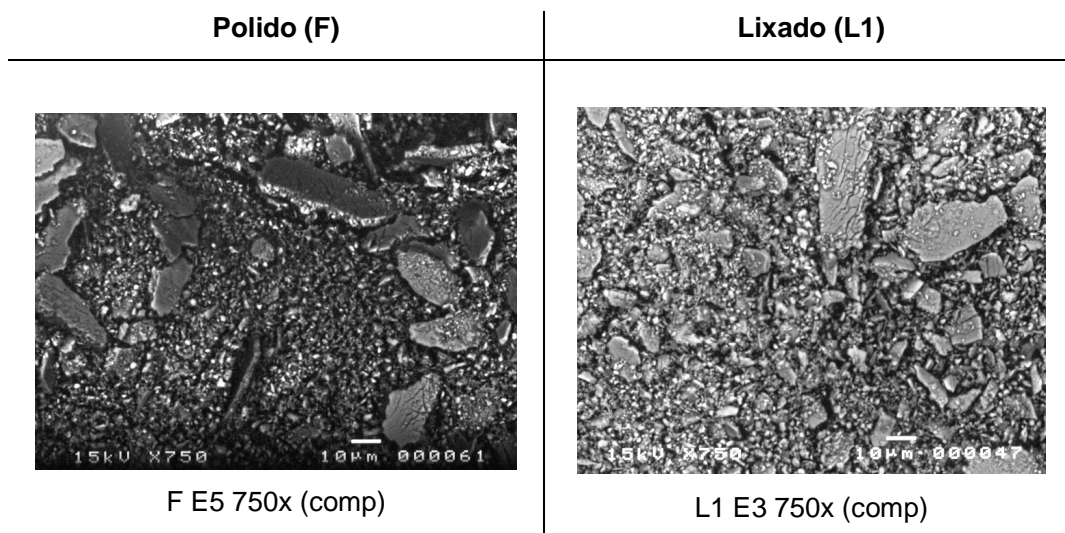


Figura 5.69 - Tabela comparativa para os tamanhos das partículas de desgaste dos sistemas Polido (F) e Lixado (L1). Fotografias obtidas por MEV.

A resposta quanto a influência da rugosidade do substrato na capacidade de resistir ao desgaste foi avaliada através do coeficiente dimensional de desgaste. Para tanto, os volumes de desgaste de cada teste foram calculados.

O volume de desgaste da trilha foi calculado por método indireto, utilizando recursos disponíveis no *software* de análise perfilométrica. Os resultados de volume, área superior da trilha, profundidade máxima e profundidade média encontram-se sumarizados na Tabela V.12.

Tabela V.12 - Resultados de volume de desgaste para os sistemas estudados.

Parâmetros	POLIDO (F)			LIXADO (L1)			LIXADO (L2)		
	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação [%]	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação [%]	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação [%]
Área [mm ²]	20,85	3,691	17,70	24,08	2,338	9,71	22,15	4,491	20,28
Volume [mm ³]	0,01095	0,002	16,19	0,01302	0,001	9,25	0,01015	0,004	41,55
Altura Máxima [µm]	2,075	0,367	17,67	1,674	0,243	14,53	1,285	0,083	6,43
Altura Média [µm]	0,52667	0,008	1,52	0,5417	0,014	2,67	0,44583	0,101	22,72

Os valores encontrados apresentam elevado coeficiente de variação para todos os casos, mostrando uma dispersão alta dos dados utilizados para o cálculo do volume. Esta dispersão é explicada pelos erros embutidos do método, onde o mecanismo de desgaste severo (muito material transferido) e a reduzida dimensão da trilha são fatores que dificultam o cálculo. Deste modo, não se pode afirmar que as médias dos valores de volume de desgaste calculados, baseados nos dados disponíveis, são diferentes entre si.

No entanto, ao se observar a área superficial da trilha, nota-se que há uma tendência do sistema mais lixado (Lixado L1) apresenta maior largura da trilha que o sistema Polido. Este fato evidencia que provavelmente o sistema Polido (F) apresentou desgaste comandando por mecanismo mais severo que os demais.

O desgaste da esfera foi também calculado por método indireto, com medição do diâmetro da calota e posterior cálculo do volume desgastado por relações geométricas (ASTM G99). O volume total desgastado é dado pela soma dos volumes perdidos dos dois corpos, esfera e corpo de prova. Deste modo, a Tabela V.13 resume o volume calculado para esfera e a Figura 5.70 mostra o resultado do cálculo do volume total desgastado do conjunto esfera/corpo de prova

Tabela V.13 - Resultado do volume de desgaste da esfera para cada sistema estudado.

Parâmetros	POLIDO (F)			LIXADO (L1)			LIXADO (L2)		
	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação [%]	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação [%]	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação [%]
Diâmetro [mm]	0,715	0,037	5,17	0,677	0,014	2,04	0,67	0,006	0,90
Volume [mm ³]	2,162	0,460	21,28	1,719	0,143	8,32	1,652	0,062	3,76

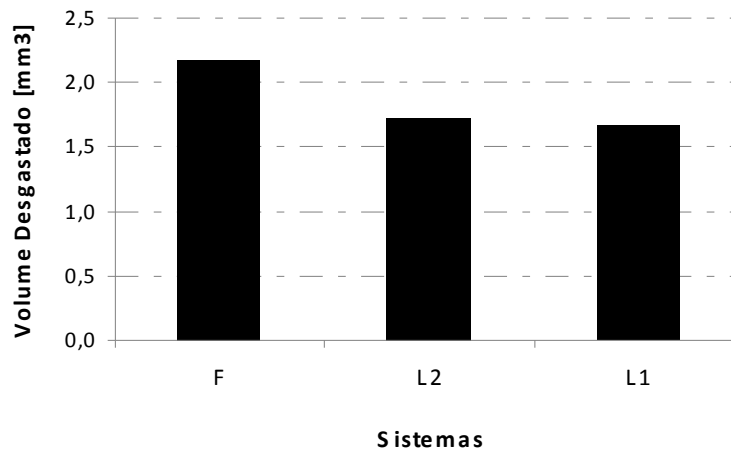


Figura 5.70 - Volume total desgastado do conjunto esfera/corpo de prova por sistema estudado: Polido (F), Lixado (L1) e Lixado intermediário (L2)

Analisando os volumes de desgaste da esfera e do corpo de prova, conclui-se que, mesmo a relação de microdureza entre ambos sendo próxima de um, a esfera perdeu cerca de duas ordens de grandeza a mais de material que o corpo de prova. Os mecanismos de formação de óxido de alumínio na superfície do corpo de prova recoberto por CrAIN podem ter ajudado a proteger o corpo de prova contra o seu desgaste. Além disto, os resultados de medidas de microdureza do corpo de prova estão influenciados pela presença do substrato, que apresenta dureza menor que a do filme, contribuindo para minimizar o valor aparente da sua dureza superficial.

Ao se realizar o teste de estatística *t-student* para os volumes calculados na Tabela V.14 conclui-se, com intervalo de confiança de 95%, que não há evidência suficiente para dizer que os valores das médias de desgaste da esfera para os sistemas Polido e Lixado (L1 e L2) são diferentes entre si. Porém, ao se analisar o volume final, composto pela soma dos volumes de desgaste da esfera e do corpo de prova, e como o valor do desgaste do corpo de prova é cem vezes menor que o da esfera, podemos afirmar que os valores de desgaste final do conjunto, com intervalo de confiança de 95%, são diferentes entre os sistemas Polido (F) e Lixado (L1 e L2). Deste modo, para o perfil de rugosidade apurado para as amostras cujos substratos foram polidos,

obteve-se volumes de material retirados maiores em cerca de 20% em relação a substratos com perfis de rugosidades cujas amostras foram lixadas.

Os resultados em termos do coeficiente dimensional de desgaste calculados para a esfera podem ser observados na Tabela V.14. Para o cálculo deste coeficiente, foi utilizada a Equação de Archard (HUTCHINGS, I.M, 1992).

Tabela V.14 – Cálculo do coeficiente dimensional de desgaste para os três sistemas estudados. (a) esfera e (b) corpo de prova

Sistemas	W Carga Aplicada [N]	S Distância Percorrida [m]	V Volume Desgastado [mm ³]	Q Taxa de Desgaste [mm ³ /m]	k Coeficiente de Desgaste Dimensional [x10 ⁻⁶ mm ³ /Nm]
Polido (F)	40	3014	2.16	0.000717	0.179
Lixado (L1)	40	3014	1.72	0.000570	0.143
Lixado (L2)	40	3014	1.652	0.000548	0.137

(a)

Sistemas	W Carga Aplicada [N]	S Distância Percorrida [m]	V Volume Desgastado [mm ³]	Q Taxa de Desgaste [mm ³ /m]	k Coeficiente de Desgaste Dimensional [x10 ⁻⁶ mm ³ /Nm]
Polido (F)	40	3014	0.0109533	0.0000036	0.0009085
Lixado (L1)	40	3014	0.0130200	0.0000043	0.0010800
Lixado (L2)	40	3014	0.0101467	0.0000034	0.0008416

(b)

Os resultados da Tabela V.14 indicam que as esferas utilizadas como contra corpo nos ensaios cujo corpo de prova tem o substrato de rugosidade caracterizada pelo polimento (Polido) tiveram maior taxa de desgaste que as esferas utilizadas nos ensaios dos corpos de prova com substratos de rugosidade caracterizada pelo lixamento (Lixados L1 e L2).

Os resultados de taxa de desgaste indicam que há influência da rugosidade do substrato nos resultados de volume desgastado da esfera. Não se pode dizer o mesmo em relação as taxas de desgaste calculadas para os corpos de prova, que estatisticamente apresentam-se iguais. Porém, ao se considerar o volume de desgaste total (esfera mais corpo de prova), percebe-se que há uma tendência de desgaste maior em sistemas cujo substrato é polido. O perfil de rugosidade do sistema Polido e a capacidade de expulsão das partículas de desgaste da trilha ajudam a explicar o fato. O perfil do tipo platô, com densidade alta de picos, favorece a adesão entre as asperezas do corpo de prova e da esfera. Como os materiais da esfera e do corpo de prova são cerâmicos e há baixa compatibilidade química entre eles, a força tangencial necessária para que ocorra a fratura frágil em regime severo de desgaste (alta carga normal) é menor (HUTCHINGS I.M., 1992). Ao mesmo tempo, ao longo do ensaio, há a tendência de se iniciar o regime moderado de desgaste, com a formação de óxidos de cromo e alumínio na superfície do corpo de prova. Estes óxidos funcionam como filme lubrificante, protegendo a superfície contra o desgaste, porém, eles também interagem com a esfera e são retirados da camada superficial sob a forma de detritos de desgaste. Deste modo, há a geração de grande quantidade de partículas de desgaste duras que contribuem para aumentar a taxa de desgaste do sistema através da abrasão a três corpos. A capacidade insuficiente de expulsão destas partículas (associada a mecanismos próprios do recobrimento de CrAIN) ajudam a potencializar o desgaste severo da esfera, que tem o maior volume de material arrancado.

A análise de partículas de desgaste e da curva de força de atrito mostraram-se consistentes para determinar a presença de desgaste severo em todos os casos estudados, porém, sem distinção clara entre sistemas, a não ser pela taxa de desgaste da esfera maior para o sistema Polido.

Para melhor analisar os mecanismos associados aos resultados de coeficiente de desgaste obtidos, foram então realizados alguns ensaios com grau de severidade menor que os executados. Tanto a força normal quanto a rotação de ensaio foram reduzidos e novos testes de desgaste por deslizamento de esfera sobre disco foram feitos, agora com velocidade de 200rpm e carga de 15N. Uma vez que a longo prazo foi demonstrado que os sistemas tendem a manter o mesmo comportamento e aproximam-se de um valor fixo de força de atrito, a área de interesse de estudo

tornou-se o período de transição entre os regimes de acomodação e regime estável durante o desgaste. Deste modo, os ensaios foram feitos com apenas vinte minutos de duração, o que corresponde a uma distância percorrida de 100m contra mais de 3.000m nos ensaios anteriores. De acordo com mapas de desgaste para materiais cerâmicos similares, espera-se que estes novos valores de carga normal e velocidade induzam a um comportamento menos severo de desgaste (HUTCHINGS I.M., 1992), com taxas menores de desgaste, onde os mecanismos associados de deformação plástica e reações triboquímicas possam ser observados com mais facilidade, possibilitando verificar possíveis relações com a rugosidade do substrato de cada amostra.

As curvas comparativas dos testes feitos com menor e maior severidade podem ser vistas na Figura 5.71. Nesta figura, foi considerada apenas a escala de tempo até o tempo máximo de quatro minutos.

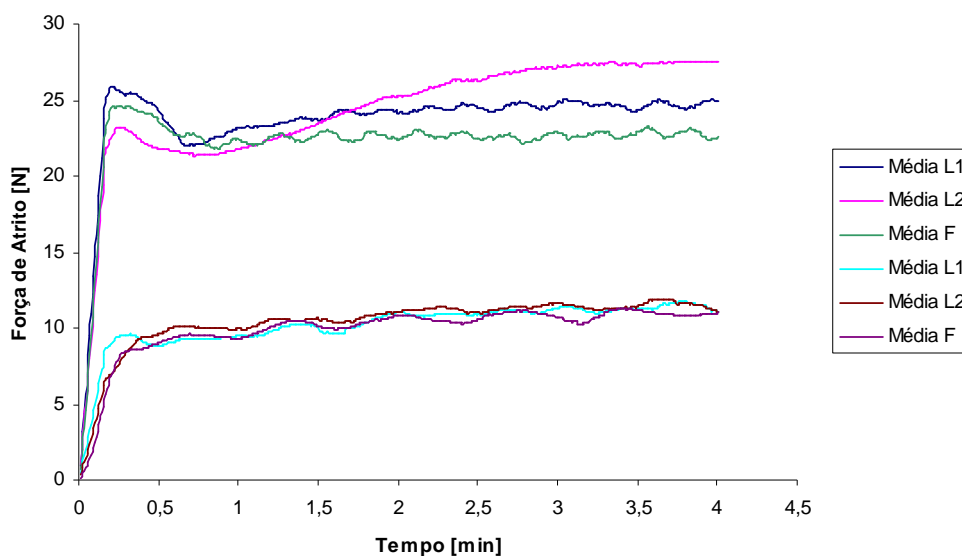


Figura 5.71 - Gráficos comparativos do comportamento da força de atrito por tempo para condições de ensaio com severidade maior e menor. Média entre os sistemas Polido (F), lixado (L1) e Lixado intermediário (L2).

O regime de desgaste severo logo após o *running-in*, presente nas curvas de força de atrito versus distancia de deslizamento, em testes de maior severidade, foi suprimido nos testes de menor severidade, indicando que os sistemas atingiram o regime permanente de forma mais suave. Como esperado, a taxa de crescimento da força de atrito diminuiu. Praticamente não há evidência de diferença de comportamento entre as curvas dos sistemas Polido e Lixado. O sistema Lixado L1 (mais lixado) parece ter uma taxa de crescimento da força de atrito ligeiramente superior aos demais. Este comportamento poder ser atribuído a presença das asperezas mais proeminentes do seu perfil de rugosidade.

Os resultados das imagens analisadas no MEV podem ser vistos na Figura 5.72. Nela são feitas comparações de imagens da trilha e partículas de desgaste dos sistemas com severidade maior e menor de ensaio. Através das imagens pode-se perceber que, como esperado, a trilha para as condições de ensaio mais severas encontra-se mais larga, com sinal natural de maior desgaste. As partículas de desgaste não apresentaram tanta heterogeneidade de tamanho para os ensaios com severidade menor. Percebe-se ainda a presença de partículas grandes, porém em menor quantidade, e em menor tamanho, indicando a presença de desgaste severo, porém em menor quantidade.

Menor Severidade



Imagem típica da região da trilha de desgaste analisada (SEI)

Maior Severidade

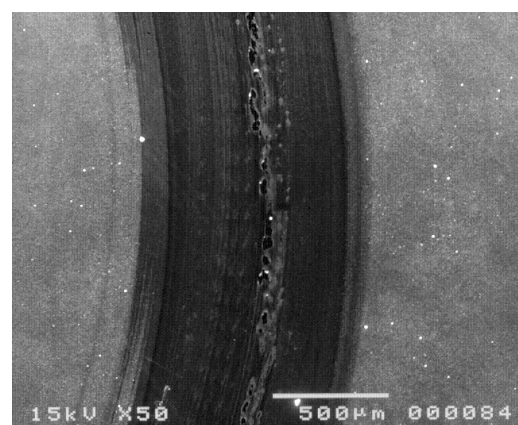


Imagem típica da região da trilha de desgaste analisada (SEI)

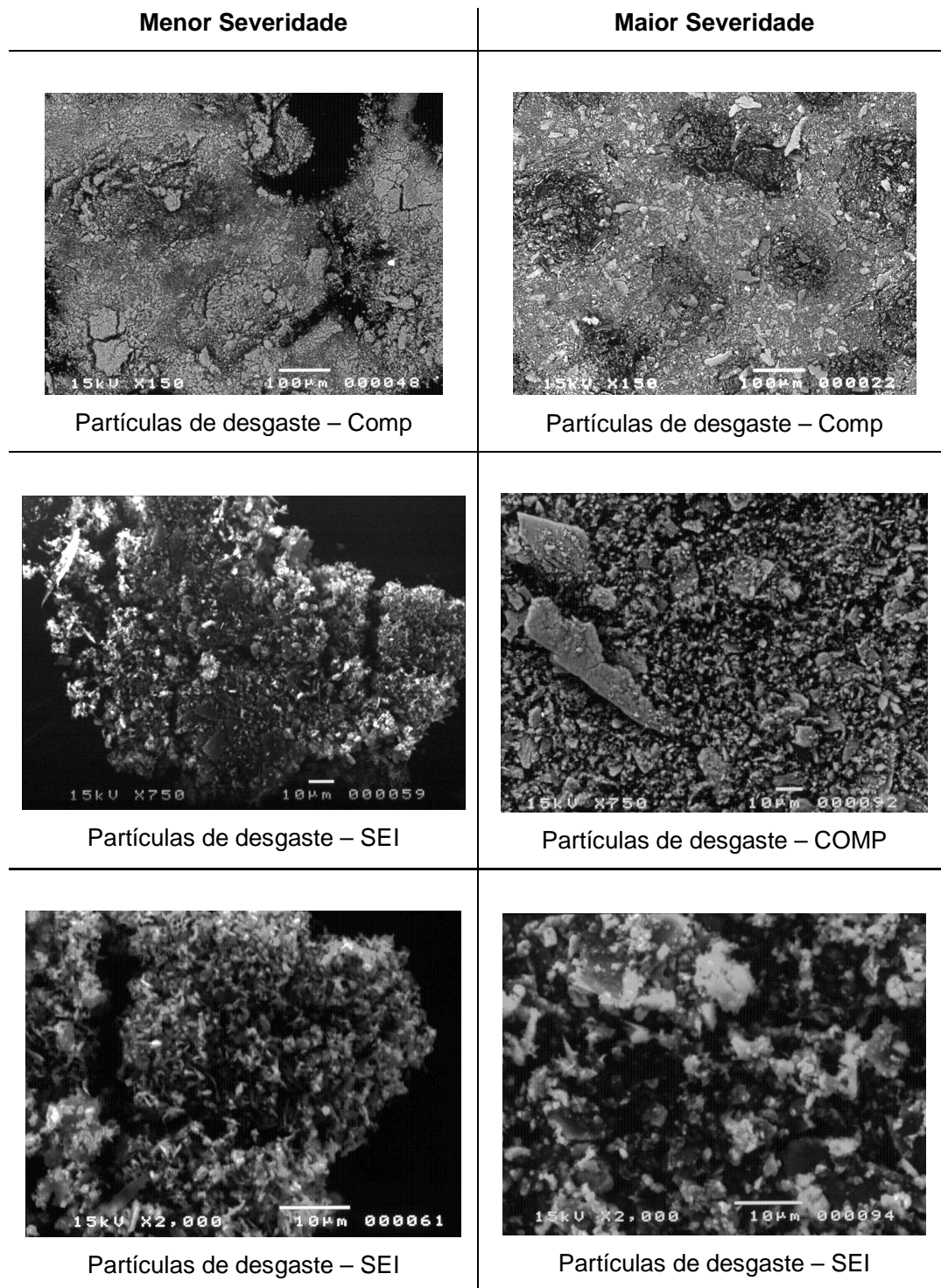


Figura 5.72 – Imagens comparativas de trilha e partículas de desgaste dos ensaios realizados com maior e menor severidade. Aumentos de 50, 150, 750 e 2000x

Também foram feitos mapeamentos de raios X para verificar e comparar a presença de elementos químicos na trilha de desgaste (Figura 5.73). Os resultados sugerem que houve menos transferência de material da esfera (silício) para a trilha nos ensaios com severidade menor. Do mesmo modo, para estes ensaios, a presença do alumínio na trilha mostra-se mais homogênea, indicando a formação de uma camada de óxido por toda a extensão da trilha, característica do regime moderado de desgaste. Para os demais elementos não foi observada diferença significativa entre os dois tipos de ensaio.

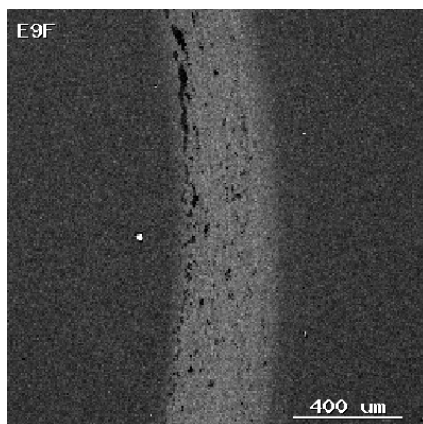
Menor Severidade

Imagem típica da região da trilha de desgaste analisada

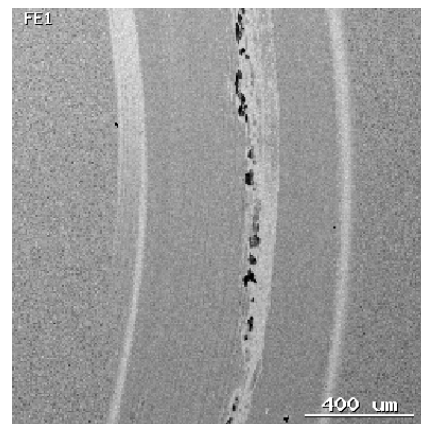
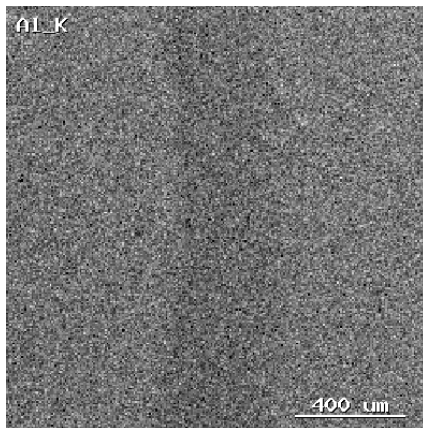
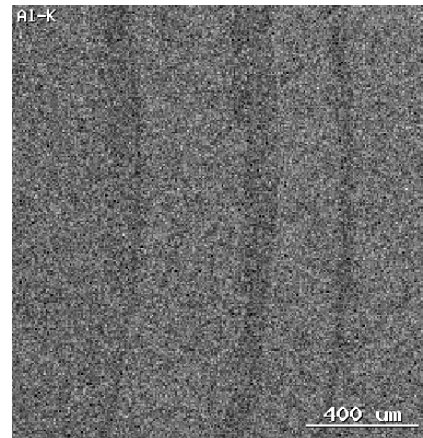
Maior Severidade

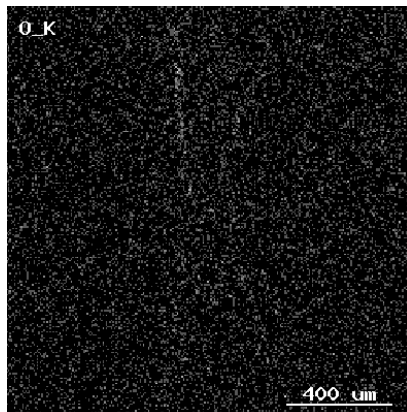
Imagem típica da região da trilha de desgaste analisada

Menor Severidade**Maior Severidade**

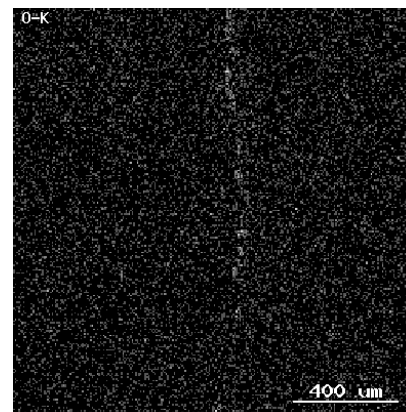
Presença de alumínio



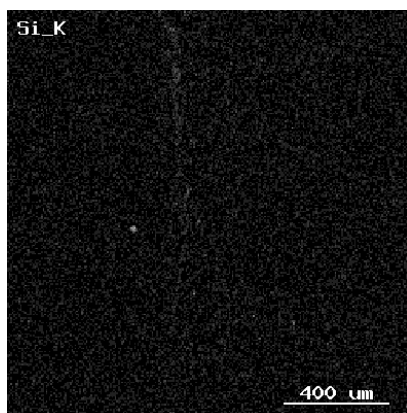
Presença de alumínio



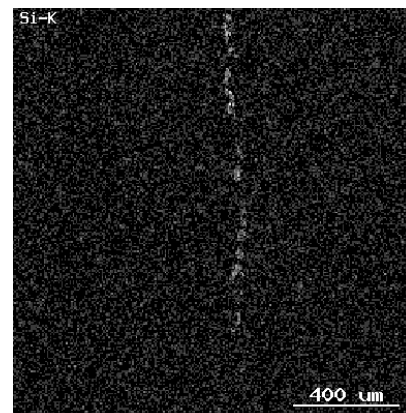
Presença de oxigênio



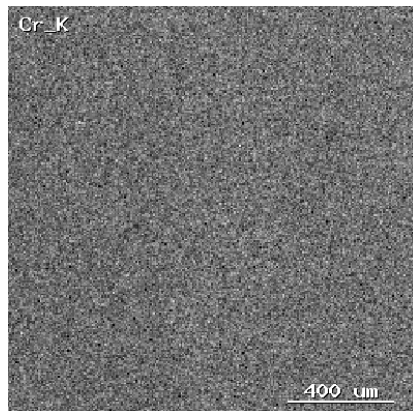
Presença de oxigênio



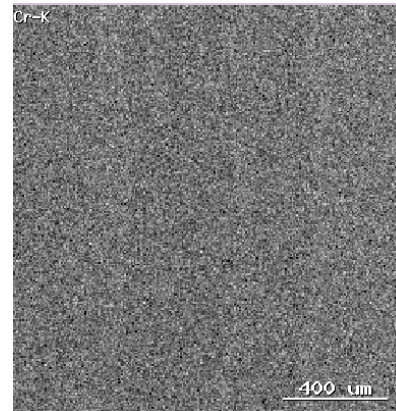
Presença de silício



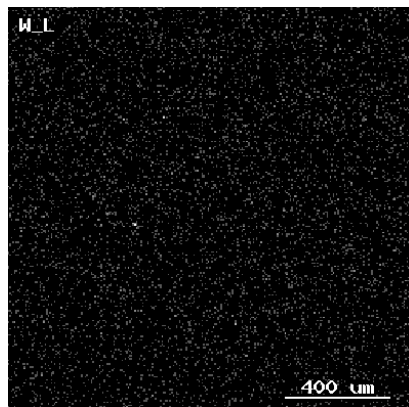
Presença de silício

Menor Severidade**Maior Severidade**

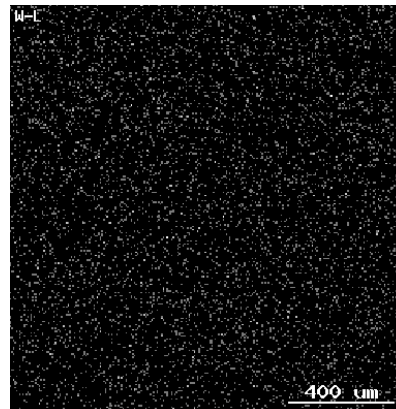
Presença de cromo



Presença de cromo



Presença de tungstênio



Presença de tungstênio

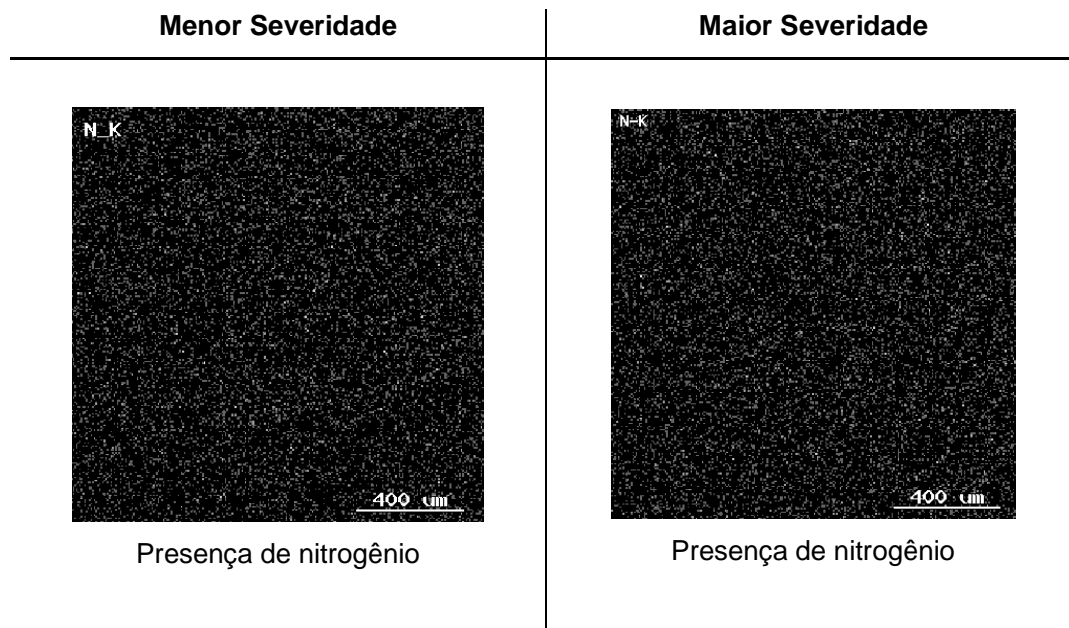


Figura 5.73 – Comparação entre ensaios de menor e maior severidade. Mapeamento de raios X para os elementos principais do corpo de prova e da esfera.

Os resultados de análise e quantificação de elementos químicos podem ser observados na Tabela V.15. No regime de menor severidade observa-se uma pequena queda do teor de alumínio na trilha de desgaste. Isto se deve provavelmente a presença do óxido de alumínio que possui um teor de alumínio menor que do recobrimento. A quantidade de alumínio, assim como a de oxigênio, aumentou nas partículas de desgaste analisadas para os ensaios com menor severidade, indicando a presença e óxidos em maior quantidade que nos ensaios mais severos. A presença de silício em menor quantidade na trilha corrobora com o mapeamento de raios X, sugerindo uma menor transferência de material da esfera para a trilha.

Tabela V.15 – Resultados de análise e quantificação de elementos químicos presentes no ensaio de deslizamento esfera sobre disco com menor severidade. (a) interior da trilha (b) partículas de desgaste (c) superfície desgastada da esfera.

Análises gerais em percentual atômico

Interior Trilha				
Ele.	F [% atômico]		L1 [% atômico]	L2 [% atômico]
	E6	E9	E8	E8
N	8,57	1,99	0	0
O	3,22	4,27	3,71	4,28
Al	36,27	37,91	38,74	39,5
Si	1,27	1,15	1,86	1,67
Cr	50,28	54,04	55,21	54,12
Co	0,09	0,22	0,23	0,01
W	0,31	0,42	0,24	0,41
Total	100	100	100	100

(a)

Partículas de Desgaste				
Ele.	F [% atômico]		L1 [% atômico]	L2 [% atômico]
	E6	E9	E8	E8
N	0	0	0	7,38
O	46,08	44,22	44,1	43,38
Al	12,63	14,12	14,17	11,68
Si	26	22,92	20,45	22,9
Cr	15,21	18,74	21,16	14,25
Co	0,09	0	0,13	0,25
W	0	0	0	0,14
Total	100	100	100	100

(b)

Esfera				
Ele.	F [% atômico]		L1 [% atômico]	L2 [% atômico]
	E6	E9	E8	E8
N	33,2	23,25	0	25,68
O	2,98	0	0	10,18
Al	1,99	5,17	5,33	2
Si	60,45	63,68	86,59	60,88
Cr	1,37	7,54	7,91	1,21
Co	0,02	0,02	0,17	0,03
W	0	0,34	0	0,03
Total	100	100	100	100

(c)

Os resultados de análise química, mapeamento de raios X e análise das imagens de microscópio eletrônico de varredura mostram uma presença mais marcante do mecanismo moderado de desgaste em relação aos ensaios com maior severidade. A diminuição da rotação e da carga nominal parecem ter favorecido a formação de óxidos em detrimento ao arrancamento de material do filme de recobrimento por fratura frágil. O pico de valor máximo de força de atrito foi suprimido e a taxa de crescimento diminuiu. No entanto, as oscilações da força de atrito continuaram existindo, mesmo que com uma amplitude menor que nos ensaios com severidade maior. Estas oscilações foram evidentes durante inclusive o regime permanente, indicando que os vários mecanismos coexistiram na tentativa de um sobrepor o outro. O cálculo das taxas de desgaste para os sistemas nas condições menos severas de ensaio foi feito (Tabela V.15). Percebe-se que o coeficiente de desgaste dimensional aumentou em relação aos ensaios em condições mais severas, apesar do volume desgastado ter sido menor. Este fato sugere as mais altas taxas de desgaste ocorrem no começo do ensaio de desgaste por deslizamento. Mesmo os testes sendo realizados com menos severidade, os mecanismos severos de desgaste, refletidos nas altas taxas de crescimento da força de atrito, parecem comandar a taxa de retirada de material. A medida que ocorre a transição do regime severo para o regime moderado e os efeitos triboquímicos da oxidação começam a aumentar, o desgaste fica mais brando.

Através da Tabela V.16 é possível também observar que o sistema Polido manteve a tendência de ter taxa de desgaste mais elevada que os demais sistemas. Para o cálculo, foram levados em consideração os volumes de desgaste somente da esfera. A diferença novamente da ordem de 20% mostra coerência com a hipótese de maior adesão entre as asperezas devido a presença do perfil do tipo platô com alta densidade de picos por área superficial.

Tabela V.16 – Cálculo do coeficiente dimensional de desgaste da esfera para os três sistemas estudados. Ensaio realizado em condições menos severas.

Sistemas	W Carga Aplicada [N]	S Distância Percorrida [m]	V Volume Desgastado [mm ³]	Q Taxa de Desgaste [mm ³ /m]	k Coeficiente de Desgaste Dimensional [x10 ⁻⁶ mm ³ /Nm]
Polido (F)	15	300	0,91	0,003020	2,013
Lixado (L1)	15	300	0,66	0,002183	1,456
Lixado (L2)	15	300	0,745	0,002483	1,656

5.3 – Desgaste por Microabrasão

Os resultados dos ensaios de microabrasão podem ser observados nas figuras abaixo. A Figura 5.74 mostra o resultado em termos das médias de volume total desgastado. Nota-se que os sistemas recobertos desgastaram de 2,5 a 3 vezes menos que os sistemas sem recobrimento. Este resultado corrobora com o fato de que o recobrimento de CrAIN tem papel importante no aumento da resistência ao desgaste do substrato de metal duro WC-Co. No mesmo gráfico, percebe-se também que há pouca diferença entre as médias dos valores de volume desgastado para os sistemas F, L1 e L2 recobertos. A Figura 5.75 mostra estes valores de forma ampliada.

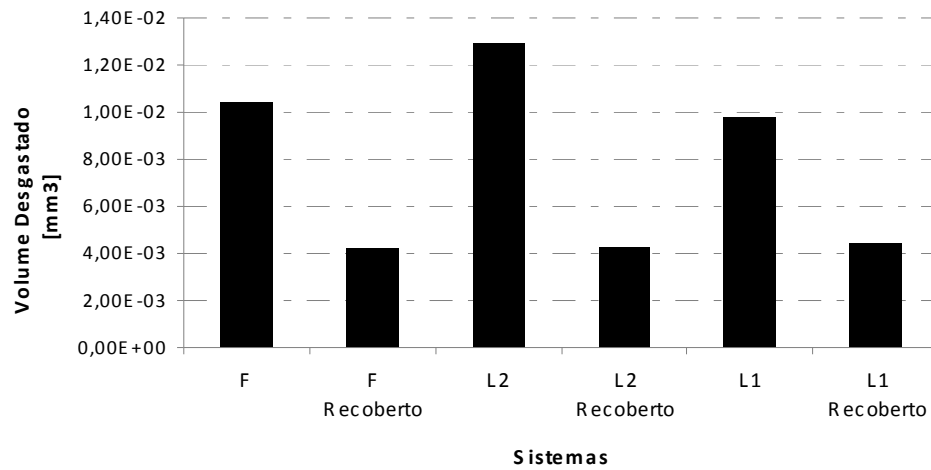


Figura 5.74 – Média de volume total desgastado por microabrasão para cada sistema

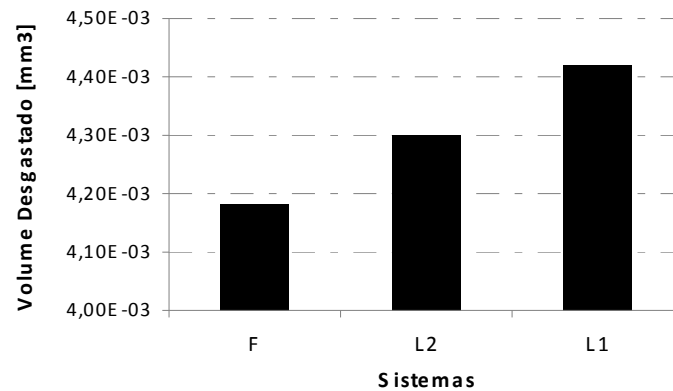


Figura 5.75 – Média de volume total desgastado por microabrasão para sistemas recobertos

Ao se aplicar o teste de hipótese *t-student* nos dados de origem da Figura 5.74, chega-se a conclusão que os valores de volume desgastado são equivalentes entre si.

Quando o mesmo teste estatístico *t-student* é aplicado para os sistemas sem recobrimento, não se encontra evidências de que a média dos valores de volume

desgastado calculadas para os sistemas F – L1, com intervalo de confiança de 95%, sejam diferentes. No entanto, o mesmo não ocorre para os sistemas F – L2 e L1 – L2 quando comparados entre si. Significa dizer que há evidências de que os mesmos, com intervalo de confiança de 95%, apresentam valores diferentes entre si. Deste modo, percebe-se que a rugosidade superficial influenciou os resultados de desgaste por microabrasão para sistemas antes do recobrimento.

Os testes de desgaste por microabrasão também foram utilizados para obter informações sobre a espessura de camada depositada. Todos os sistemas foram analisados e nenhum deles apresentou espessura de camada inferior a $2,5\mu\text{m}$. As espessuras médias de cada sistema variaram de $2,7$ a $3,5\mu\text{m}$ (ver Figura 5.76).

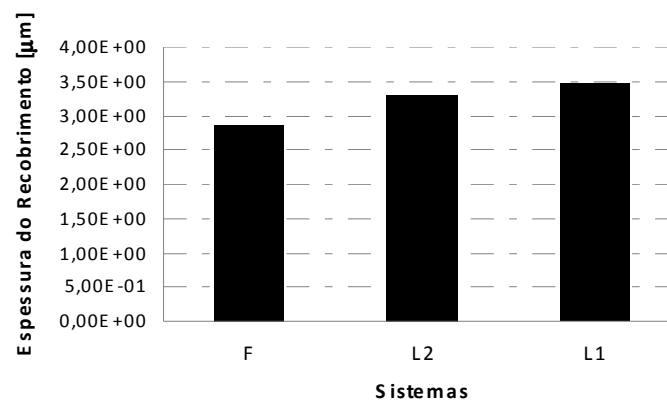


Figura 5.76 - Espessura média do recobrimento para cada sistema

Os ensaios de microabrasão mostraram que as diferenças de perfil de rugosidade do substrato, para as condições de ensaio de microabrasão, não influenciaram nos valores de desgaste.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

Os estudos e resultados dos testes de desgaste por deslizamento pino sobre disco em amostras de metal duro com diferentes perfis de rugosidade recobertas por PAPVD com filme fino de CrAIN nos levam as seguintes principais conclusões:

- o cálculo da taxa de desgaste e dos volumes desgastados da esfera indicam que a diferença de perfil de rugosidade do substrato de metal duro é importante e deve ser levada em consideração em análises de desempenho do conjugado de CrAIN em relação ao desgaste por deslizamento. Sistemas com perfil onde a rugosidade S_a foi menor apresentaram maior taxa de desgaste na esfera, tanto para condições mais severas quanto para condições mais brandas de ensaio;

- sistemas com perfil de rugosidade menor apresentaram indícios de regime severo de desgaste. Perfil do tipo platô com alta densidade de picos por área superficial induzem um maior contato superficial, com maior quantidade de adesão entre as asperezas, levando ao desgaste adesivo com arrancamento de material por fratura frágil;

- o processo de desgaste é um processo tribológico envolvendo oxidação. Filmes de CrAIN formam, durante o desgaste, uma camada de óxido que eventualmente comanda o regime de desgaste moderado do sistema;

- a expulsão das partículas de desgaste da trilha exerce papel importante na condução do regime severo de desgaste. Um mecanismo de expulsão eficiente minimiza a interação entre de partículas duras livres e o corpo e contracorpo do ensaio. A presença de partículas na trilha de desgaste durante o teste induzem ao desgaste abrasivo do corpo de prova;

- análises da influência da rugosidade tanto no desempenho ao desgaste quanto em superfícies antes e após deposição de camada de recobrimento deve ser feita a luz de uma avaliação de todos os parâmetros do perfil. Análise puntual de um único parâmetro pode induzir a conclusões equivocadas quanto a capacidade de resistir ao desgaste ou a modificações superficiais após recobrimento.

CAPÍTULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- realizar ensaios de desgaste por deslizamento na configuração pino sobre disco com interrupções para análise do comportamento e das mudanças de mecanismos severos e moderados atuantes. A cada interrupção, faz análises completas do sistema, como análise química de partículas, análise visual de trilhas e esfera e cálculo do coeficiente de desgaste. A taxa de desgaste nos períodos de *running in* e permanente deverá ser calculada para posterior análise e comparação. Ensaios interrompidos também podem fornecer a oportunidade de se evidenciar a influência das partículas nos mecanismos de desgaste. Variações de ensaios com retirada de partículas ao longo do tempo são uma oportunidade para estudar se a severidade, neste caso, é muito afetada.

- realizar os mesmos ensaios, porém, variando a relação de dureza entre a esfera e o corpo de prova, de modo a verificar a tendência de continuidade de regime severo de desgaste mesmo após o *running in*. Esta tendência foi observada para aços na literatura e poderá ajudar a explicar o comportamento das curvas de força de atrito para o par tribológico CrAlN e Si₃N₄.

- realizar ensaios com perfis de rugosidade diferente dos caracterizados neste trabalho. Verificar se para perfis de um tipo diferente do platô os efeitos da triboquímica serão afetados mais intensamente pela adesão de material.

- produzir amostras com perfis (parâmetros) de rugosidade com grande diferença para posterior recobrimento e repetição dos ensaios propostos neste trabalho.

- verificar a influência da rugosidade superficial do substrato em amostras de metal duro recobertas por CrAlN para desgaste por microabrasão.

- verificar a influência da rugosidade superficial do substrato em recobrimento para outros tipos de pares tribológicos.

- realizar testes experimentais de desempenho de ferramentas de metal duro recobertas com CrAlN com diferentes rugosidades superficiais do substrato.

BIBLIOGRAFIA

ABRÃO A. M. *et al.* *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 1.ed., São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 2009. 371p.

AGOSTINHO O. L. *et al.* *Princípios de Engenharia de Fabricação Mecânica – Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análises de Dimensões*. 1.ed., São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 1997. 295p.

ARSECULARATNE J. A. On Prediction of Tool Life and Tool Deformation Conditions in Machining with Restricted Contact Tools, *Machine Tools and Manufacture*, v.43, p657-669, 2003.

AREZOO B. *et al.* Selection of Cutting Tools and Conditions of Machining Operations Using an Expert System, *Computers in Industry*, v.42, p43-58, 2000.

ASTAKHOV V. P. The Assessment of Cutting Tool Wear, *Machine Tools and Manufacture*, v.44, p637-647, 2004.

ÁVILA, R. F.O; *Desempenho de Revestimentos de TiN, TiCN e TiAlN no Torneamento do Aço ABNT 4340 Temperado*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2003. 143p (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

BASNYAT P. *et al.* Mechanical and Tribological Properties of CrAlN-Ag Self-lubricating Films, *Surface and Coatings Technology*, v.202, p1001-1016, 2007.

BASTI A. *et al.* Tools with Built-in Thin Film Thermocouple Sensor for Monitoring Cutting Temperature, *Machine Tools and Manufacture*, v.47, p793-798, 2007.

BAYER R. G.; *Wear Testing, Mechanical Testing*. Metals Handbook 9 ed., v.8, ASM International, 1985. p601-608.

BAYER R. G.; *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. 2.ed., New York: Marcel Dekker Inc., 2004. 379p.

- BENNANNI H.; TAKADOUM J. Finite Element Model of Elastic Stresses in Thin Coating Submitted to Applied Forces, *Surface and Coatings Technology*, v.111, p80-85, 1999.
- BEAUME F.D. *et al.*; Oxidation Modeling of a Si₃N₄-TiN Ceramic: Microstructure and Kinetic Laws, *Ceramics International*, v.33, p1331-1339, 2007.
- BERNANDOS P. G. *et al* Predicting Surface Roughness in Machining: a Review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.43, p833-844, 2003.
- BLAU P. Mechanisms for Transactional Friction and Wear Behavior of Sliding Metals. *Wear*, v.72, p55-66, 1981.
- BLAU P. The Significance and Use of the Friction Coefficient. *Tribology International*, v.34, p585-591, 2001.
- BLUNT L., EBDON S, The Application of Three Dimensional Surface Measurement Techniques to Characterizing Grinding Wheel Topography, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 36, p.1207-1226, 1996
- BOUZAKIS *et al* Fatigue Failure Mechanisms of Multi and Monolayer Physically Vapour-Deposited Coatings in Ininterrupted Cutting Processes, *Surface and Coatings Technology*, v.108-109, p526-534, 1998.
- BRESSAN J. D.; *Tribologia Aplicada*. 1.ed., São Paulo: Cursos ABM, 2007. 291p.
- BRIZUELA M. *et al.* Magnetron Sputtering of Cr(Al)N Coatings: Mechanical and Tribological Study, *Surface and Coatings Technology*, v.200, p192-197, 2005.
- BUNSHAH R. F. Summary, Developments, and Outlook. In: BUNSHAH R. F. *Handbook of Hard Coatings*; Deposition Technologies, Properties and Applications. 1.ed. New Jersey: Noyes Publications, 2001. cap 10, p517-p533.

BUNSHAH R. F. Vapour Deposition Technologies. In: BUNSHAH R. F. *Handbook of Hard Coatings; Deposition Technologies, Properties and Applications*. 1.ed. New Jersey: Noyes Publications, 2001. cap 2, p44-p57.

BULL R. F; RICKERBY S.. Characterization of Hard Coatings. In: BUNSHAH R. F. *Handbook of Hard Coatings; Deposition Technologies, Properties and Applications*. 1.ed. New Jersey: Noyes Publications, 2001. cap 5, p181-p228.

BURAKOWSKI T.; WIERZSHON T.; *Surface Engineering of Metals*, Principles, Equipments, Technologies. 1.ed., Florida: CRC Press, 1999. 592p.

BYRNE G. *et al.* Advancing Cutting Technology, *CIRP Annals*, v.52, Issue2, p483-507, 2003.

BYRNE G. *et al.* Tools Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application, *CIRP Annals*, v.44, Issue2, 1995.

CALDEIRA M. M. C.; Usinagem de Materiais Endurecidos, *Revista Metal Mecânica*, p148-153, agosto,2005.

CASTEJON M. *et al* On-line Tool Wear Monitoring Using Geometric Descriptors fro Digital Images, *Machine Tools and Manufacture*, v.47, p1847-1853, 2007.

CHEN L. *et al.* A Comparative Research on Physical nad Mechanical Properties of (Ti, Al)N and (Cr, Al)N PVD Coatings with High Al Content, *Refractory Metals and Hard Materials*, v.25, p400-404, 2007

CHILDS T. *et al; Metal Machining: Theory and Applications*. 1.ed., Londres: Arnold, 2000. 408p.

CHIFFRE L. de *et al* Quantitative Characterisation of Surface Texture, *CIRP Annals*, v.49, Issue2, p635-642, 2000.

CHOUDHURY S. K. *et al* Role of Temperature and Surface Finish in Predicting Tool Wear Using Neural Network and Design of Experiments, *Machine Tools and Manufacture*, v.43, p747-753, 2003.

CHOW J.G.; WRIGHT P.K; On line Estimation of Tool Chip Interface Temperatures for a Turning Operation, *ASME*, 110, 1998.

CIULLI E. *et al* Rough Contacts Between Actual Engineering Surfaces – Part I. Simples Models for Roughness Description, *Wear*, v.264, p.1105-1115, 2007.

CUNHA E. A.; RIBEIRO M. V.; MOREIRA M. R. V.; OKIMURA H.; Influência do Avanço na Variação da Rugosidade do Alumínio, *Revista Metal Mecânica*, p40-52, junho,2005.

CUNHA L.; ANDRITSCHKY M. Residual Stress, Surface Defects and Corrosion Resistance of CrN Hard Coatings; *Surface and Coatings Technology*, v.111; p158-162, 1999.

DIMLA E.; DIMLA Snr. Sensor Signals for Tool-Wear Monitoring in Metal Cutting Operations – a Review of Methods, *Machine Tools and Manufacture*, v.40, p1073-1098, 2000.

DONG W. P. *et al* Topographic Features of Cylinder iners – na Application of Three Dimensional Characterization Techniques, v.28, p.453-463, 1995.

EZURA H. *et al*. Micro-hardness, Microstructures and Thermal Stability of (Ti, Cr, Al, Si)N Films Deposited by Cathodic Arc Method, *Surface Engineering, Surface Instrumentation and Vacuum Technology*, v.82, p476-481, 2008.

EZUGWU, E. O.; Evaluation of Cermet Cutting Tool Materials When Machining G-17 Cast Iron, *Lubrication Engineering* p49-55, 1993.

FALLBÖHMER P. *et al* Survey of the Die and Mold Manufacturing Industry, *Journal of Materials Processing Technology*, v.59, p158-168, 1996.

FUENTES G. G. *et al* Recent Advances in the Chromium Nitride PVD Process for Forming and Machining Surface Protection, *Journal of Materials Processing Technology*, v.167, p415-421, 2005.

GODFREY D. Friction Oscillations with a Pin-on Disc Tribometer, *Tribology International*, v.28, p119-126, 1995.

GONG W. *et al*. An Active Method of Monitoring Tool Wear States by Impact Diagnostic Excitation, *Machine Tools and Manufacture*, v.44, p847-854, 2004.

GÖKKAYA H; NALBANT M., The Effects of Cutting Tool Geometry and Process Parameters on the Surface Roughness of AISI 1030 Steel, *Materials and Design*, v.28, p717-721, 2007.

GRZESIK W.; NIESLONY P. Physics Based Modeling of Interface Temperatures in Machining with Multilayer Coated Tools at Moderate Cutting Speeds, *Machine Tools and Manufacture*, v.44, p889-901, 2004.

GUICCIARDI S *et al* On Data Dispersion in Pin on Disc Wear Test, *Wear*, v.252, p1001-1006, 2002.

HANADA H. *et al* Sophisticated Filtration Technique for 3D Surface Topography Data of Rectangular Area, *Wear*, v.264, p.422-427, 2007.

HARLIN P. *et al* Influence of Surface Roughness of PVD Coatings on Tribological Performance in Sliding Coatings, *Surface and Coatings Technology*, v.201; p4253-4259, 2006.

HASEGAWA, H. *et al*, Effects of Al Contents on Microstructures of Cr_{1-x}Al_xN and Zr_{1-x}Al_xN Films Synthesized by Cathode Arc Method, *Surface and Coatings Technology*, 2004.

HASEGAWA H. *et al* Characterization of Quaternary (Cr, Al)N-Based Films Synthesized by the Cathode Arc Method, *Surface and Coatings Technology*, v.202; p786-789, 2007.

HEGADEKATTE V. *et al* Modeling and Simulation of Wear in a Pin on Disc Tribometer, *Tribology Letters*, v.24; p51-60, 2006.

HEINKE,W; LEYLAND,A; MATTHEWS,A; BERG,G; FRIEDRICH,C; BROSZEIT,E. Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests, *Thin Solid Films*. Germany, v.270, p.431-438, 1995.

HUANG S. N. *et al* Tool Wear Detection and Fault Diagnosis Based on Cutting Force Monitoring, *Machine Tools and Manufacture*, v.47, p444-451, 2007.

HUTCHINGS I. M. *Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials*. 1.ed., Londres: St Edmundsbury Press Ltd, 1992. 272p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. ISO 3685; Tool life: testing with single point turning tools, 1977.

JAMES A.S.*et al* The Role and Impacts of Surface Engineering in Environmental Deisgn, *Materials and Design*, v.26, p594-601, 2005.

JEHN H. A. PVD and ECD – Competition, Alternative or Combination?, *Surface and Coating Technology*, v.112, p210-216, 1999.

KALSS W. *et al* Modern Coating in High Performance Cutting Applications, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v.24, p399s-404s, 2006.

KWON Y. ; FISCHER G. W. A Novel Approach to Quantifying Tool Wear and Tool Life Measurements for Optical Tool Management, *Machine Tools and Manufacture*, v.43, p359-368, 2003.

KOPAC J. Influence of Cutting Material and Coating on Tool Quality and Tool Life, *Journal of Materials Processing Technology*, v.78, p95-103, 1998.

KOPAC J. *et al* Tribology of Coated Tools in Conventional and HSR Machining, *Machine Tools and Manufacture*, v.118, p377-384, 2001.

LACKNER J.M. *et al*; Room Temperature Deposition of (Ti,Al)N and (Ti,Al)(C,N) Coatings by Pulsed Laser Deposition for Tribological Applications, *Surface and Coatings Technology*, v.177-178, p447-452, 2004

LAS CASAS E. B. *et al* Enamel Wear and Surface Roughness Characterization Using 3D Profilometry, *Tribology International* , v.41, p.1232-1236, 2008.

LEACH R. Some Issues of Traceability in the Field of Surface Topography Measurement, *Wear*, v.257, p.1246-1249, 2004.

LI X. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring During Turning, *Machine Tools and Manufacture*, v.42, p157-165, 2002.

LIM C. Y. H. *et al* The Effects of Work Material on Tool Wear, *Wear*, v.250, p344-348, 2001.

LIM G. H. Tool Wear Monitoring in Machine Turning, *Journal of Materials Processing Technology*, v.51, p25-36, 1995.

LIN J. L. *et al*; Wear Progressions and Tool Life Enhancement with AlCrN Coated Inserts in High-Speed Dry and Wet Steel Lathing, *Wear*, 2007.

LONARDO P. M. de *et al* Emerging Trends in Surface Metrology, *CIRP Annals*, v.51, Issue2, p701-723, 2002.

LUDEMA K. C. *Friction, Wear, Lubrication – A Textbook in Tribology*. 1.ed., New York: CRC Press, 1996. 263p.

LUGSCHEIDER E. *et al* Investigations of Mechanical and Tribological Properties of CrAlN+C Thin Coatings deposited on Cutting Tools, *Surface and Coatings Technology*, v.174-175, p681-686, 2003.

LIU C. *et al*; An AC Impedance Study on PVD CrN-Coated Mild Steel With Different Surface Roughnesses, *Surface and Coatings Technology*, v.76-77, p623-631, 1995.

MA Y.P. *et al* Deposition and Characterization of Nanocrystalline Diamond Films on Co-Cemented Tungsten Carbide Insert, *Diamond and Related Materials*, v.16, p481-485, 2006

MACHADO A. R.; Domar Cavacos: Tarefa Difícil!, *Revista O Mundo da Usinagem*, novembro, 2007.

MAKINO Y. *et al*. Synthesis of Pseudobinary Cr-Al-N Films with B1 Structure by rf-Assisted Magnetron Sputtering Method, *Surface and Coatings Technology*, v.98, p1008-1012, 1998.

MANCOSU, R.D., *Desenvolvimento de Conjugados Monocamada e Duplex Cr -N Processados por Ion Plating e Resistentes à Cavitação*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. (Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

MASSEREAU V. G.; MACHET J. Study and Improvement of the Adhesion of Chromium Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering, *Thin Solid Films*, v.258, p185-193, 1995.

MEIER G. *et al* Influence of Different Parameters on the Functional Behaviour of Tools and Parts after Coating, *Surface and Coatings Technology*, v.82, p294-304, 1996.

MELO A. C. A. *et al* Desgastes e Avarias em Ferramentas de Metal Duro, *Revista Metal Mecânica*, p118-155, dezembro,2005.

MESQUITA N. G. M.; BATISTA A. J., Novas Equações para Calcular os Custos de Torneamento, *Revista Metal Mecânica*, p80-107, outubro,2007.

MILLS B. Recent Developments in Cutting Tool Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, v.56, p16s-23s, 1996.

MO J. L. e ZHU M.H. Tribological Oxidation Behaviour of PVD Hard Coatings, *Tribology International*, v.42, p1758-1764, 2009.

MUMMERY L., *Surface Texture Analysis – The Handbook*. 1.ed., Mühlhausen, Schnur Druck, 1992. 105p.

MUNEMASA J; KUMAKIRI T. Effect of the Surface Roughness on the Corrosion Properties of Films Coated by Physical Vapour Deposition, *Surface and Coatings Technology*, v.49, p496-499, 1991.

NAIR, R.P., *et al*, The Use of Pin on Disc Tribology Test Method to Study Three Unique Industrial Applications, *Wear* , v.267, p.823-827, 2009.

NOVASKI O. *Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica*. 1.ed., São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 1994. 119p.

NGUYEN A. T., BUTLER D. L. Correlation of Grinding Wheel Topography and Grinding Performance: A Study from a Viewpoint of Three Dimensional Surface Characterisation, *Journal of Material Processing Technology* , v.208, p.14-23, 2008.

OHLSSON R. *et al* The Accuracy of Fast 3D Topography Measurements, *Machine Tools and Manufacture*, v.41, P.1899-1907, 2001.

OHRING M. *The Material Science of Thin Films*, 1.ed. San Diego: Academic Press,1992. 742p.

OLLENDORF H.; SCHNEIDER D. A Comparative Study of Adhesion Test Methods for Hard Coatings, *Surface and Coatings Technology*, v.113, p86-102, 1999.

ORABY S. E.; HAYHURST D. R. .Tool Life Determination Based on the Measurement of Wear and Tool Force Ration Variation, *Machine Tools and Manufacture*, v.44, p1261-1269, 2004.

OZEL T.; KARPAT Y. Predictive Modeling of Surface Roughness and Tool Wear in Hard Turning Using Regression and Neural Network, *Machine Tools and Manufacture*, v.45, p467-479, 2005.

PARK W. *et al* Microstructures, mechanical properties and tribological behaviors of Cr-Al-N, Cr-Si-N and Cr-Al-Si-N coatings by a hybrid coating system, *Surface and Coatings Technology*, v.201, p5223-5227, 2006.

PFEIFER T. *et al* A New Speckle-Interferometric Approach to Measure the 3D-Shape of Discontinuous Free Form Surfaces, *CIRP Annals*, v.46, Issue1, p501-504, 1997.

PFEISTORF M. *et al* Three Dimensional Characterization of Surfaces for Sheet Metal Forming, *Wear*. V.216, p.244-250, 1998

PFLÜGER E. *et al* Influence of Incorporation of Cr and Y on the Wear Performance of TiAlN Coating at Elevated Temperatures, *Surface and Coatings Technology*, v.115, p17-23, 1999.

PODGORNIK B. *et al* Influence of Surface Roughness and Coating Type on the Galling Properties of Coated Forming Tool Steel, *Surface and Coatings Technology*, v.184, p338-348, 2004.

PRIETO I. G. *et al* The Influence of Spicemen Misalignment on Wear in Conforming Pin on Disk Tests, *Wear*, v.257, p157-166, 2004.

PULUGURTHA S. R. *et al*. Mechanical and Tribological Properties of Compositionally Graded CrAlN Films Deposited by AC Reactive Magnetron Sputtering, *Surface and Coatings Technology*, v.202, p1160-1166, 2007.

PULUGURTHA S. R. *et al* Effects of Substrate Orientation on Film Properties Using AC Reactive Magnetron Sputtering, *Surface and Coatings Technology*, v.202, p755-761, 2007.

RABINOWICZ E. *Friction and Wear of Materials*. 2.ed., New York: John Wiley & Sons Inc., 1995. 315p.

ROSEN B.G., *et al*, Wear of Cylinder Bore Microtopography, *Wear*, v.198, p271-279, 1996.

ROSSI G. C.; BATALHA G. F.; KANENOBU A. A.; Relação entre Parâmetros de Corte e Rugosidade da Superfície Usinada, *Revista Metal Mecânica*, p156-163, agosto,2005.

RUFF A. W. *et al.* Characterization of Wear Surfaces and Wear Debris. In: ASM Materials Science Seminar, 1980, Pittsburgh. *Fundamentals of Friction and Wear of Materials*. Ohio: American Society for Metals, 1981. 235-290.

SALGADO D. R.; ALONSO F. J. An Approach Based on Current and Sound Signal for in-process Tool Wear Monitoring, *Machine Tools and Manufacture*, v.47, p2140-2152, 2007.

SCHEERER H. *et al.* Effects of Chromium to Aluminium Content on the Tribology in Dry Machining Using (Cr, Al)N Coated Tools, *Surface and Coatings Technology*, v.200, p203-207, 2005.

SCHEFFER C. *et al* Development of a Tool Wear Monitoring System for Hard Turning, *Machine Tools and Manufacture*, v.43, p973-985, 2003.

SHABTAY D.; KASPI M., Optimization of the Machining Economics Problem under the Failure Replacement Strategy, *International Journal of Production Economics*, v.80, p213-230, 2002.

SHAW, M.C. *Metal Cutting Principles*, Oxford University Press, ISBN 0-19-859002-4, 1984, 594 p.

SILVA M. B; WALLBANK J.; Cutting Temperature: Prediction and Measurement Methods – a Review, *Journal of Materials Processing Technology*, v.88, p195-202, 1999.

SO H. Characteristics of Wear Results Tested by Pin on Disc at Moderate to High Speeds., *Tribology International*, v.29, p415-423, 1996.

SOKOVIS M.; NAVINSEK B.; *Improvement of Cermet Tool Quality by TiN (PVD) Coating*, Proc. Int. Conf. Advances in Materials and Process Technologies, AMPT'93, Dublin City University, Dublin, Ireland, v.1, 1993, 443p.

SORO J.M *et al* Influence of Substrate Roughness and Lateral Spacing in Morfology and Brittleness of Different Cr-C PVD Coatings, *Surface and Coatings Technology*, v.98, p1490-1496 1998.

SPAIN E. *et al*. Characterization and Applications of Cr-Al_N Coatings, *Surface and Coatings Technology*, v.200, p1507-1513, 2005.

STACHOVIK, G.W.; PODSIADLO P. Classification of Tribological Surfaces, *Tribology International*, v.37, p.211-217, 2004

STOETERAU R. L. *Tribologia - Apostila da Universidade Federal de Santa Catarina-Centro Tecnológico – Departamento de Engenharia Mecânica*, 2004

STOLARSKI T. A. *Tribology in Machine Design*. 1.ed., Oxford: Plant a Tree, 1990. 299p.

STOUT K. J., BLUNT L. A. Application of 3D Topography to Bio-Engineering, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, v.35, p.219-229, 1995.

STOUT K. J., BLUNT L. *Three Dimensional Surface Topography*. 2.ed., Londres: Penton Press, 1994. 285p.

SUN Y. *et al*, Finite Element Analisis of Plastic Deformation of Variuos TiN Coating/Substrate Systems under Formal Contact ith Rigid Sphere, *Thin Solid Films*, v.271, p122-131, 1995.

SUTTER G.; RANC N. Temperature Fields in a Chip During High-Speed Orthogonal Cutting – An Experimental Investigation, *Machine Tools and Manufacture*, v.47, p1507-1517, 2007.

TAKADOUM J; BENNANI H. H. Influence of Substrate Roughness and Coating Thickness on Adhesion, Friction and wear of TiN Films, *Surface and Coatings Technology*, v.96, p272-282, 1997.

TRENT, E.M. *Metal Cutting*, 2nd Edition. Butterworths, ISBN 0-408-10856, 1984, 245p.

VETTER J. *et al.*(Cr:Al)N Coatings Deposited by the Cathodic Vacuum Arc Evaporation, *Surface and Coatings Technology*, v.98, p1233-1239, 1998.

VIÁFARA, C.C., *Transição no Regime de Desgaste por Deslizamento dos Aços: uma abordagem termodinâmica*. São Paulo: Politécnica Universidade de São Paulo, 2010. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica).

WEISS H. Adhesion of Advanced Overlay Coatings: Mechanisms and Quantitative Assessment, *Surface and Coatings Technology*, v.71, p201-207, 1995.

YANG L. J. Pin on Disc Wear Testing of Tungsten Carbide with a new Moving Pin Technique, *Wear*, v.225-229, p557-562, 1999.