

HUMBERTO LOPES RODRIGUES

**RELAÇÃO DESGASTE-ACABAMENTO SUPERFICIAL
EM FERRAMENTAS DE METAL DURO COM REVESTIMENTO TRIPLO
NO TORNEAMENTO DE AÇOS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic

Guaratinguetá

2005

R696r	Rodrigues, Humberto Lopes Relação desgaste-acabamento superficial em ferramentas de metal duro com revestimento triplo no torneamento de aços / Humberto Lopes Rodrigues.- Guaratinguetá : [s.n.], 2005 110f.: il. Bibliografia: f. 102-110 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2005 Orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic 1. Desgaste 2. Rugosidade 3. Usinagem I. Título
-------	--

CDU 621.9

DADOS CURRICULARES**HUMBERTO LOPES RODRIGUES**

NASCIMENTO	18.01.1956 - SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Humberto Rodrigues Carmen Lopes Rodrigues
1982/1988	Curso de Graduação Faculdade de Tecnologia de São Paulo
1992/1997	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia Campus de Guaratinguetá da UNESP
1989/...	Tecnólogo do Departamento de Materiais e Tecnologia, da Faculdade de Engenharia Campus de Guaratinguetá da UNESP

Dedico este trabalho em memória de minha mãe **CARMEN** e de meu pai **HUMBERTO**.

Aos meus filhos **Bruno, Diego, Marina** e **Higor** pela motivação. Ao apoio e compreensão de minha esposa **Fran**.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic quero agradecer com toda minha admiração pela amizade e ao elevado grau de compromisso dedicado a este trabalho, tornando-o possível.

Pela presença e apoio dos amigos Marcelo dos Santos Pereira, Tomaz Manabu Hashimoto e José Manoel Bernardes, que nos momentos mais difíceis sempre souberam como ajudar.

Aos colegas da FEG e em particular ao Ely de Almeida Fornitano, Odir Vieira da Silva, Wilson Roberto dos Santos e Célio José de Souza pela colaboração e incentivo.

Pela realização da análise química em seus laboratórios, agradeço à empresa CONFAB.

Aos colegas Pedro Paulo de Campos, Dalcy Roberto dos Santos, Francisco Cristóvão Lourenço de Mello, Olivério Moreira de Macedo Silva, Mario Lima de Alencastro Graça, Rogério Duque Gonçalves, Alexandre de Oliveira Santos e Elizabeth Godoi Salgado, todos do IAE/CTA pela ajuda inestimável, tanto pela liberação do uso do microscópio eletrônico de varredura, quanto pelo atendimento e espírito de colaboração fundamental para a realização experimental desta tese.

A FEG/UNESP, instituição responsável pelo amparo a este trabalho de pesquisa, realizado através de seu programa de pós-graduação em engenharia mecânica.

RODRIGUES, H. L. **Relação desgaste-acabamento superficial em ferramentas de metal duro com revestimento tripla no torneamento de aços**. 2005. 110f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

RESUMO

As necessidades do mercado mundial têm motivado a pesquisa de novos materiais para a fabricação de ferramentas e, apesar da evolução no projeto e manufatura de máquinas ferramenta, da otimização constante dos processos de fabricação e da tendência de crescimento da automação industrial, estes materiais continuam como um dos fatores limitantes no processo de usinagem. A deposição de finas camadas de carbeto sobre um substrato de metal duro, ao final da década de 60, resultou em um aumento da velocidade de corte e da vida da ferramenta. Atualmente os revestimentos mais aplicados são o nitreto de titânio (TiN), o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carbeto de titânio (TiC), o carbonitreto de titânio (TiCN) e o nitreto de alumínio titânio (TiNAl). Neste trabalho, com o objetivo de avaliar e relacionar os valores do desgaste de flanco e da rugosidade da peça usinada, foram realizados testes de usinagem em aço ABNT-1050 com ferramentas de metal duro revestido por carbeto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3) e nitreto de titânio (TiN). Sob uma velocidade de corte de 297 m/min, profundidade de usinagem de 0,5 mm e avanço de 0,15 mm/rot, tornearam-se percursos de corte correspondentes aos seguintes tempos: 2,2 min, 4,1 min, 6,14 min, 7,9 min, 14,2 min e 18,6 min. Verificou-se que os mecanismos de desgaste por difusão, adesão e delaminação, atuantes nas superfícies de folga das ferramentas, influenciaram o acabamento superficial das peças usinadas, enquanto que a influência principal no crescimento do desgaste de flanco (VB) resultou da ação do mecanismo de desgaste por difusão.

PALAVRAS-CHAVE: desgaste, mecanismo de desgaste, rugosidade, usinagem, flanco, aço 1050.

RODRIGUES, H. L. **Wear-surface finishing relationship in hard metal tools with triple coating in the turning of steels.** 2005. 110f. Thesis (Mechanical Engineering Doctoral) – Engineering College - Guaratinguetá Campus, São Paulo State University, Guaratinguetá, 2005.

ABSTRACT

The needs of the world market have improved the research of new materials for tools production. Besides the design and manufacturing of tool-machines, the constant optimization of production process and the growth tendency of industrial automation, these materials continue being one of the limiters factors in a machining process. The deposition of fine carbide layers on hard metal substrates, at the end of 60's, resulted in a increase of the cutting speed and tool life. Now, the main coating materials are titanium nitride (TiN), aluminum oxide (Al_2O_3), titanium carbide (TiC), titanium carbon nitride (TiCN) and titanium aluminum nitride (TiNAl). In this work, several machining tests in a ABNT-1050 steel with hard metal tools coated by TiC, Al_2O_3 and TiN were been realized in order to evaluate the tool flank wear and the workpiece roughness. Cutting speed of 297 m/min, cutting depth of 0.5 mm and feed of 0.15 mm/rot were applied to machine cutting paths corresponding 2.2 min, 4.1 min, 6.14 min, 7.9 min, 14.2 min and 18.6 min. Diffusion, adhesion and delamination wear mechanisms were verified in the tool flank surface, having influence in the surface roughness of the machined workpieces, while the flank wear growth (VB) were resulted by the action of diffusion wear mechanism.

KEYWORDS: wear mechanism, wear, roughness, machining, flank and steel 1050.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Ilustração esquemática dos mecanismos de desgastes por: (a) abrasão; (b) difusão; (c) oxidação; (d) fadiga; (e) adesão.....	25
Figura 2.2	- Mecanismos de desgaste abrasivo: (a) microcorte; (b) fratura; (c) fadiga e (d) arrancamento de grãos.....	26
Figura 2.3	- Modos de desgaste abrasivo: (a) dois corpos; (b) três corpos.....	27
Figura 2.4	- Representação esquemática da adesão nas superfícies de folga e de saída.....	28
Figura 2.5	- Esquema do mecanismo de desgaste por delaminação: (a) nucleação das trincas; (b) propagação das trincas; (c) ramificação; (d) destacamento da partícula.....	29
Figura 2.6	- Mapas de distribuição das tensões de cisalhamento (MPa): (a) solicitado por uma força normal; (b) força normal e tangencial.....	30
Figura 2.7	- Localização de zonas oxidadas.....	32
Figura 2.8	- Cinéticas da oxidação do metal a altas e baixas temperaturas.....	33
Figura 2.9	- Representação simplificada de uma ferramenta de torneamento.....	33
Figura 2.10	- Representação dos desgastes de cratera e de flanco das ferramentas de corte.....	36
Figura 2.11	- Evolução do desgaste linear da superfície de folga e alteração da curva com o aumento da velocidade de corte.....	37
Figura 2.12	- Mapa de mecanismos de desgaste.....	39
Figura 2.13	- Valores Ra em função do desgaste de flanco VB para alguns testes de fresamento frontal.....	41
Figura 2.14	- Representação esquemática em corte de uma pastilha de metal duro com revestimento triplo de TiC-Al ₂ O ₃ -TiN.....	46
Figura 3.1	- Representação da posição relativa da amostra e disco de corte.....	51
Figura 3.2	- Rugosidade em função do número de peças.....	54
Figura 3.3	- (a) Demarcação da área analisada; (b) Identificação de cada região....	55

Figura 4.1	- Inclusões no aço ABNT-1050.....	60
Figura 4.2	- Microestrutura do aço ABNT-1050 ilustrando a presença das fases ferrítica e perlítica.....	60
Figura 4.3	- Análises químicas por EDS: (a) Substrato; fase alfa (WC) e beta (Co); (b) carbeto de titânio (TiC); (c) alumina (Al_2O_3); (d) nitreto de titânio (TiN).....	61
Figura 4.4	- Micrografia do substrato WC-Co e dos recobrimentos de TiC, Al_2O_3 e TiN (sem ataque): a) microscopia óptica; b) microscopia eletrônica de varredura; c) microscopia eletrônica de varredura.....	62
Figura 4.5	- Recobrimento de TiN de duas áreas distintas de uma pastilha nova. (MEV – Retroespalhado).....	63
Figura 4.6	- Micrografia óptica do substrato WC-Co. Reagente Murakami. Tempo de exposição 4min.....	64
Figura 4.7	- Desgaste de Flanco (VB) das ferramentas de corte multi-revestidas em função do tempo de usinagem.....	66
Figura 4.8	- Comportamento da rugosidade superficial final em função do tempo de usinagem.....	67
Figura 4.9	- Definição da nomenclatura adotada: a) Demarcação da área analisada; b) Identificação de cada região.....	68
Figura 4.10	- Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) Área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 1 (F1); (b) Detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3.....	69
Figura 4.11	- Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 1 (F1), vista da região 1: (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano pouco severo na aresta.....	70
Figura 4.12	- Análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy); (a) região 1; (b) região 2.....	70
Figura 4.13	- Análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) dos depósitos de Fe da região 2.....	71

- Figura 4.14 - Micrografia por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 1 (F1), mostra a superfície ranhurada da alumina (Al_2O_3), detalhando a presença de trinca e alguns sulcos cruzando as ranhuras..... 71
- Figura 4.15 - Análise química por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da região 3..... 72
- Figura 4.16 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F1): (a) região 3; (b) detalhe da região 3..... 72
- Figura 4.17 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 2 (F2); (b) detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3..... 73
- Figura 4.18 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 2 (F2): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta..... 73
- Figura 4.19 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 2 (F2): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação de fina trinca demarcada pela deposição de ferro..... 74
- Figura 4.20 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F2): (a) região 3; (b) Detalhe da região 3..... 75
- Figura 4.21 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 3 (F3); (b) detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3..... 75
- Figura 4.22 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 3 (F3): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta..... 76
- Figura 4.23 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 3 (F3): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação dos depósitos de ferro..... 77
- Figura 4.24 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F3): (a) região 3; (b) detalhe da região 3..... 77

- Figura 4.25 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 4 (F4); (b) detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3..... 78
- Figura 4.26 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 4 (F4): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte e uma partícula preste a ser removida; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta..... 79
- Figura 4.27 - Análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da superfície da avaria..... 79
- Figura 4.28 - Análise química por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da partícula preste a ser removida..... 79
- Figura 4.29 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 4 (F4): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação das ranhuras demarcadas pela deposição de ferro..... 80
- Figura 4.30 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F4): (a) região 3; (b) detalhe da região 3..... 81
- Figura 4.31 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 5 (F5); (b) detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3..... 81
- Figura 4.32 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 5 (F5): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta..... 82
- Figura 4.33 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 5 (F5): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação de trinca transversal ao deslizamento; (c) detalhe de uma fina trinca..... 83
- Figura 4.34 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F5): (a) região 3; (b) detalhe da região 3..... 84
- Figura 4.35 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 6 (F6); (b) detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3..... 84

- Figura 4.36 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 6 (F6): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta..... 85
- Figura 4.37 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 6 (F6): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação de fina trinca demarcada pela deposição de ferro..... 86
- Figura 4.38 - Análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) das manchas claras na região 2..... 86
- Figura 4.39 - Análise química por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da região 3..... 87
- Figura 4.40 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F6): (a) região 3; (b) detalhe da região 3..... 87

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	- Parâmetros de preparação das amostras.....	48
TABELA 3.2	- Tempo de usinagem solicitado para cada ferramenta de corte.....	51
TABELA 4.1	- Composição química nas amostras do aço.....	56
TABELA 4.2	- Dureza Brinell das amostras selecionadas.....	57
TABELA 4.3	- Espessura média dos revestimentos de TiC, Al ₂ O ₃ e TiN.....	61
TABELA 4.4	- Fração volumétrica das fases alfa (WC) e beta (Co) do substrato.....	62
TABELA 4.5	- Medidas do tamanho de grão médio do carbetto de tungstênio (WC).....	63
TABELA 4.6	- Síntese da análise da Região 1 – Aresta Principal de Corte.....	92
TABELA 4.7	- Síntese da análise da Região 2 – Extensão do desgaste de flanco.....	93
TABELA 4.8	- Síntese da análise da Região 3 – Acúmulo de produtos do desgaste.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DMT	- Departamento de Materiais e Tecnologia
FEG	- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
UNESP	- Universidade Estadual Paulista
IAE	- Instituto de Aeronáutica e Espaço
CTA	- Centro Técnico Aeroespacial
DEMAR	- Departamento de Engenharia de Materiais
FAENQUIL	- Faculdade de Engenharia Química de Lorena
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	- Microscopia Óptica
EDS	- Energy Dispersive Spectroscopy
CVD	- Chemical vapour deposition
PVD	- Physical vapour deposition
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CAD	- Computer Aided Design

LISTA DE SÍMBOLOS

α	- ângulo de folga.....	°
γ	- ângulo de saída.....	°
θ_c	- temperatura crítica.....	°C
χ_r	- ângulo de posição da aresta de corte principal.....	°
χ_r'	- ângulo de posição da aresta de corte secundária.....	°
r_ϵ	- raio de ponta.....	mm
ap	- profundidade de usinagem.....	mm
f	- avanço	mm/rev
HB	- dureza Brinell.....	---
K_B	- largura da cratera.....	mm
KM	- distância do centro da cratera à aresta de corte.....	mm
KT	- profundidade da cratera.....	mm
n	- velocidade de rotação.....	rpm
N	- número de peças.....	---
R_a	- parâmetro de rugosidade superficial.....	μm
R_{máxteor}	- rugosidade máxima teórica.....	μm
t	- tempo.....	s
T	- vida da ferramenta.....	min
VB	- largura do desgaste de flanco.....	mm
VB_{máx}	- largura máxima do desgaste de flanco.....	mm
v_c	- velocidade de corte.....	m/min

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	19
1.2 OBJETIVOS	20
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 DESGASTES.....	23
2.1.1 Definições.....	23
2.1.2 Mecanismos de desgaste.....	23
2.1.2.1 Mecanismo de desgaste por abrasão	25
2.1.2.2 Mecanismo de desgaste por adesão.....	27
2.1.2.3 Mecanismo de desgaste por Fadiga.....	29
2.1.2.4 Mecanismo de desgaste por difusão.....	31
2.1.2.5 Mecanismo de desgaste por oxidação	31
2.2 GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE	33
2.2.1 Superfície de folga $A\alpha$.....	34
2.2.2 Superfície de saída $A\gamma$.....	34
2.2.3 Aresta principal de corte ou aresta de corte S.....	34
2.2.4 Aresta secundária de corte S'	34
2.2.5 Raio de ponta.....	35
2.3 TIPOS DE DESGASTES DAS FERRAMENTAS DE CORTE	35
2.4 EVOLUÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO EM FUNÇÃO DO TEMPO	37
2.4.1 Desgaste Inicial.....	38
2.4.2 Desgaste de Estado Constante	38
2.4.3 Desgaste terciário	40
2.5 EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA USINADA EM FUNÇÃO DO TEMPO	41
2.6 INFLUÊNCIA DAS INCLUSÕES.....	42
2.7 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE	42
2.7.1 Principais propriedades dos materiais para as ferramentas de corte.....	43
2.7.1.1 Dureza a altas temperaturas	43
2.7.1.2 Resistência ao Desgaste.....	44
2.7.1.3 Tenacidade	44
2.7.1.4 Atrito.....	44
2.7.1.5 Propriedades Térmicas	44
2.7.2 Propriedades dos revestimentos das ferramentas de corte	45

2.7.2.1 Carbonitreto de titânio (TiCN).....	46
2.7.2.2 Carboneto de titânio (TiC).....	47
2.7.2.3 Óxido de alumínio ou alumina (Al ₂ O ₃).....	47
2.7.2.4 Nitreto de titânio (TiN).....	47
2.7.2.5 Nitreto de alumínio titânio (TiAl).....	48
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1 CORPOS-DE-PROVA.....	49
3.1.1 Material dos corpos-de-prova.....	49
3.1.2 Análise de dureza do material dos corpos-de-prova.....	49
3.1.3 Análise microscópica.....	49
3.1.4 Análise química.....	50
3.2 FERRAMENTAS.....	50
3.2.1 Material e geometria.....	50
3.2.2 Caracterização das ferramentas.....	51
3.2.2.1 Preparação das amostras metalográficas.....	51
3.2.2.2 Ataque químico.....	52
3.2.2.3 Microscopia.....	52
3.3 ENSAIO DE USINAGEM.....	53
3.4 MEDIDAS DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DOS CORPOS-DE-PROVA.....	54
3.5 ANÁLISE MICROSCÓPICA DO DESGASTE DE FLANCO.....	55
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	57
4.1.1 Resultados da caracterização do material da peça trabalho.....	57
4.1.1.1 Composição química.....	57
4.1.1.2 Dureza.....	58
4.1.1.3 Inclusões.....	59
4.1.1.4 Análise microestrutural.....	60
4.1.2 Resultados da caracterização das pastilhas de metal duro multi-revestido.....	61
4.2 AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO (VB) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE USINAGEM.....	65
4.3 AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA DE TRABALHO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE USINAGEM.....	66
4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE MICROGRÁFICA DAS SUPERFÍCIES DE FOLGA DESGASTADAS.....	68
4.4.1 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 1.....	69
4.4.2 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 2.....	72
4.4.3 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 3.....	75
4.4.4 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 4.....	78
4.4.5 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 5.....	81

4.4.6 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 6.....	84
4.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ANÁLISE MICROSCÓPICA DAS SUPERFÍCIES DESGASTADAS DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	87
4.5.1 Região 1 – Aresta principal de corte	88
4.5.2 Região 2 – Extensão do desgaste de flanco	88
4.5.3 Região 3 – Acúmulo de produtos do desgaste	89
4.6 MECANISMOS DE DESGASTE ATUANTES.....	89
4.7 SÍNTESE DA ANÁLISE DA ÁREA DO DESGASTE DE FLANCO.....	93
4.8 COMPORTAMENTO DO DESGASTE DE FLANCO E DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL COM O TEMPO DE CORTE E SUAS RELAÇÕES COM OS MECANISMOS DE DESGASTE ATUANTES	97
CAPITULO 5 CONCLUSÕES.....	99
SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As necessidades do mercado mundial têm apontado para um grande interesse na pesquisa e no desenvolvimento de novos materiais utilizados na fabricação de ferramentas. Apesar da elevada tecnologia aplicada no projeto e fabricação de máquinas ferramenta com rigidez cada vez mais elevada, da otimização constante dos processos de fabricação e da tendência de crescimento na automação industrial, os materiais para ferramentas, continuam sendo um dos fatores limitantes em um processo de usinagem (CHIAVERINI, 1984 e ABELE, 2002).

Dentre os principais materiais aplicados na fabricação de ferramentas de corte destacam-se as ferramentas produzidas em metal duro. Estas se caracterizam por apresentar elevada dureza e resistência, consistindo de grãos de carbetos, com grandeza micrométrica, envolvidos por um elemento metálico ligante, em geral o cobalto (Co). São fabricadas por tecnologia da metalurgia do pó, pelo processo de sinterização dos pós de carbetos e do metal, em faixas de temperaturas entre 1300 e 1500°C. As primeiras pastilhas de metal duro foram produzidas em 1923, utilizando-se uma mistura de carbetos de tungstênio e cobalto (WC-Co), e foram, por um longo tempo, o tipo dominante (SANDVIKEN; 1994).

Ao final da década de 60, passou-se a depositar uma fina camada de carbetos de titânio (TiC) da ordem de alguns micrometros sobre um substrato de metal duro (WC-Co), resultando em um aumento da velocidade de corte e da vida da ferramenta. Neste período, foram experimentados vários materiais como recobrimento, com resultados extremamente satisfatórios. Hoje, os mais aplicados são o nitreto de titânio (TiN), o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carbetos de titânio (TiC) e o carbonitreto de titânio (TiCN), sendo que a espessura da camada não deve ultrapassar 0,005 mm, pois camadas mais grossas não melhoram o desempenho da ferramenta (MARCONDES; 1990).

Recobrimentos múltiplos também foram desenvolvidos de forma que cada camada contribui com suas próprias características. As combinações de melhores

resultados são as de TiN-TiC-TiCN-TiN e TiC-Al₂O₃-TiN, onde a espessura total do revestimento não deve ser superior a 12 µm, pois pode ocorrer uma fragilidade originando pequenos lascamentos nas camadas (DEGARMO; 1999).

Portanto, o conhecimento mais apurado das ferramentas multi-revestidas passou a ser uma necessidade real, para o prosseguimento de seu desenvolvimento. Dominar as características resultantes do processo de sinterização e deposição dos revestimentos bem como o estabelecimento preciso dos mecanismos de desgaste envolvidos no corte tornou-se obrigatório.

Neste trabalho foram realizados ensaios de usinagem do aço ABNT 1050 com ferramenta de metal duro revestido de nitreto de titânio (TiN), óxido de alumínio (Al₂O₃) e carbeto de titânio (TiC), em condições controladas, determinando-se os valores do desgaste de flanco (VB) e da rugosidade superficial da peça (Ra). As superfícies de folga desgastadas em função do tempo de usinagem, foram analisadas utilizando-se MEV (microscopia eletrônica de varredura) e os mecanismos de desgaste atuantes foram identificados e correlacionados com o comportamento do desgaste de flanco e da rugosidade superficial.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho de pesquisa são:

- a) determinação do comportamento do desgaste de flanco (VB), em função do tempo de usinagem, da ferramenta de metal duro com revestimentos de nitreto de titânio (TiN), óxido de alumínio (Al₂O₃) e carbeto de titânio (TiC) em condições controladas na usinagem de aço ABNT 1050,
- b) determinação do comportamento da rugosidade superficial da peça usinada em relação ao tempo de usinagem,
- c) análise e identificação dos mecanismos de desgaste atuantes na superfície desgastada de folga da ferramenta,

- d) correlação dos mecanismos de desgaste atuantes na superfície desgastada de folga da ferramenta com o desgaste de flanco (VB) e com a rugosidade superficial da peça trabalho.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os desgastes e possíveis avarias nas ferramentas de corte resultam das forças e tensões envolvidas no corte com remoção de cavaco e, à medida que o processo de usinagem se desenvolve, a temperatura eleva-se na região de contato peça/ferramenta, alterando assim as características dos materiais envolvidos. Estes desgastes e avarias são conseqüências indesejáveis que obrigam a interrupções periódicas da produção, para a reafiação ou substituição da ferramenta, aumentando o custo do processo em questão.

A necessidade premente da redução de custos, acentuada nos dias de hoje, implica diretamente na diminuição dos tempos gastos em qualquer serviço a ser realizado. Do ponto de vista da fabricação estes tempos devem ser reduzidos, principalmente com o aumento das velocidades envolvidas e o prolongamento dos períodos de troca das ferramentas (vida da ferramenta).

A obtenção do aumento das velocidades na usinagem está relacionada diretamente às máquinas e às ferramentas de corte, sendo que o prolongamento dos períodos de troca depende dos materiais constituintes e da qualidade do processo de fabricação destas ferramentas. Suas vidas têm sido estendidas ao longo do tempo, principalmente, pelo desenvolvimento dos materiais e do crescente conhecimento de seus comportamentos sob condições de trabalho.

Independente do critério adotado para determinar a vida da ferramenta, esta sofre um desgaste crescente em função do tempo, ou até mesmo pode ocorrer uma avaria catastrófica cujo comportamento é mais aleatório.

O aparecimento de uma avaria ou de um mecanismo de desgaste com uma determinada preponderância depende, entre outros parâmetros, do material e da geometria da ferramenta, das condições de corte, da relação entre a dureza dos materiais da peça e da ferramenta e das características metalúrgicas do material usinado. Todos estes fatores determinam a pressão e a temperatura na região de corte, influenciando assim os mecanismos de desgaste (DEGARMO, 1997 e MESQUITA, 1988).

2.1 DESGASTES

2.1.1 Definições

A existência de muitas formas de definir desgaste pode ser encontrada e para exemplificar, a seguir algumas são citadas:

“Gasto ou consumo pelo atrito” (FERREIRA, 1988);

“Perda progressiva de substância da superfície de um corpo em operação, ocorrendo como resultado de movimento relativo nas superfícies” (BUQUOI¹, 1989 apud BLAU, 1995);

“Dano para uma superfície sólida, envolvendo geralmente perda progressiva de material, que é devido ao movimento relativo entre superfície em contato com uma substância ou substâncias” (McCloskey e Bellanca², 1981 apud BLAU, 1995).

Das definições acima bem como outras não citadas, mostram-se aproximadas e com algumas imprecisões, principalmente, quando no corpo analisado existe a possibilidade da ocorrência de fluxo plástico.

Como será visto mais adiante, a deformação plástica neste trabalho é real e não apenas uma possibilidade. Então, adotar a definição de que o desgaste é a *alteração de um corpo com remoção ou não de material por ação química ou mecânica* (CRNKOVIC; 1993), como a mais representativa, parece ser uma decisão mais adequada.

2.1.2 Mecanismos de desgaste

Há algum tempo existe um grande interesse no desenvolvimento de novos materiais para revestimento, conforme é apresentado adiante no item 2.7.2 deste capítulo. A grande importância dada ao tema reside na grande meta para obtenção de

¹ BUQUOI, D. J. *Solid particle erosion: Its causes, effects and solutions*. Altamonte Springs: Engineering & Operations Workshop, 1989 apud BLAU, P. J. *Glossary of terms*. USA: ASM Handbook, v. 18, 1995.

² MCCLOSKEY, T. H.; BELLANCA, C. *Minimizing solid particle erosion in power plant steam turbines*. Power Engineering, 1981 apud BLAU, P. J. *Glossary of terms*. USA: ASM Handbook, v. 18, 1995.

novos materiais que reúnam as melhores características para uma maior vida da ferramenta, ou seja, aumentar a resistência ao desgaste.

O estudo de como se desenvolve a deterioração da ferramenta para cada uma das possíveis condições de corte, na busca da determinação do mecanismo responsável, estabelece condições básicas para a aplicação dos materiais existentes e orienta as pesquisas para os novos materiais (BLAU; 1997).

Neste trabalho, adota-se a abrasão, difusão, oxidação, fadiga e adesão como nomenclatura para os mecanismos responsáveis pelos desgastes nas superfícies de saída e de folga das ferramentas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001). Segundo trabalhos realizados por Wright e Trent (1974); Dearnlei e Trent (1982); Lim e Ting (1995), normalmente há uma interação de alguns mecanismos de desgaste no processo de corte, podendo haver predominância de um sobre os outros.

Dependendo do par de materiais envolvidos na usinagem ou da variação das condições de corte, o estado de tensões e o gradiente de temperatura nas superfícies de contato da ferramenta com o material de trabalho se alteram, determinando qual ou quais mecanismos de desgaste são atuantes (WILLIAMS; 1996).

Diante dos esforços despendidos pelos pesquisadores, várias versões foram geradas na tentativa de explicar o processo de desgaste, o que gerou grande controvérsia, tanto na definição dos mecanismos quanto na forma, intensidade e o momento de sua predominância (HOLMBERG; MATTHEWS; RONKAINEN, 1998). Não há ainda uma versão que englobe plenamente todos os conhecimentos adquiridos e que satisfaçam à todas as mentes, mas algumas concordâncias já foram alcançadas.

Aponta-se como avanço, por exemplo, o domínio do conhecimento de que uma superfície plana é constituída de asperezas com formas e distribuições irregulares e, quando dois corpos são colocados um sobre o outro, ocorrem deformações plásticas e elásticas destas asperezas até que a área real de contato seja suficiente para suportar a carga. Quando uma força tangencial é aplicada a estes dois corpos, ocorre um processo de remoção de material, que pode ser maior ou menor dependendo de suas propriedades metalúrgicas, temperatura e outros (SCHEY; 1984). A interação de cada uma destas propriedades resultará no surgimento de um mecanismo de desgaste ou da

interação de alguns deles, ilustrados na figura 2.1, e classificados como: abrasão, difusão, oxidação, fadiga e adesão.

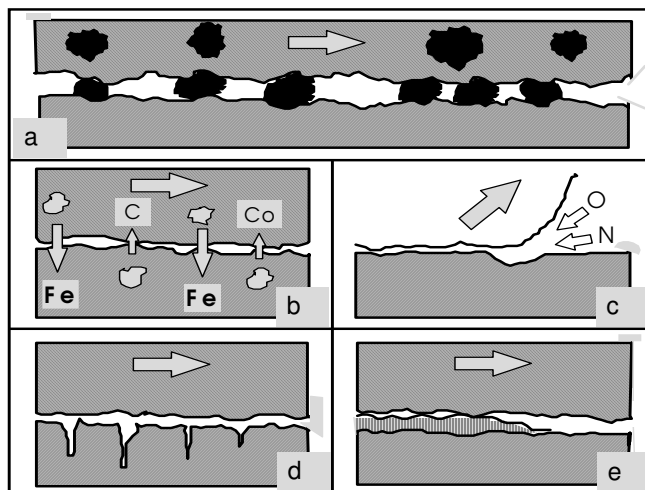


Figura 2.1 - Ilustração esquemática dos mecanismos de desgastes: (a) abrasão; (b) difusão; (c) oxidação; (d) fadiga; (e) adesão. (SANDVIKEN; 1994)

2.1.2.1 Mecanismo de desgaste por abrasão

É definido como: “o desgaste por remoção de material, causado por protuberâncias duras ou partículas duras” (BLAU; 1995).

Segundo Khruschov (1974), o propositor do modelo básico do desgaste por abrasão, identifica-se dois tipos de mecanismos quando uma partícula dura entra em contato com uma superfície de menor dureza. O primeiro mecanismo, esquematizado na figura 2.2c, é a formação de uma ranhura por deformação plástica sem remoção de material, e no segundo (figura 2.2a) a partícula funciona como uma ferramenta removendo material por microcorte.

Além destes mecanismos, dois outros foram descritos por Swain (1975), pois quando a partícula se desloca sobre um material de elevada dureza, um cerâmico, por exemplo, pode ocorrer fratura em sua superfície (figura 2.2b) e, neste caso, os resíduos de desgaste serão resultado da nucleação e propagação de trincas. Ainda para o mesmo material, pode ocorrer o arrancamento ou a extração de grãos, pois a união entre grãos

é relativamente fraca. Neste mecanismo, ilustrado na figura 2.2d, o desgaste acontece pela perda progressiva de grãos.

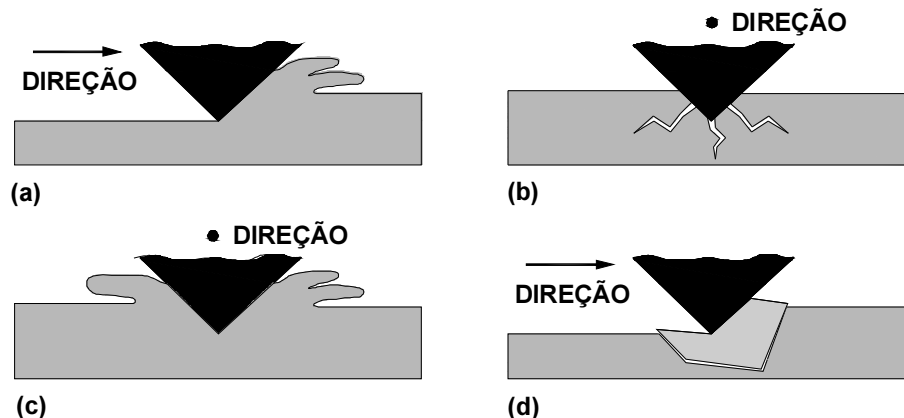


Figura 2.2 - Mecanismos de desgaste abrasivo: (a) microcorte; (b) fratura; (c) fadiga e (d) arrancamento de grãos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

A severidade da ocorrência da abrasão em uma superfície depende da combinação das características da partícula abrasiva (dureza, tamanho, posição e forma), dos materiais em contato (dureza e acabamento superficial) e do carregamento (carga e velocidade) aplicado ao sistema (SCHEY; 1984).

A estabilidade dos grãos nas áreas de contato entre as superfícies em deslizamento determina a natureza do desgaste abrasivo. Na literatura dois modos básicos de desgaste abrasivo são apresentados, o mecanismo de desgaste por abrasão a dois corpos e a três corpos.

O desgaste por abrasão a dois corpos (figura 2.3a) é aquele onde as partículas ou asperezas duras encontram-se rigidamente presas no material de trabalho, e ao deslizar sobre as superfícies da ferramenta de corte promove o seu “riscamento” (SUNDARARAJAN; 1987). Na abrasão a três corpos (figura 2.3b) os grãos rolam livres ao deslizar sobre a superfície, uma vez que eles não estão rigidamente presos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

As partículas de abrasão com elevada dureza, combinada às pressões de contato e, em consequência do seu movimento relativo à ferramenta, “riscam” suas superfícies, atuando como micro-arestas de corte. Portanto, quanto menor for a dureza do material da ferramenta, maior será a abrasão mecânica e, desta forma, a dependência da dureza

do material da ferramenta com a temperatura é o fator com maior influência no desgaste do tipo por abrasão.

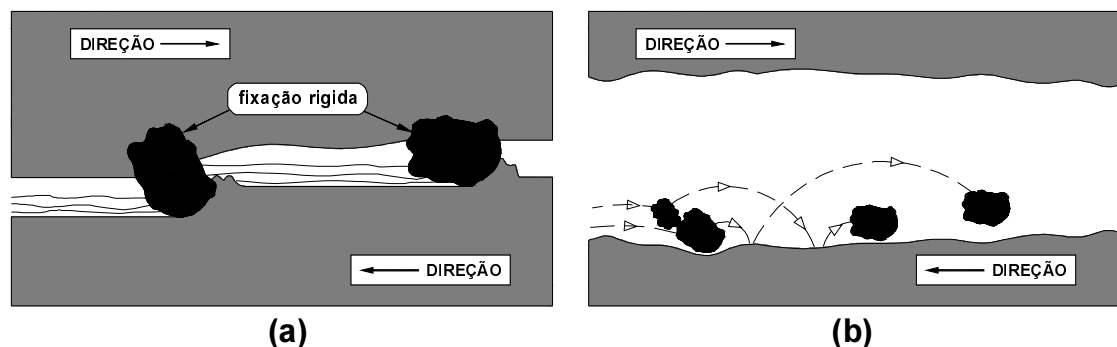


Figura 2.3 - Modos de desgaste abrasivo: (a) dois corpos; (b) três corpos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

Levando-se em conta a dureza a quente, as ferramentas menos duras como o aço rápido, por exemplo, se desgastam mais na zona de formação da aresta postiça, onde as velocidades de corte são relativamente baixas. Os cuidados com a abrasão mecânica no desgaste total da ferramenta deverão ser acentuados, quando da utilização de elevadas velocidades de corte, uma vez que todos os materiais para ferramenta exibem uma tendência à diminuição de dureza (LUDEMA; 1995).

2.1.2.2 Mecanismo de desgaste por adesão

O desgaste por adesão é definido por Blau (1995) como o “Desgaste por transferência de material de uma superfície para outra durante o movimento relativo, devido a formação de junções na fase sólida”. Estas junções adesivamente formadas são cisalhadas e parte do material menos resistente é transferido ou pode permanecer entre as superfícies (CRNKOVIC; 1993).

O mecanismo de desgaste por adesão tem dependência da força normal aplicada nos corpos em contato, da velocidade relativa de deslizamento entre as superfícies, da temperatura, das durezas e rugosidades dos materiais e da afinidade química entre eles (WILLIAMS; 1996).

No processo de usinagem a seco a formação de junções na fase sólida, ocorre na superfície de saída, interface do deslizamento do cavaco com a ferramenta, e na face de folga ou de folga, região de contato entre a ferramenta e a peça. Nestas superfícies de saída e de folga, existe um estado de compressão e atrito, de tamanha ordem, que tornam extremamente propício a ação do mecanismo de desgaste por adesão (SCHEY; 1984).

Estas junções na fase sólida rompem e uma parte pode seguir agregada às superfícies da ferramenta, por estas serem mais duras. À medida que este fato ocorre repetidas vezes, há um crescimento das partes aderidas, que são submetidas a altas tensões de compressão na região de contato. Esta dinâmica, ilustrada na figura 2.4, gera agregados endurecidos por encruamento que em um determinado momento, com o rompimento das junções, levam consigo pequenas partículas das superfícies da ferramenta (RUBENSTEIN, 1976; TRIGGER e CHAO, 1956).

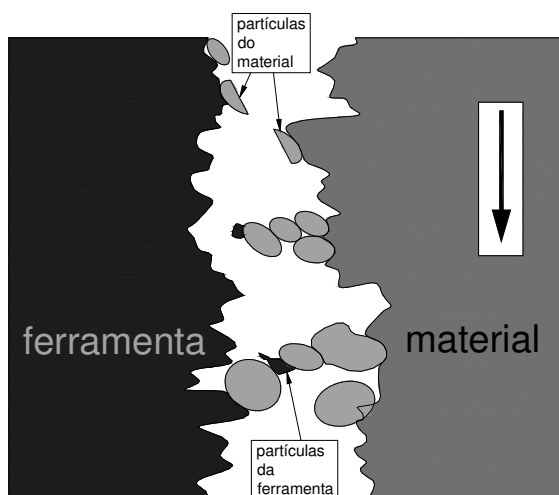


Figura 2.4 - Representação esquemática da adesão nas superfícies de folga e de saída (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

O mecanismo de desgaste por adesão produz muitos fragmentos duros, dos materiais em trabalho, pela deformação e rompimento das junções adesivas, que em suas trajetórias de saída, promovem uma micro-abrasão nas superfícies por onde passam, sendo assim, responsável por uma superfície toda microranhurada. A abrasão

nas superfícies da ferramenta, produzidas por inclusões duras da peça, levam a uma interpretação similar do mecanismo de desgaste adesivo descrito anteriormente.

2.1.2.3 Mecanismo de desgaste por fadiga

Remoção de partículas destacadas por fadiga, ou seja, surgidas pelas variações cíclicas de tensões. Estas partículas têm a forma de escamas (flakes) e são resultantes de micro trincas surgidas sob a superfície (BLAU; 1995).

As forças normais e tangenciais, produzidas pelo deslizamento sobre as junções adesivas, ciclicamente induzem deformações subsuperficiais, ou seja, no deslizamento a seco do material usinado com as superfícies de saída e de folga da ferramenta, as tensões oscilam pela ação adesiva, causando um regime de cargas cíclicas, característico da fadiga. Este regime de tensões e deformações é o responsável pela nucleação e propagação de microtrincas, geralmente em defeitos da microestrutura, como inclusões, partículas de segunda fase, microtrincas pré-existentes e outros.

Sujeito a este regime cíclico, as microtrincas nucleadas se propagam e o seu desenvolvimento passa a ser controlado pelo estado de tensões existentes. Quando as trincas atingirem um valor crítico, mudam sua direção emergindo à superfície, resultando no destacamento de partículas similares a lâminas. Este processo é representado de forma esquemática na figura 2.5.

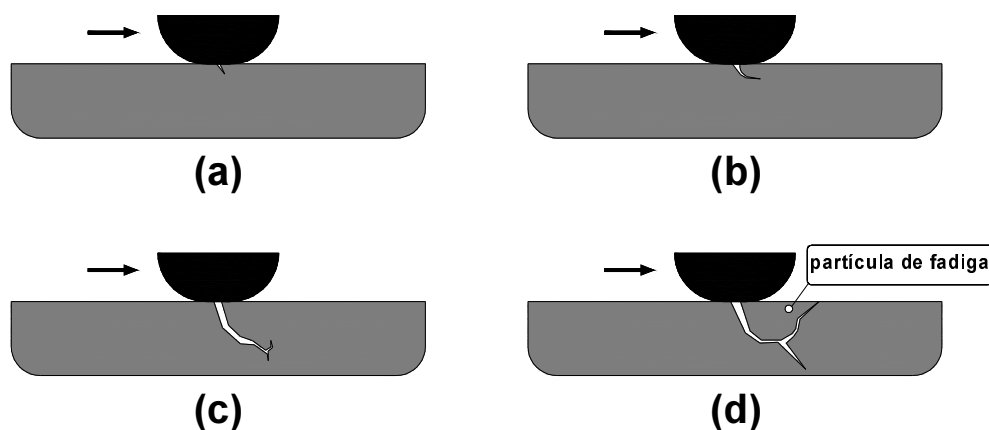


Figura 2.5 - Esquema do mecanismo de desgaste por delaminação: (a) nucleação das trincas; (b) propagação das trincas; (c) ramificação; (d) destacamento da partícula (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

Este mecanismo de desgaste, chamado de fadiga superficial ou delaminação, pode ser explicado utilizando-se a figura 2.6. Um cilindro colocado sobre um plano gera um campo de tensões de cisalhamento, conforme ilustra a figura 2.6a, cuja região tensão máxima ocorre a uma certa distância da superfície. No deslizamento, além da força normal, é aplicada também uma tangencial (devido às forças adesivas) e o campo das máximas tensões que ocorria abaixo da superfície, passa a agir agora junto à superfície (figura 2.6b).

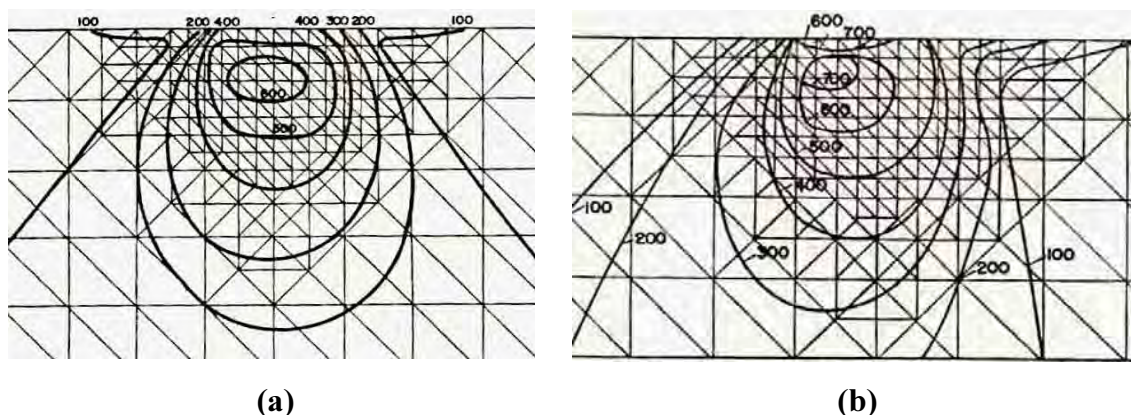


Figura 2.6 - Mapas de distribuição das tensões de cisalhamento(MPa): (a) solicitado por uma força normal; (b) força normal e tangencial (CRNKOVIC; 1993)

Outro modo do mecanismo de desgaste por fadiga, chamado de fadiga térmica, é resultado freqüente da combinação termomecânica, ou seja, das flutuações de temperatura com o ciclo carregamento-descarregamento das forças de corte. Este processo é dependente das condições de corte, da tenacidade e dureza das superfícies (SANDVIKEN; 1994).

A severidade deste mecanismo está ligada, como todos os outros, ao aumento da temperatura, da intensidade e da amplitude das forças do ciclo de carregamento. Um processo de corte intermitente por fresamento ou por torneamento interrompido, é sem dúvida um exemplo, de uma situação favorável a diminuição da vida da ferramenta de corte em decorrência do desgaste por fadiga.

2.1.2.4 Mecanismo de desgaste por difusão

“Desgaste entre duas superfícies em contato com movimento relativo, atribuído a migração individual de átomos de uma superfície para a outra” (BLAU; 19995).

A ocorrência do mecanismo de desgaste por difusão é extremamente dependente de altas temperaturas e da afinidade química entre os corpos em contato (SANDVIKEN; 1994), e influencia o desgaste das superfícies das ferramentas de dois aspectos distintos. O primeiro, através da perda de átomos que difundem para a peça, ocasionando o enfraquecimento da estrutura da ferramenta. O segundo, pela formação de compostos dos elementos que difundiram da peça ou do cavaco para a ferramenta (LUDEMA; 1995).

A combinação de uma grande afinidade química a altas temperaturas, eleva o mecanismo de desgaste por difusão a um alto nível de importância na vida das ferramentas de corte. Mesmo não havendo grande afinidade entre a peça trabalho e o material da ferramenta, segundo Mesquita (1988), o mecanismo de desgaste por difusão será tanto mais importante quanto maior for a temperatura, uma vez que em relação a esta, a velocidade de difusão cresce exponencialmente.

As altas velocidades de corte induzem a elevadas velocidades de escorregamento do material usinado sobre a superfície de folga da ferramenta, criando condições para que o mecanismo de desgaste por difusão seja significativo nessa superfície (TRENT; 1991). O aumento da velocidade de corte promove uma influência crescente da difusão, que tende a assumir a predominância do desgaste, à medida que o percurso de corte for maior, e assim, a taxa de desgaste aumenta.

2.1.2.5 Mecanismo de desgaste por oxidação

É um mecanismo de desgaste corrosivo na qual predominam reações químicas com o oxigênio ou um predominate ambiente oxidante. Usualmente, desgaste por oxidação é uma forma moderada, mas algumas vezes pode ser sério (BLAU; 1995). O desgaste por oxidação pode ocorrer quando os corpos em contato são submetidos a altas temperaturas e na presença de elementos oxidantes (SANDVIKEN; 1994).

Sabe-se que o processo de usinagem gera altas temperaturas mesmo em condições normais de corte e, tendo o ar como meio ou refrigerantes a base de água, reações químicas do oxigênio são inevitáveis em algumas regiões da ferramenta, conforme ilustrada na figura 2.7. Entretanto, nota-se que a oxidação está presente nas superfícies de saída e de folga ao redor dos locais desgastados (LUDEMA; 1995).

As características do mecanismo de desgaste por oxidação são a geração de superfícies lisas através da retirada de pequenas partes oxidadas. Nos resíduos provenientes da ação deste mecanismo foi encontrado o ferro metálico, que com o avanço do processo de corte, e o conseqüente crescimento da temperatura em função do atrito na região do contato, transformou-se em óxidos de ferro (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

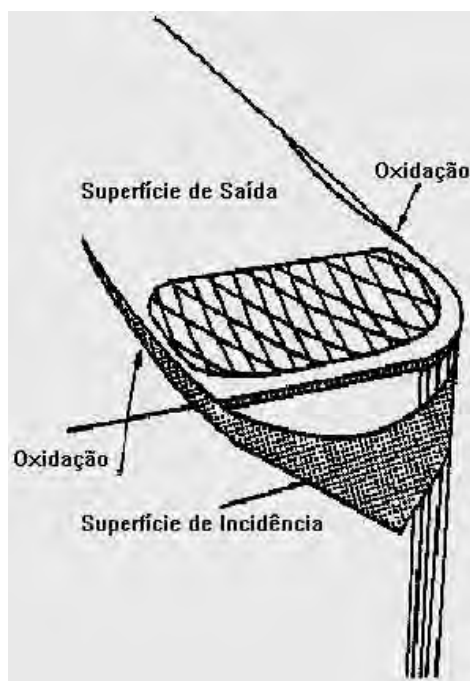


Figura 2.7 - Localização de zonas oxidadas (MESQUITA; 1988).

A figura 2.8 ilustra a influência da temperatura na espessura das camadas dos óxidos de ferro criados sobre as superfícies da ferramenta. Nas temperaturas iniciais do corte, pode haver rápida formação de uma fina camada de óxido que diminui a ação do mecanismo de desgaste por adesão. Entretanto, o crescimento da espessura do filme de óxido aumenta a sua fragilidade, levando-o à deterioração por pequenas fraturas, que em conseqüência causa danos nas superfícies da ferramenta (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

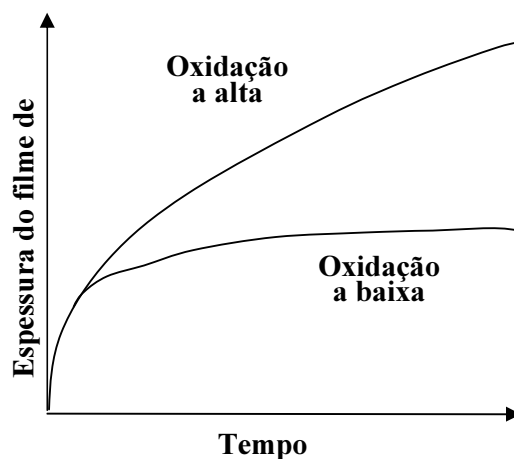


Figura 2.8 - Cinéticas da oxidação do metal a altas e baixas temperaturas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

2.2 GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

A escolha da geometria depende principalmente das propriedades do material a ser trabalhado e do material da ferramenta. Todos os detalhes geométricos de uma ferramenta são importantes e largamente conhecidos, mas serão ressaltados apenas os fundamentais para o entendimento deste trabalho (FERRARESI, 1970 e DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001), que se tomando como referência a figura 2.9, são:

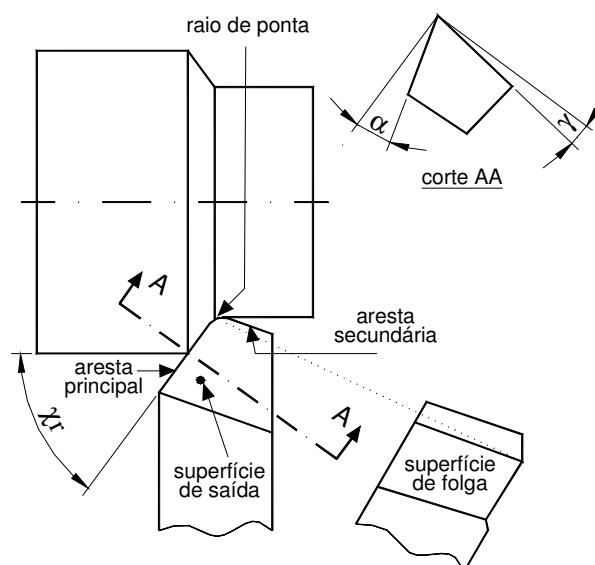


Figura 2.9 - Representação simplificada de uma ferramenta de torneamento.

2.2.1 Superfície de folga $A\alpha$

O aumento de sua inclinação, ou seja, quanto maior o ângulo “ α ” (visto no corte AA), maior será o volume de material removido da ferramenta para o mesmo valor medido do desgaste de flanco. Este aumento é limitado pelo conseqüente enfraquecimento da cunha cortante.

2.2.2 Superfície de saída $A\gamma$

A indicação do ângulo positivo “ γ ” (visto no corte AA), é a determinação da inclinação da superfície de saída. O aumento deste ângulo diminui a pressão e a temperatura de corte, prolongando a vida da ferramenta. Entretanto, este acréscimo diminui a resistência da cunha cortante.

2.2.3 Aresta principal de corte ou aresta de corte S

Intersecção das superfícies de saída e de folga e determinada pelo ângulo de posição “ χ_r ”. Quanto menor for este ângulo maior será o contato da aresta com o material de trabalho, proporcionando uma distribuição melhor da temperatura de corte, com uma dissipação do calor mais eficiente.

2.2.4 Aresta secundária de corte S'

Localizada na superfície de saída e determinada pelo ângulo secundário de posição “ χ_r' ”. Quando este ângulo é muito pequeno o contato desta aresta tende a ser completo com a superfície usinada, concentrando o calor que juntamente com resíduos do corte prejudicam o acabamento da peça.

2.2.5 Raio de ponta

Raio de concordância entre as arestas principal e secundária. O seu aumento proporciona a redução da pressão de corte diminuindo os valores da rugosidade superficial do material usinado, porém este aumento é limitado por prejudicar o acabamento que é dependente da relação raio de ponta e avanço da ferramenta.

$$R_{\text{máxteor}} = \frac{f^2}{8r_{\epsilon}} \quad (1)$$

Onde: $R_{\text{máxteor}}$ – rugosidade máxima,
 f – avanço por giro,
 r_{ϵ} – raio de ponta.

2.3 TIPOS DE DESGASTES DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Durante o processo de usinagem fenômenos mecânicos, térmicos e químicos, exercem ações de desgastes nas superfícies de saída e de folga da ferramenta de corte. Estes fenômenos ocorrem comumente em regiões adjacentes à aresta de corte, como representado na figura 2.10, regiões estas de contato da peça ou do cavaco com a ferramenta (MICHELETTI, 1980).

Na região da superfície de saída da ferramenta onde ocorre o atrito do cavaco, partículas são perdidas paulatinamente, produzindo uma cavidade, ilustrada na figura 2.10. Esta perda paulatina de partículas denomina-se de desgaste de cratera, surgindo principalmente com mais frequência no corte de aços e ligas metálicas com níquel e ou cobalto.

O contato entre a peça e a ferramenta provoca a remoção constante de diminutas porções de material da superfície de folga, ocasionando o surgimento do desgaste de flanco ou linear. Em muitos casos este desgaste não é regular ao longo de todo o comprimento da aresta, apresentando variações, normalmente com máximos no ponto correspondente à extremidade da aresta de corte junto ao raio de ponta da ferramenta.

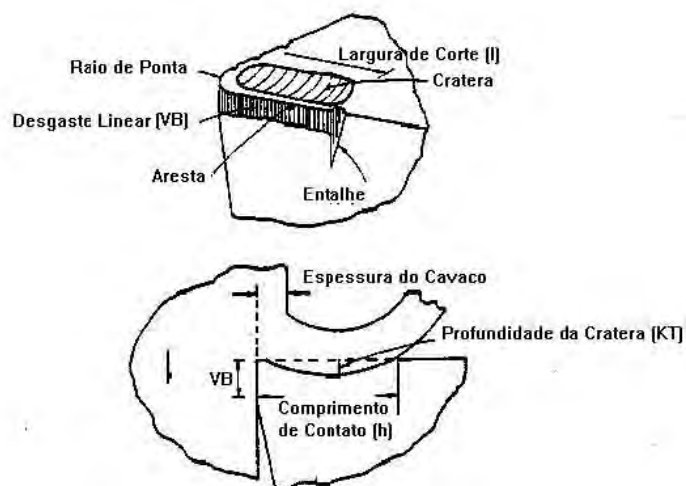


Figura 2.10 Representação dos desgastes de cratera e de flanco das ferramentas de corte (COOK, 1973).

A figura 2.10 representa os desgastes das ferramentas, sendo que a medida do desgaste linear na superfície de folga é tomada pelo valor médio de sua largura (VB) ou pelo valor máximo $VB_{máx}$ e, o desgaste em cratera leva em consideração a profundidade máxima da cratera KT, a sua largura KB e a distância da aresta de corte principal ao centro da cratera KM (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Há uma grande importância na determinação de valores críticos para os desgastes em função das condições de corte e dos objetivos a alcançar, pois o desenvolvimento destes desgastes de flanco e de cratera pode levar a ocorrência de uma ruptura da ferramenta, cujas conseqüências no processo de corte são difíceis de precisar. Estes efeitos podem ser os mais variados, desde um simples prejuízo no acabamento e ou nas dimensões das peças usinadas, até elevações repentinas nas forças de corte podendo acarretar danos maiores à máquina ferramenta e aos dispositivos de fixação.

A determinação dos valores dos desgastes admissíveis, para a substituição ou afiação das ferramentas, toma como referência ambos os desgastes. Contudo, geralmente, se a escolha do material da ferramenta for feita de forma criteriosa, será o desgaste linear da superfície de folga que levará à fixação da vida útil da ferramenta (COOK, 1973). Este desgaste aparece para todas as condições de corte, sejam para

baixas velocidades com pequenos avanços ou para outras condições de corte onde a temperatura seja relativamente maior (MESQUITA, 1988).

2.4 EVOLUÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO EM FUNÇÃO DO TEMPO

Sabe-se que o aumento do tempo de corte provoca um crescimento gradual dos desgastes da ferramenta, apresentando entre eles uma curva diferenciada deste comportamento. Enquanto o desgaste de cratera cresce linearmente em função do tempo, o desgaste na superfície de folga pode apresentar três zonas características, conforme ilustrado pela figura 2.11. Este comportamento do desgaste de flanco pode ser modificado pela variação das condições de corte, podendo apresentar-se até como uma linha reta.

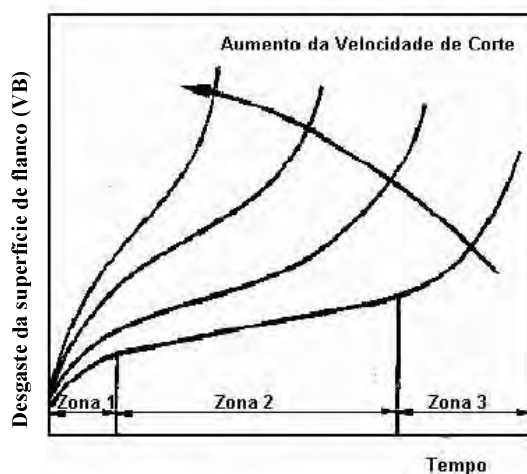


Figura 2.11 - Evolução do desgaste linear da superfície de folga e alteração da curva com o aumento da velocidade de corte (MESQUITA, 1988).

Analisando-se o comportamento do desgaste de flanco em função do tempo, pode-se verificar na figura 2.11, que no início do corte há uma região denominada zona 1 ou “primária”, onde o desgaste é rápido até o arredondamento da aresta, produzida pela elevada tensão aplicada no gume de pequena seção. No final desta região primária, surge a zona 2 ou “secundária”, onde o desgaste de flanco aumenta linearmente a uma taxa reduzida, crescendo de forma gradual, controlável e previsível.

Por último, na zona 3 ou “terciária”, quando VB for da ordem de grandeza de VBc (VB crítico) e, ao fim do tempo de corte t_c , o desgaste volta a aumentar muito rapidamente até a ruptura “catastrófica” da ferramenta de corte.

2.4.1 Desgaste Inicial

Dois materiais em contato suportam uma carga aplicada, distribuindo-a por algumas de suas irregularidades superficiais, que se apresentam na forma de protuberâncias ou asperezas. Inicialmente, a carga é sustentada sobre uma pequena área na interface destes materiais, definida pelas asperezas que se tocam. À medida que se desenvolve o processo de deslizamento, através da adesão do metal sobre a ferramenta, ocorre uma remoção parcial das asperezas em virtude do aumento da severidade das condições do corte.

Considerando-se que o carregamento aplicado neste período é constante e que as asperezas seguem sendo removidas, deve-se concluir que a rugosidade superficial inicial é alterada, aumentando a área real de contato dos materiais. Este acréscimo de área implica no decréscimo da pressão em cada uma das asperezas, alterando o comportamento do desgaste (KENDALL, 1995).

Schallbroch e Bethmann (1970) constataram que, no estado inicial o desgaste da superfície de folga aumenta progressivamente ocorrendo um polimento nas superfícies da ferramenta. Em trabalho mais recente, Rodrigues e Crnkovic (1998) confirmaram que, neste estado, mesmo com o crescimento do desgaste da superfície de folga da ferramenta, há uma recuperação da aresta de corte melhorando o acabamento superficial produzido nas peças.

2.4.2 Desgaste de Estado Constante

O desgaste de estado constante pode ser definido como o período da vida da ferramenta mais longo e previsível. Diversos mecanismos de desgaste como abrasão, oxidação, difusão e fragmentação, podem ocorrer quando os parâmetros de corte

encontram-se dentro da zona de segurança (figura 2.12). A presença destes mecanismos produz um aumento gradual do desgaste em relação ao tempo.

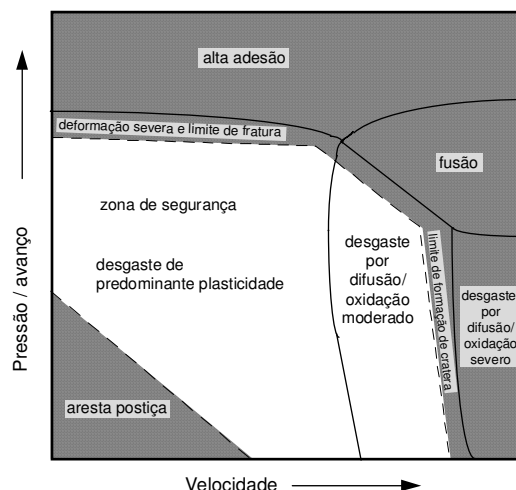


Figura 2.12 - Mapa de mecanismos de desgaste (LIM; ASHBY, 1987).

Abaixo desta região de segurança, onde o mecanismo de adesão seria predominante, a fusão ou o travamento mecânico dos materiais em contato é uma possibilidade, podendo causar a falha definitiva da ferramenta de corte. Uma vez dentro da região e sendo o mecanismo de plasticidade o dominante, pequenas partículas da superfície da ferramenta são mecanicamente deformadas e fraturadas. Este mecanismo, chamado abrasão, é o processo de desgaste mais comum, podendo ocorrer sobre as superfícies de folga e de saída da ferramenta (KENDALL, 1995).

Altas temperaturas e pressões causam o aumento da movimentação dos átomos, acelerando a transferência de elementos da superfície da ferramenta para o cavaco, produzindo um desgaste nesta região de contato. A ferramenta está sujeita à máxima temperatura na superfície de saída a uma pequena distância da aresta de corte, facilitando a ocorrência do desgaste em cratera, onde o mecanismo dominante é frequentemente por difusão (KRAMER; SUH, 1980).

Quando o carregamento solicitado resultar em impactos cíclicos com variações térmicas da ferramenta, surgirá a possibilidade da geração de trincas sobre a aresta de corte e sua posterior fragmentação. Este desgaste, por fragmentação da aresta, é mais comumente observado no corte intermitente.

2.4.3 Desgaste terciário

O desgaste terciário caracteriza-se por ser o último período da ferramenta e suas superfícies encontra-se em estágio avançado de desgaste, podendo ter alterações significativas em sua geometria inicial (RODRIGUES; CRNKOVIC, 1997).

Estas alterações proporcionam o aumento rápido da pressão e da temperatura na região de contato peça/ferramenta, de tal forma que o desenvolvimento do desgaste é acelerado, levando à destruição da ferramenta. Neste ambiente de extrema severidade torna-se impossível qualquer controle ou previsão do comportamento do desgaste de flanco em função do tempo.

Alguns autores explicam esta fase do desgaste identificando mudanças no mecanismo dominante de desgaste. Takeyama e Murata (1963) explicam que, inicialmente, um desgaste do tipo por adesão com transferência de metal predomina e pela forte dependência da temperatura, passa a envolver a difusão química, a oxidação e outras reações, além da adesão. Mais recentemente, Kendall (1995) confirma que a plasticidade dominante dá lugar à oxidação/difusão.

De acordo com Bhattacharyya e Ham (1969), a temperatura na interface de contato aumenta proporcionalmente ao desgaste VB, existindo um valor crítico para esta temperatura (θ_c), a partir da qual a taxa de desgaste aumenta subitamente até atingir a ruptura “catastrófica”.

Ultrapassando-se o valor crítico VB_c , o desgaste passa a depender fortemente da temperatura e a taxa de desgaste aumenta abruptamente. Segundo Cook (1973), a dependência do desgaste com a temperatura nesta região, não é linear e sim exponencial, pois um pequeno aumento de VB pode provocar um acréscimo da temperatura na zona desgastada, que por sua vez aumenta de forma considerável a taxa de variação de VB. É o desgaste acelerado da superfície de folga que acontece, quando se trabalha a altas velocidades de corte ou quando o desgaste acumulado atinge valores muito elevados.

2.5 EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA USINADA EM FUNÇÃO DO TEMPO

A rugosidade superficial, da peça obtida no processo de usinagem, é formada por sulcos e marcas resultantes do contato da ferramenta com o material de trabalho. Diversos fatores influenciam os valores desta rugosidade, desde a geometria da ferramenta, dos parâmetros de corte, das características do material a ser usinado, até fatores relativos à construção e instalação do equipamento em uso no processo.

Algumas solicitações exigidas de um produto podem ser atendidas pela condição do acabamento superficial de seus componentes. A especularidade ou “espelhamento”, a precisão e tolerância, o escoamento de fluidos bem como as resistências à corrosão, ao desgaste e à fadiga, têm uma relação direta com a rugosidade superficial, que através da medição de seus valores, no processo de fabricação, podem atender às solicitações de projeto (GONZÁLES, 1997).

Trabalhos anteriores (SANDVIKEN, 1994 e FERRARESI, 1970), afirmaram que o crescimento do desgaste da superfície de folga da ferramenta de corte tem influência direta no aumento da rugosidade superficial da peça usinada. Wilkinson et al. (1997), também verificaram este comportamento em seus experimentos, mas observaram em alguns dos testes de usinagem a ocorrência de reduções nos valores da rugosidade superficial, conforme ilustrada na figura 2.13.

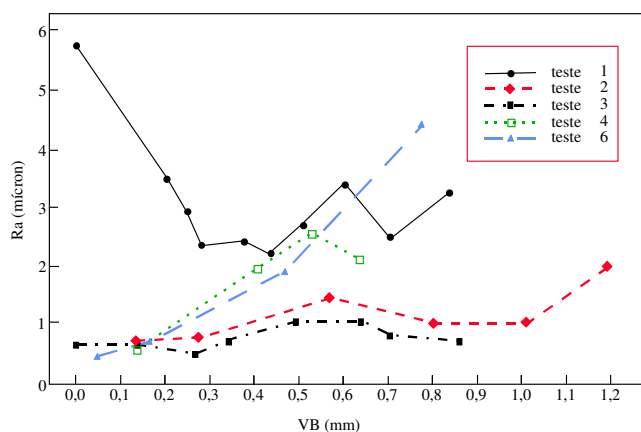


Figura 2.13 Valores Ra em função do desgaste de flanco VB para alguns testes de fresamento frontal (WILKINSON et al., 1997).

2.6 INFLUÊNCIA DAS INCLUSÕES

O desgaste da ferramenta de corte pode ser influenciado positivamente pela presença das inclusões no material de trabalho, quando no processo de usinagem sobre as superfícies da ferramenta estas inclusões formam uma camada lubrificante, protegendo a superfície, diminuindo o coeficiente de atrito e resultando em uma menor adesão. Influências negativas também podem ser sentidas, quando as inclusões são partículas duras, que deslizando sobre as superfícies da ferramenta agem como elementos abrasivos, acelerando o mecanismo de desgaste (CHIAVERINI; 1984).

Os fatores benéficos à vida da ferramenta estão associados a algumas inclusões dos tipos sulfetos e óxidos (MnS , $MnCaS$, SiO_2 , MnO) que formam finas camadas sobre as superfícies de saída e de folga, protegendo-as. As prejudiciais são os carbeto metálicos e alguns óxidos (CrC , Mn_3C , TiC , Al_2O_3) (COLPAERT; 1974).

Entretanto, em contraposição ao exposto, Thoors; Chandrasekaran e Ölund (1993), na usinagem de aços com pastilhas cermet de $TiCN$ a altas temperaturas, verificaram que as camadas das inclusões de MnS e $MnCaS$ reagem com o Ti formando soluções sólidas moles e deste modo aumentam a taxa de desgaste.

2.7 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

A evolução dos materiais para ferramentas tem avançado através dos tempos, onde se procura desenvolver e combinar as propriedades mencionadas anteriormente. Taylor (1907), realizou experimentos com ferramentas de barra em aço ao carbono, conseguindo melhorar as qualidades deste aço para a usinagem e iniciando ao desenvolvimento dos aços rápidos. Materiais como ligas não ferrosas, cerâmicos (óxidos metálicos), carbeto metálicos (metal duro), substratos recobertos, nitreto de boro cúbico e diamantes policristalinos representam a continuidade da evolução dos materiais constituintes das ferramentas de corte. Atualmente, no corte de metais com remoção de cavaco são utilizados, em grande quantidade, o metal duro e os aços rápidos, recobertos ou não.

MARCONDES (1990), relata que uma contribuição significativa à usinagem foi dada a partir da Segunda Guerra Mundial, pelos carbetos cementados ou também chamados de carbetos sinterizados, obtidos pelas técnicas da metalurgia do pó. Esta contribuição ocorreu, devido às propriedades de alta dureza a frio e a quente, boa estabilidade química, grande resistência ao desgaste e baixo atrito, o que tornou estes carbetos mais utilizados, por proporcionarem grandes aumentos nas velocidades de corte.

Os carbetos sinterizados apresentados na forma de pastilhas quadradas, triangulares, rômbricas (losangulares), redondas e outras, podem ser retificados conforme necessidade do trabalho desejado, e são compostos principalmente por carbetos metálicos de tungstênio (WC), titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC), com a presença de um aglomerante que geralmente é o cobalto (Co). A variação percentual do cobalto juntamente à adição de um ou mais destes carbetos, determina a sua faixa de uso, ou seja, qual o grupo de materiais a ser usinado (SANDVIKEN, 1994).

A uniformidade da distribuição dos grãos bem como o tamanho médio destes, que devem ser menor que $3\mu\text{m}$, segundo Goh et al. (1997), são outras características que podem influenciar no processo de usinagem e no bom desempenho da ferramenta.

A boa seleção do material para ferramenta é uma tarefa difícil, pois não basta que o material escolhido possa trabalhar em altas velocidades de corte, objetivando tempos reduzidos de usinagem, mas também se devem analisar os custos de aquisição, das trocas ou, quando for o caso, das reafiações das ferramentas.

A escolha do material, portanto, deve ser fruto de um balanceamento entre o fator custo e a questão técnica. Do ponto de vista técnico, a dificuldade de escolha reside no fato da existência de um grande número de materiais com características próprias, apresentando vantagens e desvantagens em suas aplicações.

2.7.1 Principais propriedades dos materiais para as ferramentas de corte

2.7.1.1 Dureza a altas temperaturas

No processo de corte, as deformações e o atrito do cavaco nas superfícies da ferramenta liberam uma grande quantidade de calor, elevando a temperatura e diminuindo a dureza do material constituinte da cunha de corte. Preservar as características de dureza, em valores os mais próximos possíveis aos iniciais, é muito importante, pois a dureza de um material cortante deve ser maior que a do outro a ser cortado (MICHELETTI, 1980).

2.7.1.2 Resistência ao desgaste

Dependendo da temperatura na ferramenta durante a operação de usinagem, um ou mais dos mecanismos de desgaste estão presentes, podendo acelerar o processo de desgaste ocasionando a troca da ferramenta. A afinidade química entre os materiais em contato no corte bem como a presença de inclusões duras na peça usinada, também influenciam na velocidade de deterioração da cunha de corte (RODRIGUES, 1997).

2.7.1.3 Tenacidade

Capacidade para absorver energia na região plástica. É necessária para evitar a ruptura da aresta de corte por fragilidade, aliada à boa capacidade de resistência ao desgaste e à dureza do material da ferramenta (CHIAVERINI, 1970).

2.7.1.4 Atrito

Busca-se um baixo coeficiente de atrito, pois se limitando esta fonte geradora de calor aumenta-se a durabilidade da ferramenta (CSELLE, 2001).

2.7.1.5 Propriedades Térmicas

O baixo coeficiente de dilatação é importante para a estabilidade dimensional da pastilha. A condutibilidade pode ajudar a evitar a concentração de calor na região de corte (MICHELETTI, 1980).

2.7.2 Propriedades dos revestimentos das ferramentas de corte

Há mais de 30 anos uma fina camada de TiC, da ordem de alguns micrometros, foi depositada sobre um substrato de metal duro, resultando em um aumento da velocidade de corte e da vida da ferramenta. Daí em diante, vários materiais como revestimento foram experimentados, com resultados extremamente satisfatórios.

Atualmente, o nitreto de titânio (TiN), o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carbetto de titânio (TiC) e o carbonitreto de titânio (TiCN), o diamante policristalino (PCD) e o nitreto de alumínio titânio (TiAlN) constituem uma gama de revestimentos de larga utilização (SCHULZ et al., 2000). Mais recentemente Abele e Dörr (2002), informam que novos materiais (TiAlCN e TiAlCrN) estão em desenvolvimento, indicando que as investigações continuam.

Faz-se importante salientar, que independente do material escolhido para revestir uma ferramenta, a espessura de sua camada não deve ultrapassar 0,005 mm, pois se percebeu, experimentalmente, que camadas mais espessas não melhoram o desempenho da pastilha (SCUSSEL, 1994 e SANDVIKEN, 1994).

Os sistemas multicamadas tiveram grande impulso em meados da década de 90, e representaram um grande avanço tecnológico. Ainda hoje, diversas aplicações se beneficiam de uma camada bastante estável, em presença de temperatura elevada, permitindo a usinagem sem refrigeração, através de seu bom nível de tensões residuais, que permitem boa tenacidade diante de usinagem com corte interrompido, e das propriedades refratárias ao calor (CAMPOS JUNIOR; 2002).

Estes sistemas multicamadas foram desenvolvidos com o objetivo de aproveitar as principais características de cada camada envolvida, conforme figura 2.14. As combinações de melhores resultados são as de TiC-TiCN-TiN e TiC- Al_2O_3 -TiN, onde se recomenda que a espessura total do revestimento múltiplo não deve ser superior a 12 μm , pois pode ocorrer uma fragilidade originando pequenos lascamentos nas camadas (KOMANDURI, 1994).

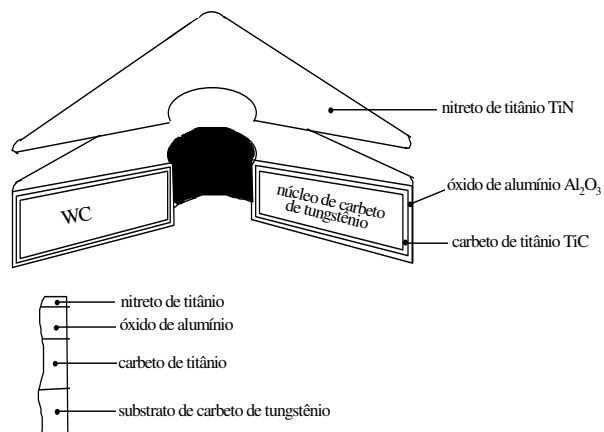


Figura 2.14 Representação esquemática em corte de uma pastilha de metal duro com revestimento triplo de TiC-Al₂O₃-TiN (DEGARMO, 1999).

Os materiais mais usados, para revestimentos múltiplos de carbeto cementado, são aqueles que claramente apresentam as melhores propriedades individuais, mantendo-as na interação com outras camadas de materiais diferentes. As melhores características dos principais materiais para revestimento de ferramentas serão descritas a seguir.

2.7.2.1 Carbonitreto de titânio (TiCN)

A excelente capacidade de aderência ao substrato de metal duro e a outras camadas de revestimento, aliada a valores semelhantes de seus coeficientes de expansão térmica, proporcionam uma forte barreira à formação de trincas quando do resfriamento no processo CVD de revestimento (SEMIATIN; SOPER; SHIVPURI, 1994).

Estas características juntamente com uma boa tenacidade e baixa resistência ao desgaste por difusão, devido à presença do carbono na molécula de TiCN, são justificativas para o seu uso preferencial como camada intermediária do substrato e outros revestimentos.

Dos materiais mais usados para revestir ferramentas de corte, o TiCN apresenta elevados valores de dureza o que lhe concede grande resistência ao desgaste de flanco, onde predomina o mecanismo de desgaste por abrasão (SCHULZ et al., 2000).

2.7.2.2 Carbetto de titânio (TiC)

As propriedades são bastante similares ao TiCN, diferindo basicamente por apresentar um coeficiente de atrito inferior, o que possibilita também a sua utilização como camada única de revestimento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

As conclusões obtidas experimentalmente por Scholl (1997), ratificam a excelente capacidade de camada base para os revestimentos de nitreto de titânio (TiN) e óxido de alumínio (Al_2O_3), pois estas composições melhoram a resistência ao desgaste da superfície de saída (cratera) e de folga (flanco).

2.7.2.3 Óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3)

A sua elevada dureza à quente associada a alta resistência à oxidação, confere a este material a condição de mais eficiente na resistência ao desgaste de cratera. Funciona também, como barreira às reações químicas e à difusão devido a sua estabilidade química a altas temperaturas e, por ter baixa condutividade térmica, protege a ferramenta do calor gerado no corte (GOH; 1996). Estas características, explicam porque o principal uso da alumina é como camada intermediária em pastilhas multi-revestidas (ABELE; DÖRR, 2002; KENDALL, 1994).

2.7.2.4 Nitreto de titânio

Apresenta exímia capacidade de aderência a uma grande variedade de materiais para substratos e revestimentos, melhor barreira às reações químicas que o TiC e TiCN. No entanto, qualidades como um baixo coeficiente de atrito e melhor tenacidade, são os fatores determinantes que concedem a este revestimento a condição de um dos mais utilizados industrialmente (LEWIS, 1989; PRENGEL; PFOUTS; SANTHANAM, 1996).

2.7.2.5 Nitreto de alumínio titânio

O TiAlN, segundo Abele e Dörr (2002), é o mais recente e o mais eficiente dos materiais para revestimento, por isso mesmo, apresenta grande potencial de evolução.

Com níveis compatíveis de dureza e coeficiente de atrito ao TiCN e TiN, porém com capacidade mais elevada de resistir à difusão e oxidação, este revestimento vem apresentando maior desempenho no corte com remoção de cavaco (SCHULZ et al., 2000; WITTING, 2002).

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CORPOS-DE-PROVA

3.1.1 Material dos corpos-de-prova

O material utilizado para a confecção dos corpos-de-prova foi o aço ABNT-1050, adquirido em um lote de 16 barras trefiladas de 6 m de comprimento e seção circular com diâmetro de 41,275 mm. Exigiu-se do fornecedor que este material fosse proveniente do mesmo lote de produção (corrida controlada), objetivando desta forma diminuir a heterogeneidade em sua microestrutura e composição química, diminuindo assim o universo de variáveis existentes no processo de usinagem.

As barras de aço ABNT-1050 foram cortadas em cilindros (tarugos) de comprimento aproximado de 118 mm e posteriormente usinados na forma final do corpo-de-prova, ou seja, com diâmetro de 32 mm, comprimento útil de corte de 100 mm e tolerância de mais ou menos 0,1 mm para cada dimensão.

3.1.2 Análise de dureza do material dos corpos-de-prova

As amostras do aço ABNT-1050 para os ensaios de dureza foram cortadas de 8 barras aleatoriamente no comprimento aproximado de 22 mm e, posteriormente, faceadas no torno para 20 mm. Três medidas de dureza na escala Brinell, para cada amostra, foram realizadas em um durômetro da marca Otto Wolpert-Werke (Wtestor), do tipo Dia Testor 2Rc.

3.1.3 Análise microscópica

A análise por microscopia ótica foi realizada em uma amostra selecionada aleatoriamente das barras, embutida a frio e lixada em uma seqüência granulométrica

de 220, 320, 400 e 600, com posterior polimento em pasta de óxido de alumínio e, por último, atacada com nital 2%, como recomendado para aços carbono.

Por intermédio de um banco metalográfico Neophot 30, foram efetuadas observações qualitativas e quantitativas de aspectos microestruturais, tais como: fases presentes, inclusões e frações volumétricas.

Foram realizadas inicialmente observações da microestrutura, registrando-se imagens das amostras preparadas, para caracterização das fases presentes. As frações volumétricas da perlita e da ferrita foram determinadas pela técnica da contagem de pontos, utilizando-se o software UTHSCSA Image Tool versão 1.27 e a identificação das inclusões dos tipos sulfetos finos e óxidos globulares, por comparação com figuras padrões da norma E-45 da ASTM.

3.1.4 Análise química

As análises químicas de quatro amostras do aço ABNT-1050 foram realizadas no “Laboratório de Análises Químicas - TPCQ” da Confab, nos seguintes equipamentos: CS 125 - LECO, TC 436 - LECO, SPECTRO FLAME (ICP) SEQUÊNCIAL e SPECTRO CAST.

3.2 FERRAMENTAS

3.2.1 Material e geometria

As pastilhas, escolhidas por serem de larga utilização industrial, são classificadas como positivas rômicas de 55° da classe “P-20” ISO, e segundo o fabricante são constituídas por um núcleo de metal duro WC, revestido com uma primeira camada de TiC, uma segunda de Al₂O₃, e por último, uma camada externa de TiN. Indicadas para acabamento de aços em geral no processo de torneamento.

Para facilitar o entendimento deste trabalho e, em virtude de cada pastilha utilizada ser constituída por duas arestas de corte, considerou-se ter o mesmo

significado os termos ferramenta de corte, aresta de corte e pastilha, seguidos ou não pelo número de identificação e correspondente a um determinado ensaio.

3.2.2 Caracterização das ferramentas

3.2.2.1 Preparação das amostras metalográficas

Para avaliação metalográfica, duas ferramentas novas usadas como amostras foram seccionadas, segundo um ângulo de 90° à aresta de corte, em uma serra de precisão (Isomet 1000) utilizando-se um disco diamantado. A velocidade de avanço do disco utilizada foi de 1 mm/min com rotação de 100 rpm. O sentido de corte do disco foi orientado visando a aplicação de um esforço de compressão nas camadas de recobrimento sobre o substrato (figura 3.1), evitando assim o surgimento de lascamentos e deformações nos revestimentos.

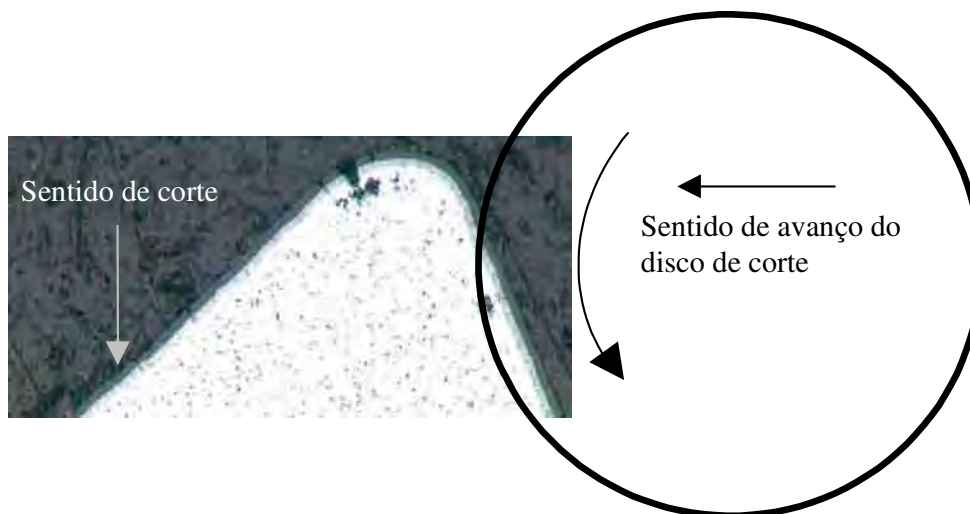


Figura 3.1 – Representação da posição relativa da amostra e disco de corte.

O embutimento das amostras foi feito à quente com resina baquelite e posteriormente foram polidas em um equipamento automático, com controle de carga, cuja seqüência de preparação está descrita na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de preparação das amostras.

Abrasivo [μm]	Força [N]	Rotação [rpm]	Tempo [min]
40	25	200	10
20	25	200	10
15	25	200	10
9	25	200	10
6	25	200	10
3	25	200	10
1	10	100	10
1	-	100	10
0,25	-	100	10

3.2.2.2 Ataque químico

Para auxiliar a visualização dos carbonetos e do elemento ligante, e conseqüentemente para avaliação qualitativa e quantitativa do substrato, foi utilizado o reagente químico denominado Murakami, composto por 10g $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$, 10g de KOH e 100ml de água destilada. As amostras foram expostas a este ataque pelos tempos de 5s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min e 8 min.

3.2.2.3 Microscopia

Foram determinadas por microscopia óptica (MO) as fases presentes e o tamanho médio dos grãos de WC no substrato, assim como as espessuras das camadas de recobrimento. Utilizou-se um Microscópio Óptico modelo “EPIPHOT 200” da marca “NIKON”, pertencente ao laboratório do DMT/FEG. As frações volumétricas do carboneto de tungstênio (WC) e do cobalto foram determinadas pela técnica da contagem de pontos, pelo uso do software UTHSCSA Image Tool versão 1.27.

Com o microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo “DSN/950” da marca “ZEISS” no laboratório do IAE/CTA, foi verificada a presença de vazios e trincas, ou seja, uma descontinuidade nos revestimentos e, por espectroscopia de energia dispersiva (EDS - *energy dispersive spectroscopy*) foram identificados os elementos químicos presentes no substrato e no recobrimento da amostra.

3.3 ENSAIO DE USINAGEM

Os ensaios de usinagem foram realizados em um Torno EMCO T-120 de potência útil de 2,6 kw, e equipado com um Comando Numérico Computadorizado - Emcotronic T1. Logo após a execução de cada ensaio, as pastilhas foram devidamente protegidas pela aplicação de esmalte, contra possíveis contaminações, e alocadas de maneira a evitar prováveis fraturas no transporte.

Para o torneamento contínuo e a seco do aço, todos os parâmetros de corte e critérios adotados no presente trabalho, foram escolhidos em função da utilização prática no “Chão de Fábrica” e obtidos pela combinação de cálculos com valores do manual eletrônico “CoroGuide”. Os parâmetros de corte selecionados para os ensaios foram: profundidade de usinagem $a_p = 0,5$ mm, avanço $f = 0,15$ mm/rot e a velocidade de corte $v_c = 297$ m/min.

O comportamento da rugosidade superficial em relação ao número de peças usinadas, conforme ilustrado na figura 3.2, é o resultado de pesquisa anterior (RODRIGUES; CRNKOVIC, 1997) que mostra mudanças de direção em várias regiões das curvas. Buscando relacionar estas inflexões com as superfícies de incidência desgastadas, 06 posições foram escolhidas e encontram-se indicadas na figura 3.2.

Cada uma das 6 posições escolhidas corresponde a um número de peças produzidas e a um tempo de usinagem. Para cada um destes períodos de tempo duas diferentes arestas de corte foram testadas e, estão apresentadas na tabela 3.2. A ferramenta F3, por exemplo, foi solicitada no teste de usinagem durante um tempo de 6,14 min, e este teste foi repetido com a utilização de uma outra ferramenta, a F9.

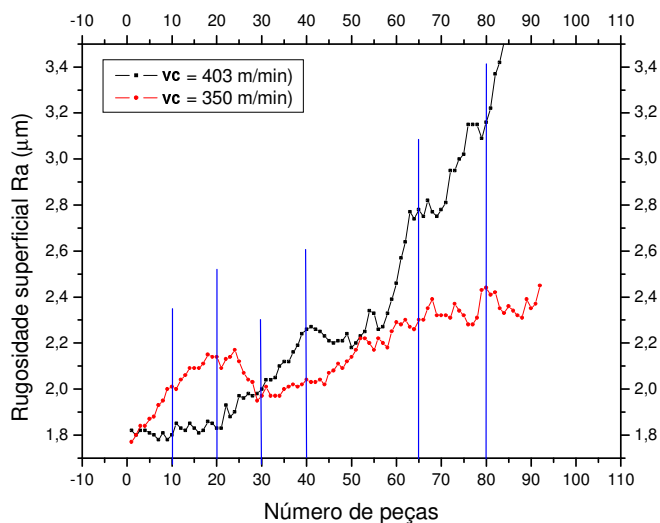


Figura 3.2 - Rugosidade em função do número de peças (RODRIGUES; CRNKOVIC, 1997).

Tabela 3.2 – Tempo de usinagem solicitado para cada ferramenta de corte.

FERRAMENTA		NÚMERO DE PEÇAS USINADAS	TEMPO DE CORTE
F1	F7	10	2,2 min
F2	F8	20	4,1 min
F3	F9	30	6,14 min
F4	F10	40	7,9 min
F5	F11	65	14,2 min
F6	F12	80	18,6 min

3.4 MEDIDAS DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DOS CORPOS-DE-PROVA

Após a estabilização térmica das peças de cada lote usinado, foram realizadas três medidas da rugosidade superficial para cada corpo-de-prova, ou seja, a cada 100mm percorrido pela ferramenta, três valores da rugosidade foram mensurados. Estas medidas foram obtidas pelo uso do rugosímetro SURFTEST-301 (MITUTOYO), ajustado com parâmetro de medição “Ra” (μm) e um comprimento de amostragem de 4 mm.

3.5 ANÁLISE MICROSCÓPICA DO DESGASTE DE FLANCO

As superfícies de folga, das ferramentas de corte multi-revestidas, utilizadas para análise de microscopia eletrônica de varredura, foram examinadas com ampliações de 120 a 2500 vezes, tanto no modo de elétrons secundários quanto no modo de elétrons retroespalhados.

Dentre as arestas de corte solicitadas nos ensaios, selecionou-se uma ferramenta para cada condição de tempo aplicado, totalizando a quantidade de seis arestas micrografadas eletronicamente. Estas também foram investigadas utilizando-se a técnica EDS, com o objetivo de detectar os elementos químicos presentes nas superfícies desgastadas.

Para facilitar esta avaliação geral do desgaste de flanco, dividiu-se a área analisada da ferramenta envolvida no corte, em três zonas ou regiões distintas, conforme indicado na figura 3.3, que a saber serão assim definidas:

- Região 1** - Aresta principal de corte ou gume cortante,
- Região 2** - Extensão do desgaste de flanco – Faixa intermediária com área de coloração escura e divisória das regiões 1 e 3,
- Região 3** - Acúmulo de produtos do desgaste – Falso recobrimento ou Franja, material sobreposto à superfície de folga.

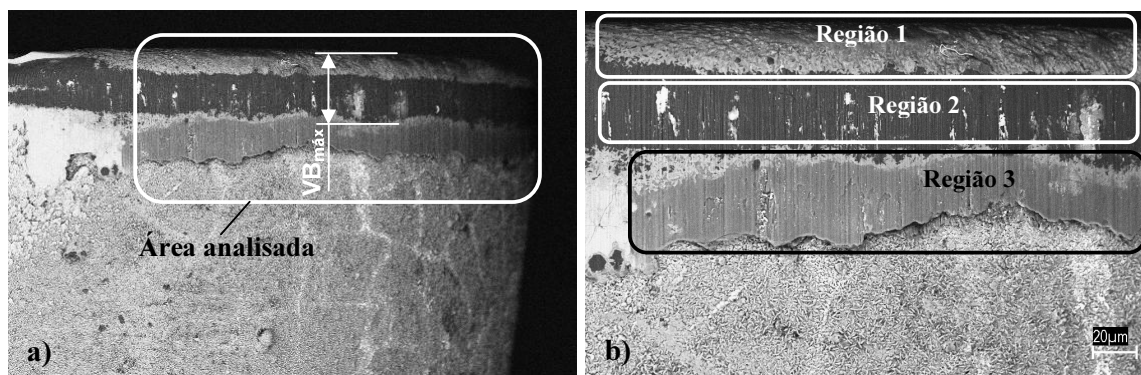


Figura 3.3 – (a) Demarcação da área analisada; (b) Identificação de cada região.

As imagens registradas por microscopia eletrônica de varredura, seguiram um critério previamente estabelecido. Baseando-se em análises prévias de algumas imagens, pode-se constatar qual seria a melhor forma de proceder para os exames das superfícies desgastadas. Cada uma das regiões, definidas anteriormente, foi investigada por uma seqüência de ampliações que permitisse uma melhor observação dos detalhes encontrados e, também, que facilitasse as comparações de particularidades entre ferramentas diferentes.

Medidas de $VB_{máx}$ realizadas em imagens ampliadas dos desgastes de flanco, com o uso de um programa do tipo CAD (computer aided design), foram possíveis devido a existência da impressão da escala nas fotos, o que propiciou estabelecer uma relação direta de proporcionalidade. Assim, por meio dos valores medidos nestas imagens, pôde-se chegar a valores reais dos desgastes de flanco.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo objetivam-se à exposição e discussão dos resultados obtidos nos ensaios de usinagem do aço ABNT-1050 com ferramentas de metal duro triplo-revestido pelas camadas de carbeto de titânio (TiC), alumina (Al₂O₃) e nitreto de titânio (TiN).

Além disso, busca-se apresentar os valores do desgaste de flanco das pastilhas e da rugosidade superficial da peça usinada, seus comportamentos em função do tempo de usinagem bem como identificar os mecanismos de desgaste atuantes neste processo de corte, na busca do estabelecimento de uma relação plausível, baseando-se na análise das morfologias das regiões desgastadas nas ferramentas de corte, estabelecendo uma ampla discussão.

4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Resultados da caracterização do material da peça trabalho

4.1.1.1 Composição química

As análises realizadas, em 04 amostras das barras de aço de seção circular, apresentaram a seguinte composição química em peso, cujos valores estão apresentados na tabela 4.1.

Conforme se pode verificar nesta tabela 4.1, as variações encontradas nos percentuais em peso dos elementos químicos presentes nas amostras, não são significativas, caracterizando o material a ser usinado como um aço ao carbono hipoeutetóide e classificado como ABNT 1050.

Tabela 4.1 - Composição química nas amostras do aço

Elementos Químicos	% em peso na Amostra			
	1	2	3	4
C	0,50	0,49	0,49	0,49
S	0,044	0,045	0,045	0,042
Al	0,001	0,001	0,002	0,001
P	0,037	0,036	0,036	0,033
Si	0,21	0,21	0,21	0,21
Mn	0,67	0,67	0,68	0,68
Nb	0,002	0,001	0,001	0,001
Ti	0,0015	0,0015	0,0016	0,0015
V	0,002	0,002	0,002	0,002
Cu	0,14	0,14	0,14	0,14
Cr	0,08	0,08	0,08	0,08
Mo	0,014	0,014	0,014	0,014
Ni	0,056	0,060	0,060	0,060

4.1.1.2 Dureza

Estão apresentados na tabela 4.2 os resultados de três medidas de dureza Brinell, realizados em cada uma das oito amostras selecionadas, suas médias e desvios padrão. Apresenta-se também, a média e o desvio padrão relativos a todos valores obtidos nestes ensaios de dureza.

Conforme se pode verificar nesta tabela 4.2, não são encontradas variações significativas das medidas de dureza Brinell nas amostras selecionadas do aço a ser usinado, estando os valores entre os limites de 210 a 236 HB/62,5/2,5/30. O valor global da média e do desvio padrão são respectivamente 224 HB/62,5/2,5/30 e 9,38, sendo valores considerados normais para ensaios de dureza Brinell.

Tabela 4.2 - Dureza Brinell das amostras selecionadas

amostras	Dureza Brinell (HB/62,5/2,5/30)			Por amostra	
	1	2	3	Média	Desvio padrão
1	228	228	228	228	0,00
2	234	234	234	234	0,00
3	234	234	236	235	1,15
4	210	216	210	212	3,46
5	228	228	228	228	0,00
6	210	210	210	210	0,00
7	216	228	228	224	6,93
8	216	228	216	220	6,93
Todos valores de dureza	Média			224	-----
	Desvio padrão				9,38

4.1.1.3 Inclusões

Analisando-se a densidade e a forma das inclusões presentes no aço, conforme ilustrado na figura 4.1, por comparação com a norma E-45 (Plate I) da ASTM, podemos caracterizar as inclusões como:

a) Inclusões alongadas, assemelhadas a pequenos riscos, são do tipo sulfetos finos do número 2.

b) Inclusões pontuais, tal qual pequenos pontos, são do tipo óxidos globulares finos do número 1.

Nesta figura 4.1, observa-se a presença de inclusões no aço ABNT-1050 do tipo óxidos globulares em quantidade irrisória, o que minimiza a atuação como partícula abrasiva devido a sua alta dureza.



Figura 4.1 - Inclusões no aço ABNT-1050.

4.1.1.4 Análise microestrutural

Na figura 4.2 está ilustrada a microestrutura do aço ABNT-1050, evidenciando as fases presentes.

Analisando-se a microestrutura do material, conforme ilustra a figura 4.2, verificamos a presença de ferrita (campos claros) e de perlita (campos escuros), com frações volumétricas aproximadamente iguais (RODRIGUES; CRNKOVIC, 1998). A constatação desta composição de fases caracteriza o material como um aço no estado normalizado.

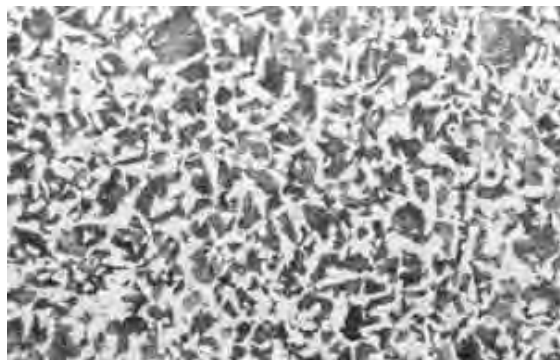


Figura 4.2 - Microestrutura do aço ABNT-1050 ilustrando a presença das fases ferrítica e perlítica.

4.1.2 Resultados da caracterização das pastilhas de metal duro multi-revestido

Utilizando-se o microscópio óptico e o microscópio eletrônico de varredura, em amostras sem ataque, é observada a existência de três camadas de recobrimento, cuja identificação foi realizada pelas análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) e apresentadas na figura 4.3.

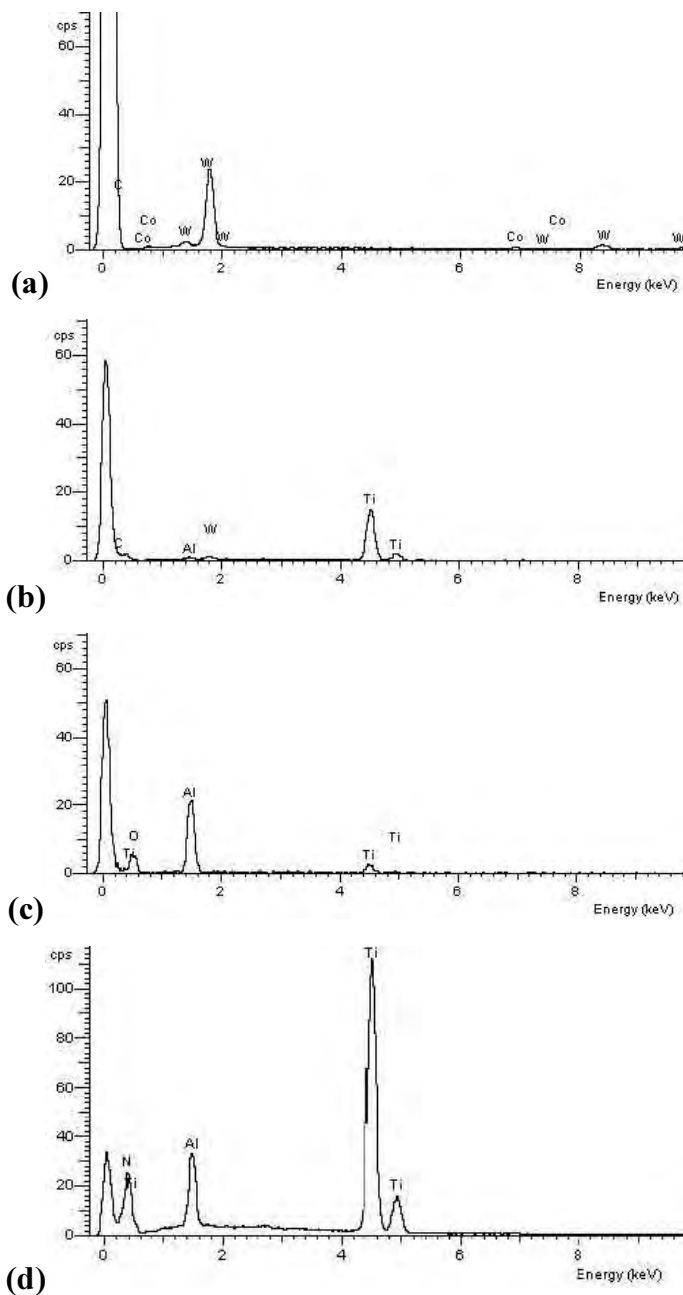


Figura 4.3 - Análises químicas por EDS: (a) Substrato; fase alfa (WC) e beta (Co); (b) carbeto de titânio (TiC); (c) alumina (Al_2O_3); (d) nitreto de titânio (TiN).

Na figura 4.4a observa-se que a primeira camada, na interface com o substrato, na coloração cinza clara é identificada como carbeto de titânio (TiC). A camada intermediária observada, na coloração cinza escura, caracteriza o óxido de alumínio (Al_2O_3). Finalmente, a camada externa em coloração clara e a mais fina das três identifica o nitreto de titânio (TiN).

A identificação da presença do carbeto de tungstênio (WC) e do metal cobalto (Co) no substrato é realizada da mesma forma, sendo que o carbeto aparece no tom claro (fase alfa) e o aglomerante em tonalidade escura (fase beta), conforme ilustra a figura 4.4c. A utilização da técnica EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), confirmou a presença de cada elemento químico indicado pelo fabricante, tanto no substrato quanto nos três revestimentos.

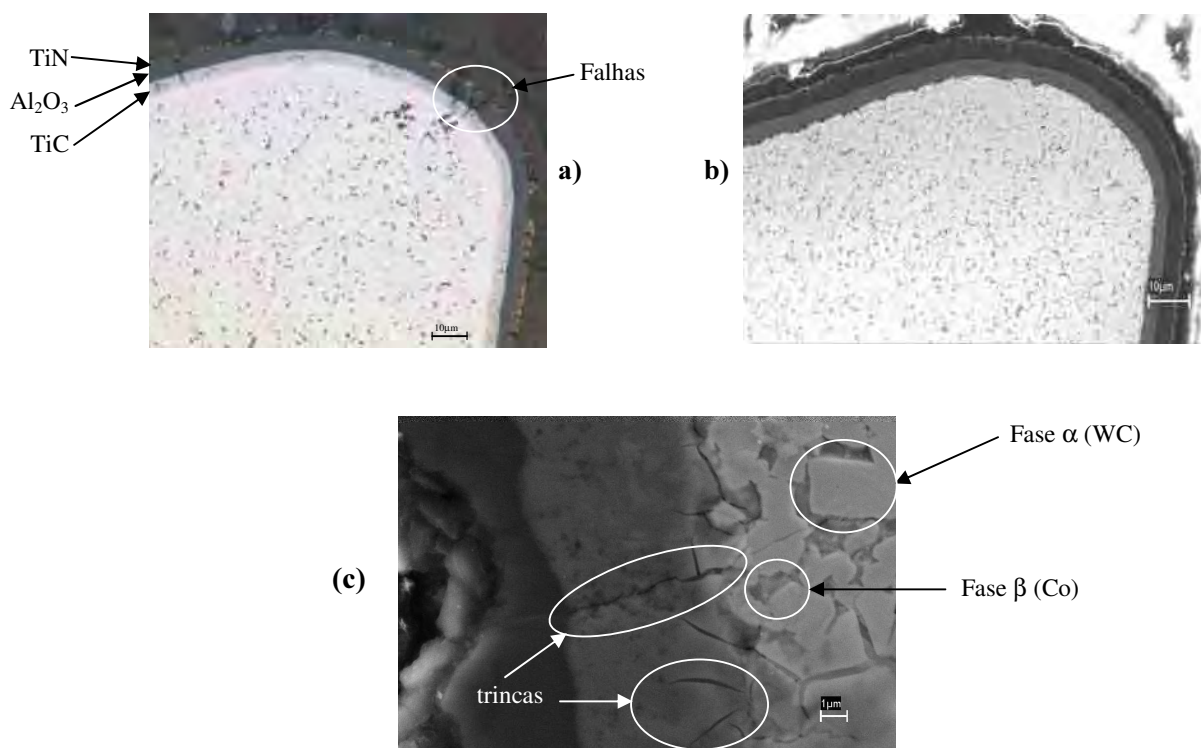


Figura 4.4 - Micrografia do substrato WC-Co e dos revestimentos de TiC, Al_2O_3 e TiN (sem ataque): a) microscopia óptica; b) microscopia eletrônica de varredura; c) microscopia eletrônica de varredura.

Na figura 4.4a, notam-se também vazios e trincas transversais às camadas, ou seja, a presença de falhas de continuidade na deposição do revestimento de TiN, ou

seja o recobrimento externo da ferramenta e a mais fina das três camadas. Observando-se a micrografia eletrônica por elétrons secundários da figura 4.4c, percebe-se que a visualização de trincas pela microscopia óptica não é frequentemente observada, pois de acordo com Lima (2001), dependendo da magnitude, as trincas são visíveis apenas por ilustrações da microscopia eletrônica de varredura.

A observação das micrografias eletrônicas por elétrons retroespalhados ilustradas na figura 4.5, revela que a superfície do revestimento de nitreto de titânio (TiN) de uma ferramenta nova, é repleta de poros e de vazios revelando abaixo a camada do óxido de alumínio (Al_2O_3).

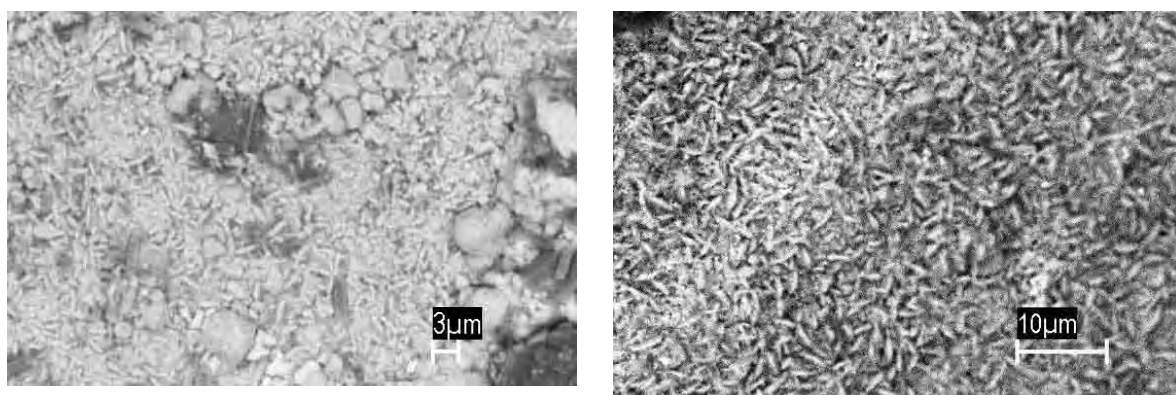


Figura 4.5 - Recobrimento de TiN de duas áreas distintas de uma pastilha nova. (MEV – Retroespalhado)

Uma vez que as camadas ficam bem definidas nas duas fotomicrografias, com aplicação de um programa de análise de imagens na micrografia óptica, as medidas das espessuras dos recobrimentos foram realizadas no microscópio óptico, cujos resultados estão apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Espessura média dos revestimentos de TiC, Al_2O_3 e TiN

Camada	Média (μm)	Desvio Padrão
TiC	3,40	0,19
Al_2O_3	3,89	0,19
TiN	0,71	0,14

Das amostras atacadas com Murakami, a que apresentou melhor definição dos grãos de WC, foi obtida com um tempo de exposição de 4 minutos (figura 4.6). Da análise desta amostra pôde-se tratar e quantificar estatisticamente as frações volumétricas das fases presentes no substrato, cujos valores em percentual encontram-se na tabela 4.4. Em tempos de exposição da amostra menores que quatro minutos, ao reagente de Murakami, não foi observado um perfeito delineamento dos contornos de grão. Além disso, o contraste entre as fases WC e Co revela-se insuficiente. Para tempos superiores a quatro minutos percebeu-se que o reagente atacou parte do revestimento de TiC e demasiadamente a superfície da amostra, observando-se um aumento exagerado da espessura dos contornos de grão e um mascaramento na fração volumétrica das fases analisadas (RODRIGUES et al., 2004).

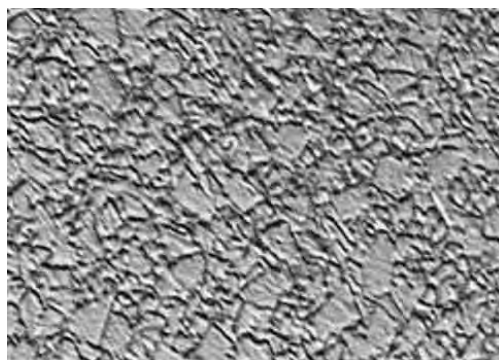


Figura 4.6 - Micrografia óptica do substrato WC-Co. Reagente Murakami. Tempo de exposição 4min.

Tabela 4.4 – Fração volumétrica das fases alfa (WC) e beta (Co) do substrato

Fração Volumétrica Substrato WC-Co		
Análise Estatística	Fase (%)	
	Co (beta)	WC (alfa)
Mínima	7,23	92,61
Máxima	7,39	92,77
Média	7,28	92,72
Desvio Padrão	0,07	0,08

Segundo Goh e colaboradores (1997), no processo de usinagem, o bom desempenho de uma ferramenta necessita de uma distribuição uniforme de grãos e estes devem ser menores que $3\mu\text{m}$. Das medidas do tamanho médio dos grãos de WC,

realizadas nesta investigação com auxílio de microscopia óptica (tabela 4.5), obtidas pela análise da micrografia do substrato, e adotando-se o método Jefferies (ENGQVIST; UHRENIUS, 2003), chega-se a um tamanho de grão “G” entre 15 e 16, que pela norma E112 da ASTM corresponde, a um diâmetro um pouco inferior a $3\mu\text{m}$.

Tabela 4.5 – Medidas do tamanho de grão médio do carbeto de tungstênio WC

Tamanho de Grão WC	
Análise Estatística	ASTM Grain Size: 'G'
Mínimo	15,47
Máximo	15,99
Média	15,73
Desvio Padrão	0,37

4.2 AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO (VB) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE USINAGEM

Os valores encontrados do desgaste de flanco (VB), medidos em cada uma das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios, e apresentados na figura 4.7, ilustram que o comportamento deste desgaste em relação ao tempo de usinagem, apresenta-se praticamente linear em três regiões distintas, onde em cada uma delas apresenta um gradiente de crescimento característico. Estes resultados estão de acordo com as afirmações feitas por Degarmo (1999) e Kramer (1995), cujo desenvolvimento do desgaste de flanco em função do tempo é definido em três estados com crescimentos praticamente constantes, sendo que no estado de desgaste inicial e final o gradiente de crescimento se faz de forma bastante elevada e entre estes de uma forma gradual previsível, caracterizando os mesmos como desgaste inicial ou primário, secundário e terciário ou catastrófico.

Os gradientes de crescimento de cada uma destas regiões citadas podem ser mais ou menos intensos, conforme se variam as condições de corte. Por exemplo, com o

aumento da velocidade de corte no processo, estes gradientes aumentam sensivelmente (SANDVIKEN, 1994).

Desta forma, verifica-se que o comportamento obtido para o desgaste de flanco da ferramenta de corte multi-revestida em função do tempo de usinagem do aço SAE 1050, é semelhante aos resultados obtidos por outros pesquisadores (MICHELETTI, 1980; KENDALL, 1995), que trabalharam com ferramentas sem revestimento, ou seja, com o material do substrato (WC-Co), o metal duro.

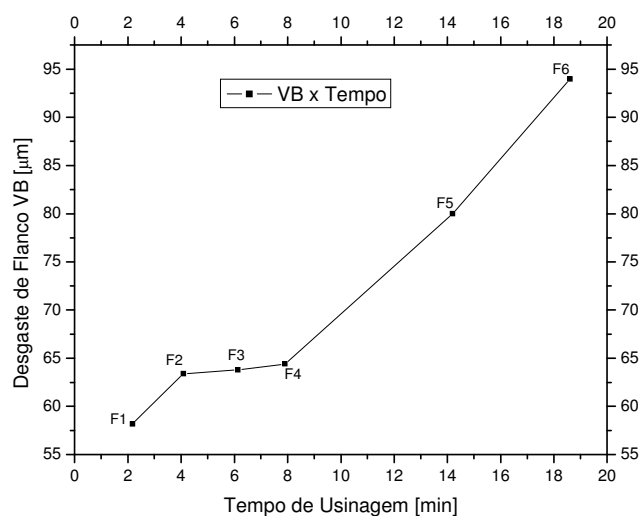


Figura 4.7 - Desgaste de Flanco (VB) das ferramentas de corte multi-revestidas em função do tempo de usinagem.

4.3 AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA DE TRABALHO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE USINAGEM

A rugosidade superficial da peça de trabalho obtida pela usinagem de cada uma das ferramentas multi-revestidas, relativas aos tempos de usinagem de 2,20 min (ferramenta 1), 4,09 min (ferramenta 2), 6,14 min (ferramenta 3), 7,90 min (ferramenta 4), 14,20 min (ferramenta 5) e 18,61 min (ferramenta 6), são ilustradas na figura 4.8 em função do tempo de usinagem.

Na figura 4.8, observa-se o crescimento da rugosidade superficial da peça de trabalho em função do tempo de usinagem, porém uma inflexão é notada no intervalo relativo a 6,14 minutos (ferramenta 3) até 7,90 minutos (ferramenta 4), caracterizando

um decréscimo significativo da rugosidade, ou seja, uma melhoria no acabamento da peça de trabalho quando da usinagem com a ferramenta de corte 4.

Degarmo (1999) e Kramer (1995) também realizaram estudos indicando que o crescimento da rugosidade superficial em função do tempo de usinagem é similar ao crescimento do desgaste de flanco com referência ao mesmo parâmetro. Porém das observações realizadas nas figuras 4.1 e 4.2, verifica-se uma discordância à esta tendência, indicada pela inflexão existente entre as ferramentas 3 e 4.

Wilkinson et al. (1997) confirmaram esta tendência, e de forma semelhante ao encontrado neste trabalho, também constataram que em alguns casos havia reduções dos valores da rugosidade.

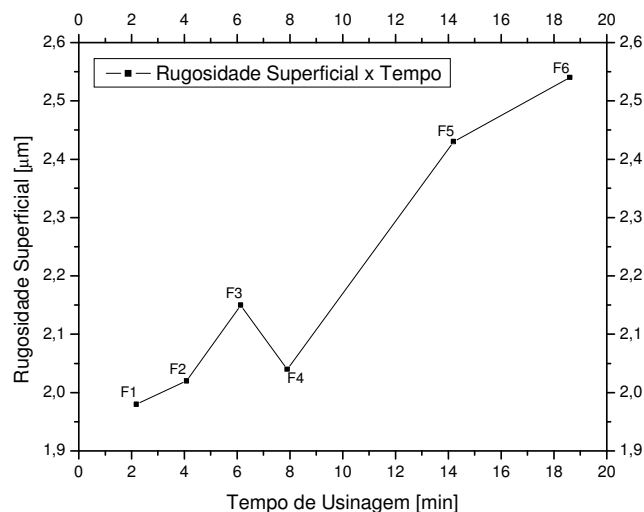


Figura 4.8 - Comportamento da rugosidade superficial final em função do tempo de usinagem.

Trabalhos anteriores (RODRIGUES; CRNKOVIC, 1998 e 2002) notificam resultados que corroboram com os aqui apresentados, ressaltando ainda a presença de várias inflexões nas curvas descritas pelos comportamentos da rugosidade superficial versus tempo, para cada pastilha utilizada. Nestes trabalhos, as falhas prematuras dos revestimentos e as alterações geométricas das ferramentas, foram indicadas como prováveis causas destas inflexões, podendo produzir significativas variações da

rugosidade superficial das peças usinadas, além de provocar uma redução na vida da ferramenta.

4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE MICROGRÁFICA DAS SUPERFÍCIES DE FOLGA DESGASTADAS

Analisando-se as superfícies de folga desgastadas das ferramentas de corte, utilizando-se as micrografias eletrônicas de varredura por elétrons retroespalhados, e levando-se em consideração que o desgaste de flanco (VB) acentua-se em relação ao tempo de utilização destas pastilhas, alguns detalhes podem ser observados com melhor definição ou não. Com o crescimento das dimensões de VB, que aumentam de acordo com o tempo de uso da ferramenta, pequenas avarias, trincas finas ou mais espessas, grandes manchas claras e variações na topografia da região desgastada, podem ser verificadas nas ferramentas. As análises das superfícies de folga foram realizadas para cada uma das ferramentas, com o uso das micrografias eletrônicas de varredura e pelas análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy).

As observações gerais, relativas às superfícies de folga desgastadas, referenciam-se na divisão da área analisada (figura 4.9a), ou seja, a zona de contato da ferramenta envolvida no corte do aço, em três regiões distintas (figura 4.9b). A figura 3.3, utilizada para apresentar a nomenclatura adotada e explicada no capítulo 3, aqui é rerepresentada como a figura 4.9 no intuito de facilitar o entendimento das avaliações.

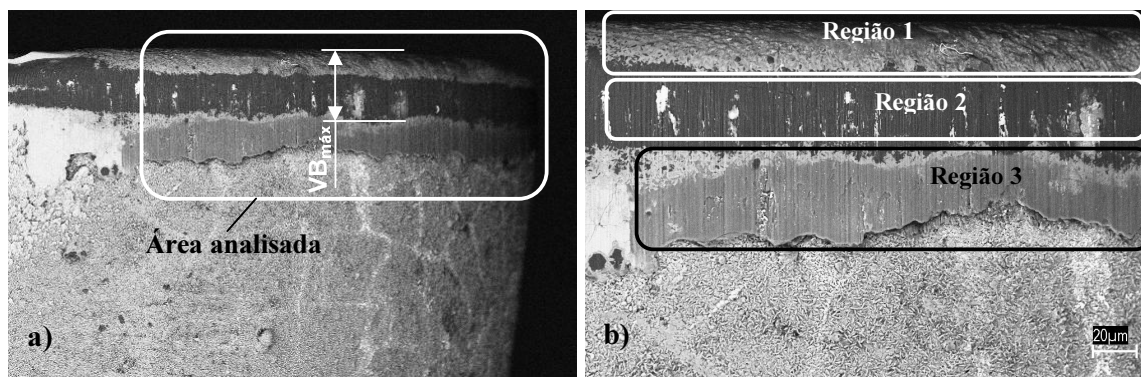


Figura 4.9 - Definição da nomenclatura adotada: a) Demarcação da área analisada; b) Identificação de cada região.

4.4.1 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 1

Na figura 4.10a observa-se a superfície desgastada da ferramenta de corte 1 (F1), na micrografia por elétrons retroespalhados, composta das três regiões de análise (figura 4.9), que é apresentada em detalhe na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.10b.

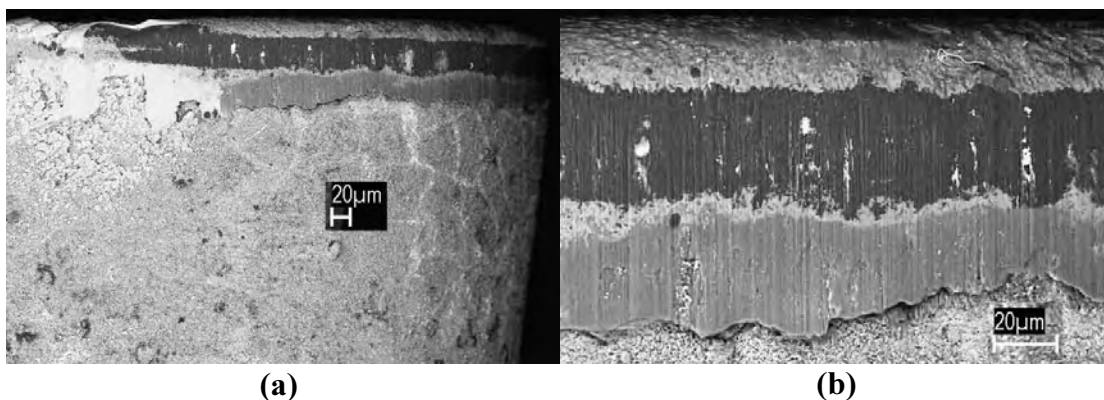
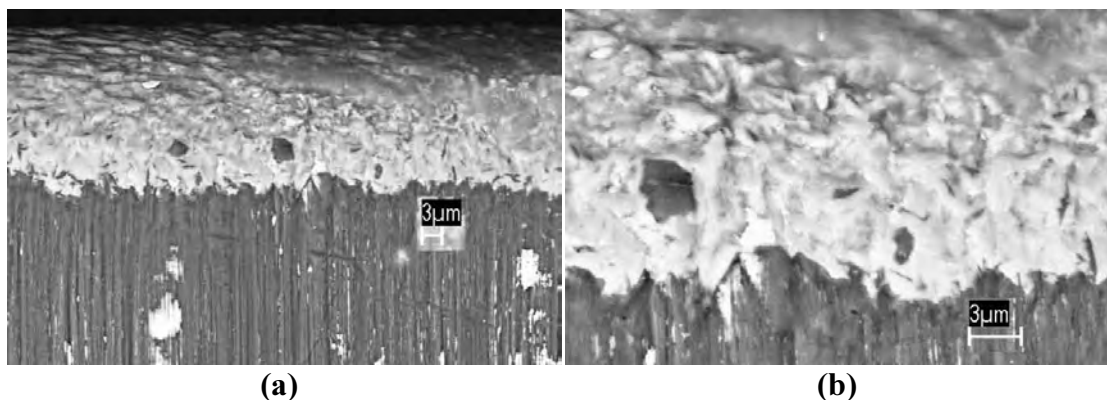
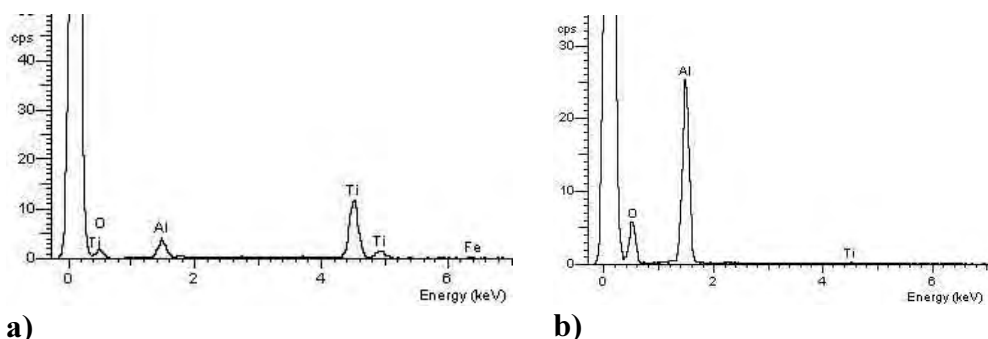


Figura 4.10 - Micrografias por elétrons retroespalhados: **(a)** Área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 1 (F1); **(b)** Detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3.

A região 1, detalhada na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.11a, mostra muito bem delineado ao longo da aresta de corte o contorno do revestimento de nitreto de titânio (TiN), determinado por análise química EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), conforme mostra figura 4.12a. Observa-se que o dano neste revestimento, conforme detalha a micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.11b, ainda não é severo quando comparado com as mesmas áreas das outras ferramentas.



(a) **(b)**
 Figura 4.11 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 1 (F1), vista da região 1: (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano pouco severo na aresta.



a) **b)**
 Figura 4.12 Análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy);
 - **(a)** região 1; **(b)** região 2.

A região 2 conforme ilustra a micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.10), apresenta uma superfície extensamente ranhurada (figura 4.14), na direção do deslizamento, composta de alumina (Al_2O_3), conforme mostra o espectro da análise química por EDS na figura 4.12b. Nesta superfície, pode-se observar a presença de depósitos de ferro (Fe) nas formas circular e alongada por toda sua extensão, confirmados por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) exposta na figura 4.13.

Os depósitos de ferro (Fe) circulares (figura 4.14) aparentam estar contidos em cavidades oriundas de materiais removidos da camada cerâmica, enquanto os depósitos alongados (figura 4.14) aparentam estar contidos nas ranhuras desta superfície cerâmica (Al_2O_3).

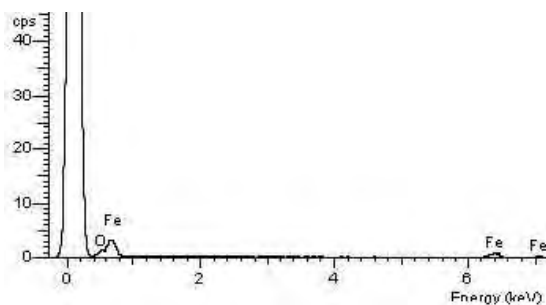


Figura 4.13 - Análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) dos depósitos de Fe da região 2.

Na figura 4.14, é possível observar a presença de uma trinca, formando um ângulo aproximado de 45° com a direção do deslizamento (rotação da peça), que se inicia ao centro da faixa desgastada da região 2 e, termina na interface com a região 3. Nota-se também, a existência de sulcos em uma direção de pequena angulação à aresta de corte.

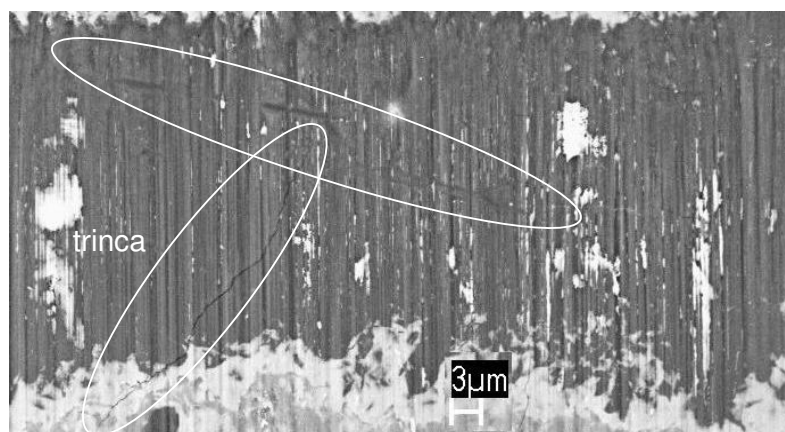


Figura 4.14 - Micrografia por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 1 (F1), mostra a superfície ranhurada da alumina (Al_2O_3), detalhando a presença de trinca e alguns sulcos cruzando as ranhuras.

A região 3 na micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.10b), mostra na superfície de folga da ferramenta de corte 1 (F1), um material deformado plasticamente composto por uma mistura mecânica de nitreto de titânio (TiN), alumina (Al_2O_3) e carbeto de titânio (TiC), conforme análise química por EDS apresentada na figura 4.15. A superfície desta mistura mecânica apresenta microranhuras e trincas e

está sobreposta ao revestimento original de TiN, que podem ser melhor visualizadas nas micrografias por elétrons retroespalhados ilustradas na figura 4.16, itens **a** e **b**.

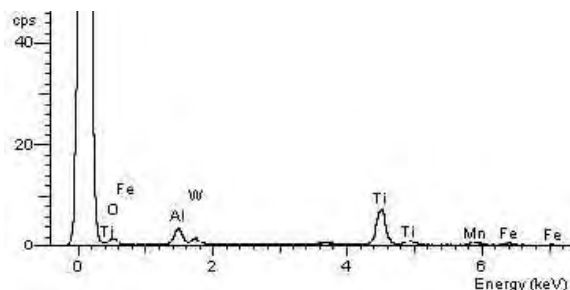


Figura 4.15 - Análise química por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da região 3.

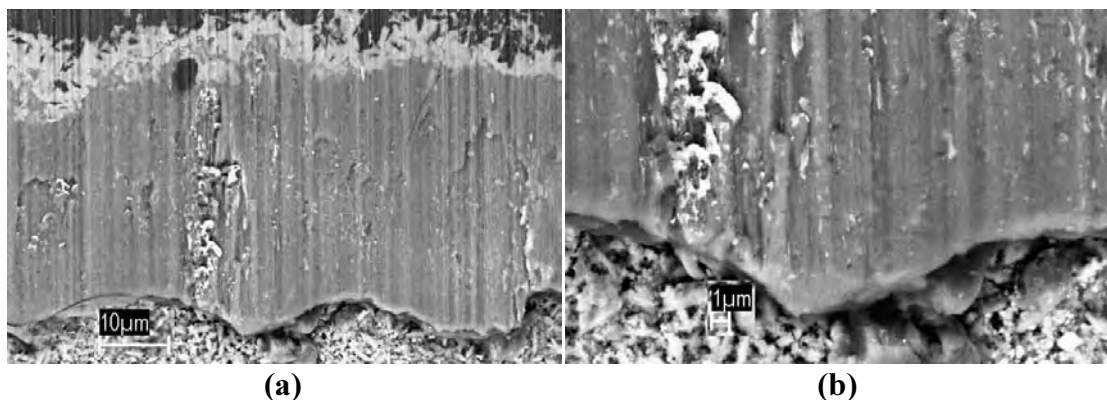
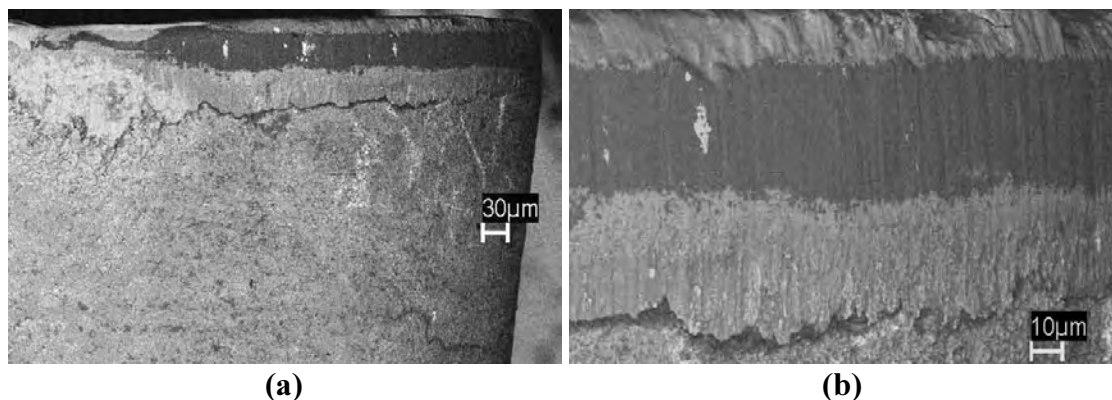


Figura 4.16 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F1): (a) região 3; (b) Detalhe da região 3.

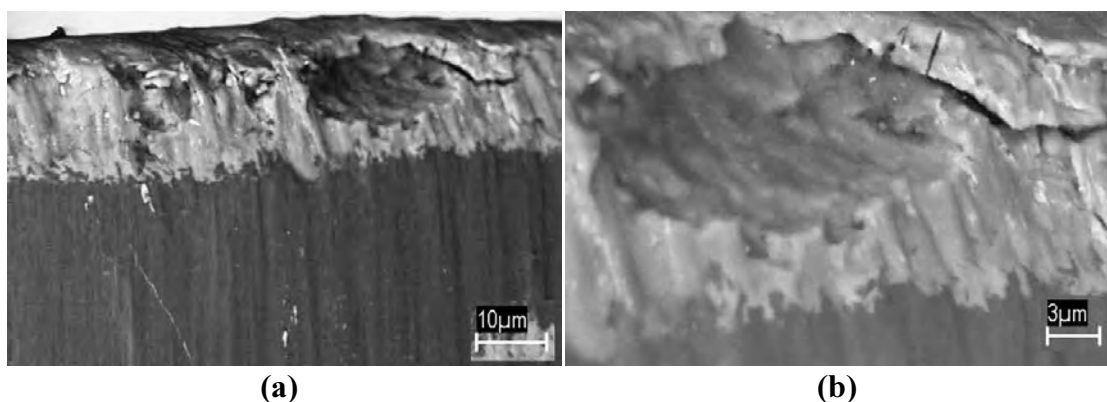
4.4.2 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 2

Na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.17a, observa-se a superfície desgastada da ferramenta de corte 2 (F2) composta das três regiões de análise (figura 4.9), ilustradas com maiores detalhes na micrografia da figura 4.17b.



(a) (b)
 Figura 4.17 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) Área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 2 (F2); (b) Detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3.

A região 1 detalhada na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.18a, mostra muito bem delineado ao longo da aresta de corte o contorno do revestimento de nitreto de titânio (TiN), determinado por análise química EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), conforme mostra figura 4.12a. Observa-se que o dano por toda esta aresta encontra-se bastante acentuado, conforme detalha a micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.18b, indicando que estas avarias são resultante da remoção de porções de materiais dos revestimentos. Na periferia da maior avaria (figura 4.18b) desta região, ressaltam-se trincas subsuperficiais sugerindo o surgimento de outras áreas com perdas localizadas de materiais.



(a) (b)
 Figura 4.18 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 2 (F2): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta.

A região 2 conforme ilustra a micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.17b), apresenta uma superfície extensamente ranhurada (figura 4.19a), na direção do deslizamento, composta de alumina (Al_2O_3), conforme mostra o espectro da análise química por EDS na figura 4.12b.

Nesta superfície (figura 4.19a), pode-se observar a presença de pequena quantidade de depósitos de ferro (Fe), confirmados por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), apresentada na figura 4.13. Estes depósitos adquirem formas circulares e alongadas, mostrando sua presença inclusive em uma fina trinca, exposta em detalhe ampliado na figura 4.19b.

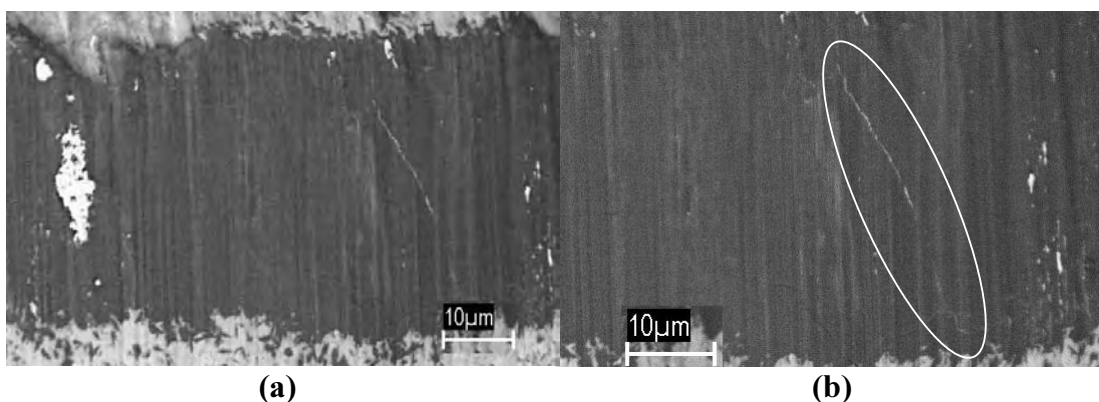


Figura 4.19 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 2 (F2): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação de fina trinca demarcada pela deposição de ferro.

A região 3 na micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.17b), mostra na superfície de folga da ferramenta de corte 2 (F2), um material deformado plasticamente composto por uma mistura mecânica de nitreto de titânio (TiN), alumina (Al_2O_3) e carbeto de titânio (TiC), conforme análise química por EDS apresentada na figura 4.15. A superfície desta mistura mecânica está sobreposta ao revestimento original de TiN, apresentando microranhuradas e trincas que podem ser visualizadas de maneira bem clara nas micrografias por elétrons retroespalhados ilustradas na figura 4.20, itens **a** e **b**.

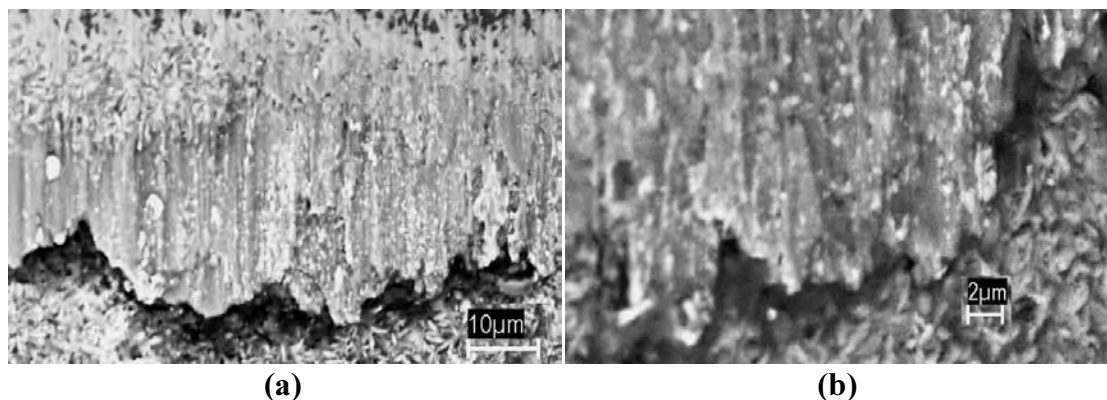


Figura 4.20 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F2): (a) região 3; (b) Detalhe da região 3.

4.4.3 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 3

Na figura 4.21a observa-se a superfície desgastada da ferramenta de corte 3 (F3), pela micrografia por elétrons retroespalhados, composta das três regiões de análise (figura 4.9), que é apresentada em detalhe na figura 4.21b.

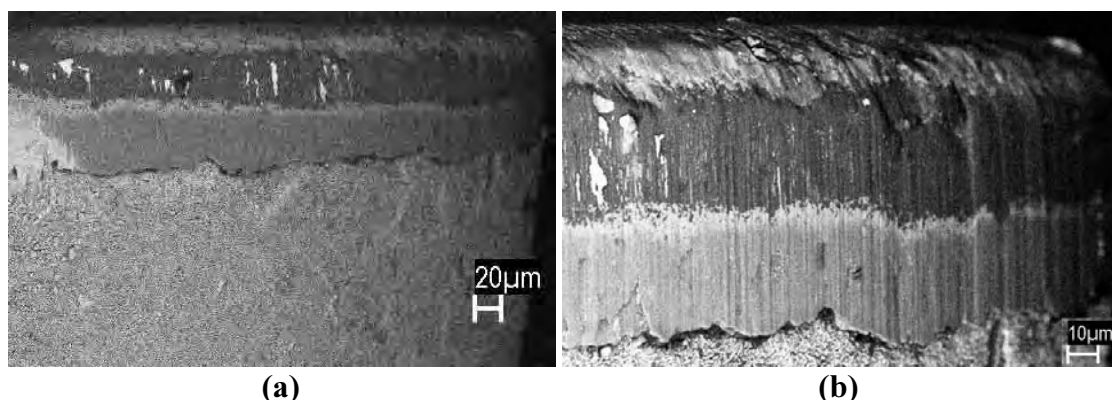


Figura 4.21 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) Área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 3 (F3); (b) Detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3.

A região 1 detalhada na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.22a, mostra muito bem delineado ao longo da aresta de corte o contorno do revestimento de nitreto de titânio (TiN), determinado por análise química EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), conforme mostra figura 4.12a. Observa-se que esta

aresta encontra-se altamente danificada, demonstrando ter sofrido alta deformação na direção do deslizamento, conforme detalha a micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.22a. Nota-se no detalhe da figura 4.22b, que avarias mais acentuadas estão prestes a ocorrer, em virtude da presença de trincas e porções de materiais dos revestimentos bem evidenciados e, como na F2 sugerem o surgimento de mais perdas de materiais.

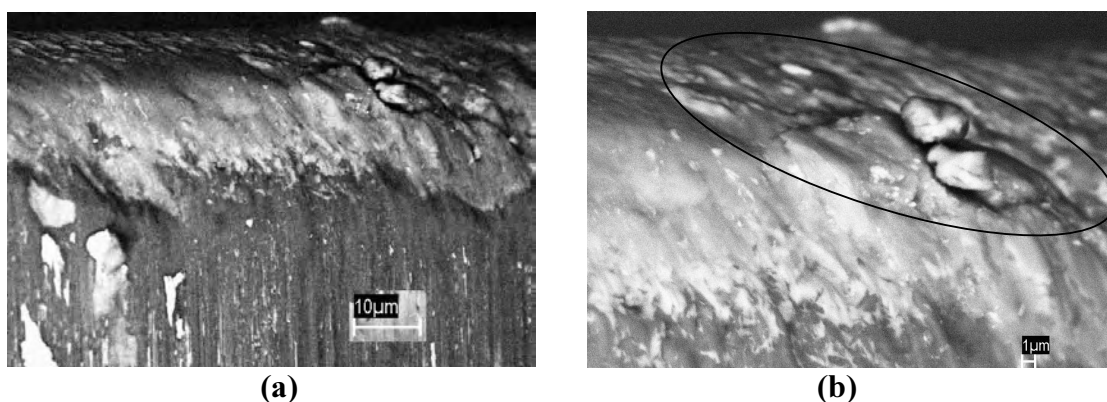
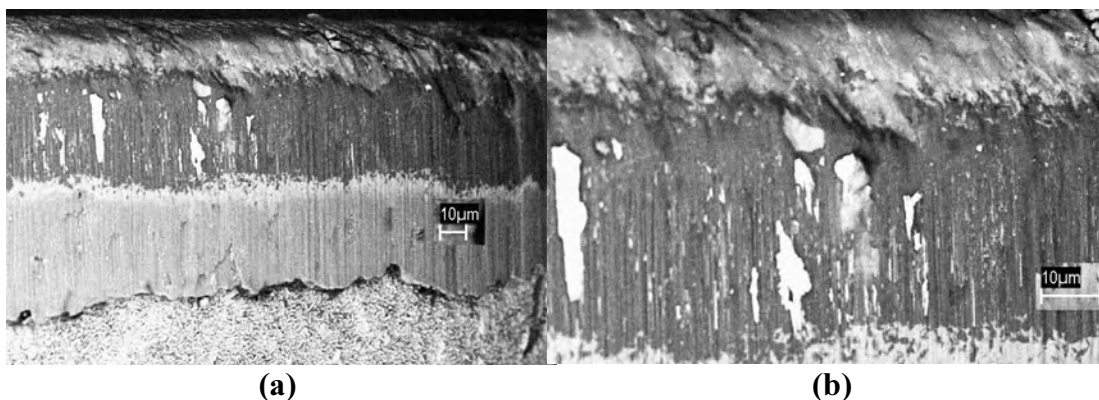


Figura 4.22 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 3 (F3): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta.

A região 2 conforme ilustra a micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.21b), apresenta uma superfície repleta de ranhuras bem acentuadas (figura 4.23a), na direção do deslizamento, composta de alumina (Al_2O_3), conforme mostra o espectro da análise química por EDS da figura 4.12b.

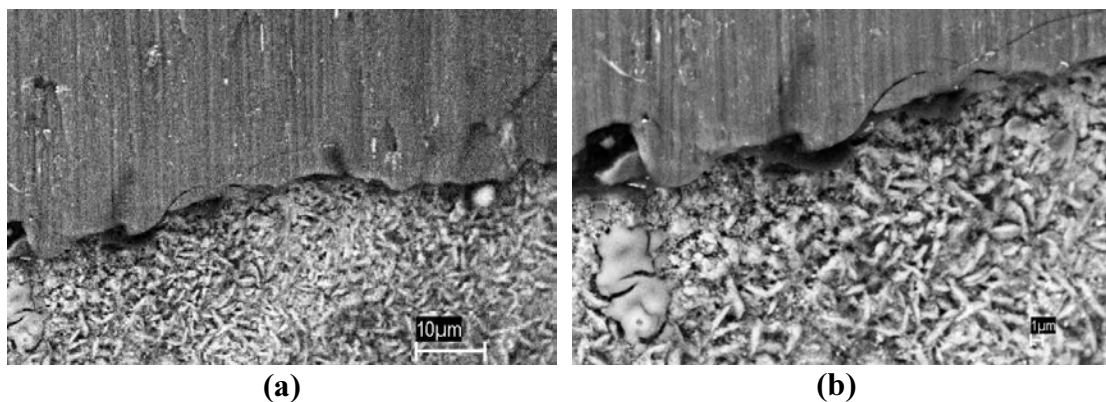
Nesta superfície (figura 4.23a), pode-se observar a presença de grandes porções de depósitos de ferro (Fe), confirmados por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), apresentada na figura 4.13. Estes depósitos adquirem formas alongadas, aparecendo desde finos traços à quantidades mais espessas, conforme detalhe ampliado na figura 4.23b. Os finos depósitos aparentam estar nos vãos das ranhuras, enquanto os espessos encontram-se em cavidades produzidas pela perda de partes do revestimento, a alumina (Al_2O_3).



(a) **(b)**
 Figura 4.23 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 3 (F3): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação dos depósitos de ferro.

A região 3 na micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.21b), mostra na superfície de folga da ferramenta de corte 3 (F3), um material deformado plasticamente composto por uma mistura mecânica de nitreto de titânio (TiN), alumina (Al_2O_3) e carbeto de titânio (TiC), conforme análise química por EDS apresentada na figura 4.15.

Esta mistura mecânica está sobreposta ao revestimento original de TiN, apresentando microranhuradas e trincas, que podem ser visualizadas de maneira bem clara nas micrografias por elétrons retroespalhados, ilustradas na figura 4.24, itens **a** e **b**. A figura 4.24b mostra claramente a existência de trincas e o rompimento de partes deste material.



(a) **(b)**
 Figura 4.24 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F3): (a) região 3; (b) Detalhe da região 3.

4.4.4 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 4

Na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.25^a, observa-se a superfície desgastada da ferramenta de corte 4 (F4) composta das três regiões de análise (figura 4.9) e, apresentada em detalhe na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.25b.

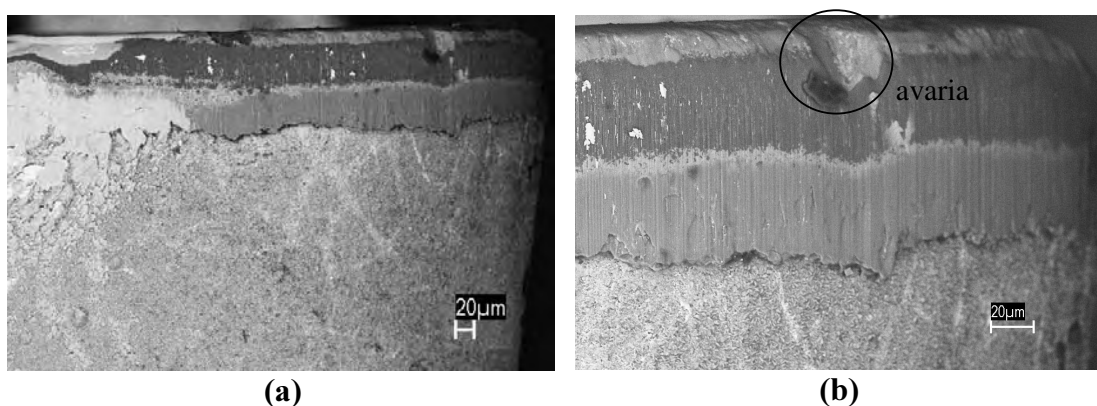


Figura 4.25 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) Área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 4 (F4); (b) Detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3.

A região 1 detalhada na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.26a, mostra muito bem delineado ao longo da aresta de corte o contorno do revestimento de nitreto de titânio (TiN), determinado por análise química EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), conforme mostra figura 4.12a.

Observa-se que além da aresta encontrar-se bastante danificada por toda sua extensão, a presença de uma avaria também é notada, como detalha a micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.26b. A análise química da superfície desta avaria (figura 4.27), indica uma profundidade limítrofe da última camada de revestimento, o TiC, com o substrato da pastilha, confirmando que o material removido que a originou é composto de partes dos revestimentos.

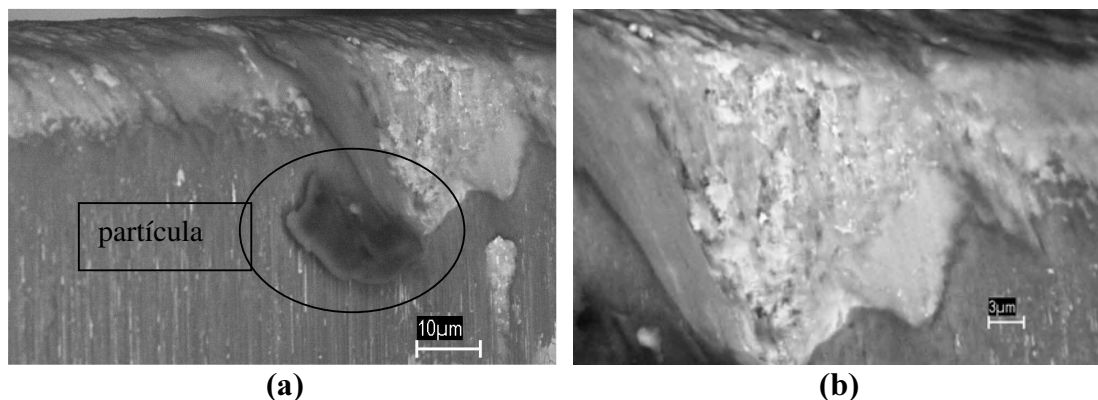


Figura 4.26 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 4 (F4): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte e uma partícula preste a ser removida; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta.

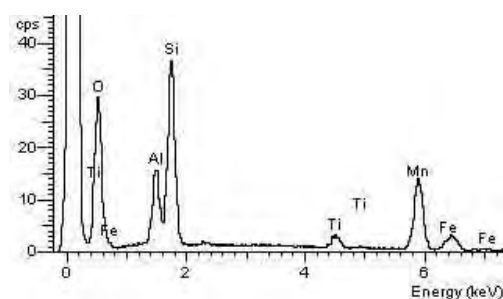


Figura 4.27 - Análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da superfície da avaria.

Identificou-se pela análise química por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), apresentada na figura 4.28, que a partícula preste a ser removida na periferia da avaria mostrada na figura 4.26a, é composta por fragmentos da alumina (Al_2O_3), do carbeto de titânio (TiC) e do carbeto de tungstênio (WC).

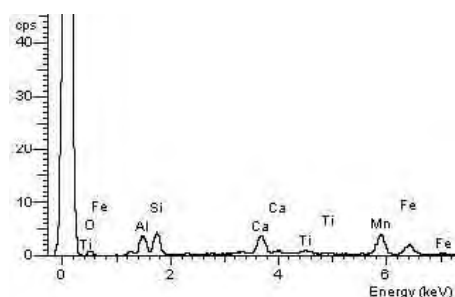


Figura 4.28 - Análise química por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da partícula preste a ser removida.

A região 2 conforme ilustra a micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.25b), apresenta uma superfície extensamente ranhurada (figura 4.29a), na direção do deslizamento, composta de alumina (Al_2O_3), conforme mostra o espectro da análise química por EDS na figura 4.12b.

Nesta superfície (figura 4.29a), pode-se observar a presença de pequena quantidade de depósitos de ferro (Fe), confirmados por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), apresentada na figura 4.13. Estes depósitos adquirem formas circulares e alongadas, mostrando sua presença principalmente nos vãos das ranhuras, exposta em detalhe ampliado na figura 4.29b.

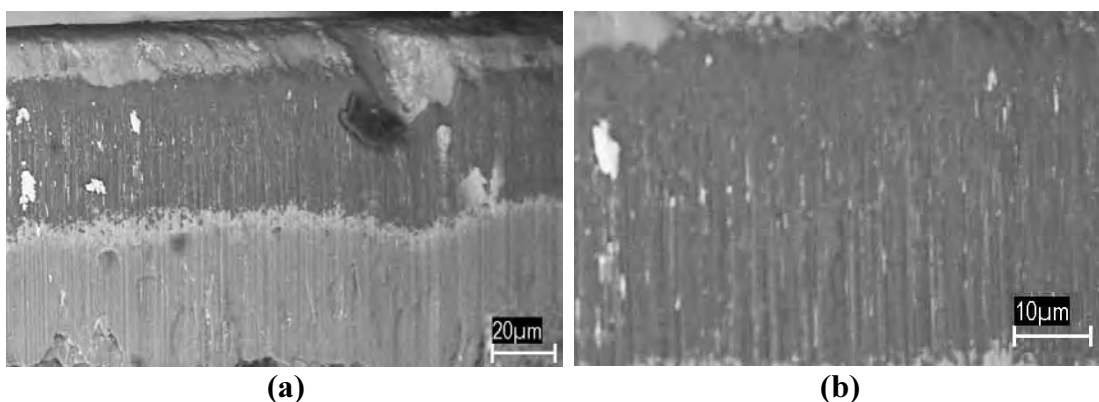


Figura 4.29 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 4 (F4): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação das ranhuras demarcadas pela deposição de ferro.

A região 3 na micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.25b), mostra na superfície de folga da ferramenta de corte 4 (F4), um material deformado plasticamente composto por uma mistura mecânica de nitreto de titânio (TiN), alumina (Al_2O_3) e carbeto de titânio (TiC), conforme análise química por EDS apresentada na figura 4.15. Esta mistura mecânica está sobreposta ao revestimento original de TiN, apresentando microranhuras e trincas, que podem ser visualizadas de maneira bem clara nas micrografias por elétrons retroespalhados, ilustradas na figura 4.30, itens **a** e **b**. A figura 4.30b mostra claramente a existência destas trincas e o rompimento de partes deste material.

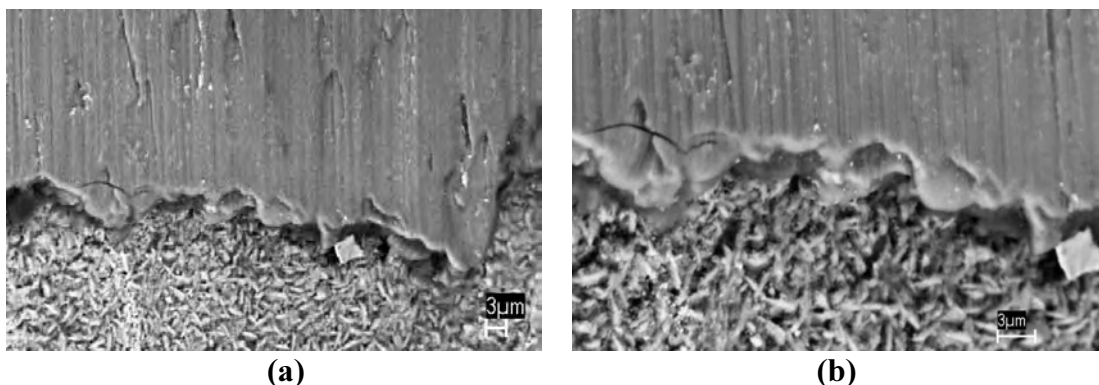


Figura 4.30 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F4): (a) região 3; (b) Detalhe da região 3.

4.4.5 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 5

Na figura 4.31a observa-se a superfície desgastada da ferramenta de corte 5 (F5), pela micrografia por elétrons retroespalhados, composta das três regiões de análise (figura 4.9), que pode ser melhor visualizada na micrografia da figura 4.31b.

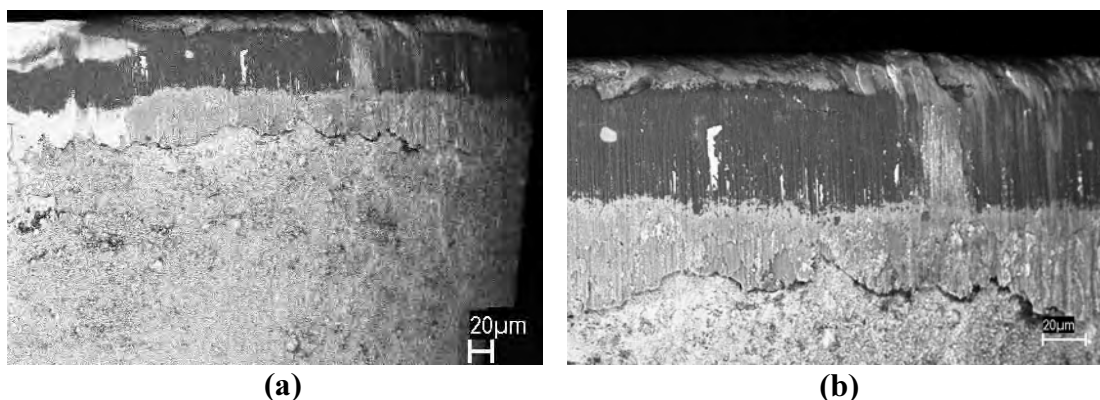


Figura 4.31 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) Área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 5 (F5); (b) Detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3.

A região 1 detalhada na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.32a, mostra muito bem delineado ao longo da aresta de corte o contorno do revestimento de nitreto de titânio (TiN), determinado por análise química EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), conforme mostra figura 4.12a. Observa-se que o

dano por toda esta aresta encontra-se bastante acentuado, conforme detalha a micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.32b, ressaltando-se as trincas subsuperficiais que sugerem o surgimento de futuras perdas de materiais, possibilitando a origem de avarias.

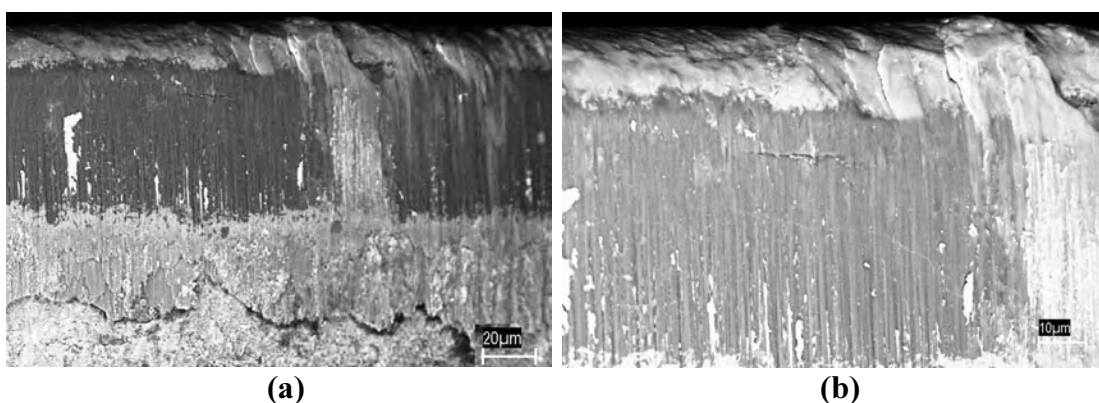


Figura 4.32 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 5 (F5): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta.

A região 2 conforme ilustra a micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.31b), apresenta uma superfície extensamente ranhurada (figura 4.33a), na direção do deslizamento, composta de alumina (Al_2O_3), conforme mostra o espectro da análise química por EDS na figura 4.12b.

Nesta superfície (figura 4.33a), pode-se observar, distribuídos por toda sua área, a presença de grande quantidade de depósitos de ferro (Fe), confirmados por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) e apresentada na figura 4.13. Estes depósitos adquirem formas circulares e principalmente alongadas, mostrando sua presença inclusive em uma fina trinca, exposta em detalhe ampliado na figura 4.33c.

O surgimento de uma trinca significativa, paralela à aresta de corte e transversal à direção de rotação, é o elemento novo desta ferramenta, que está apresentada na figura 4.33b.

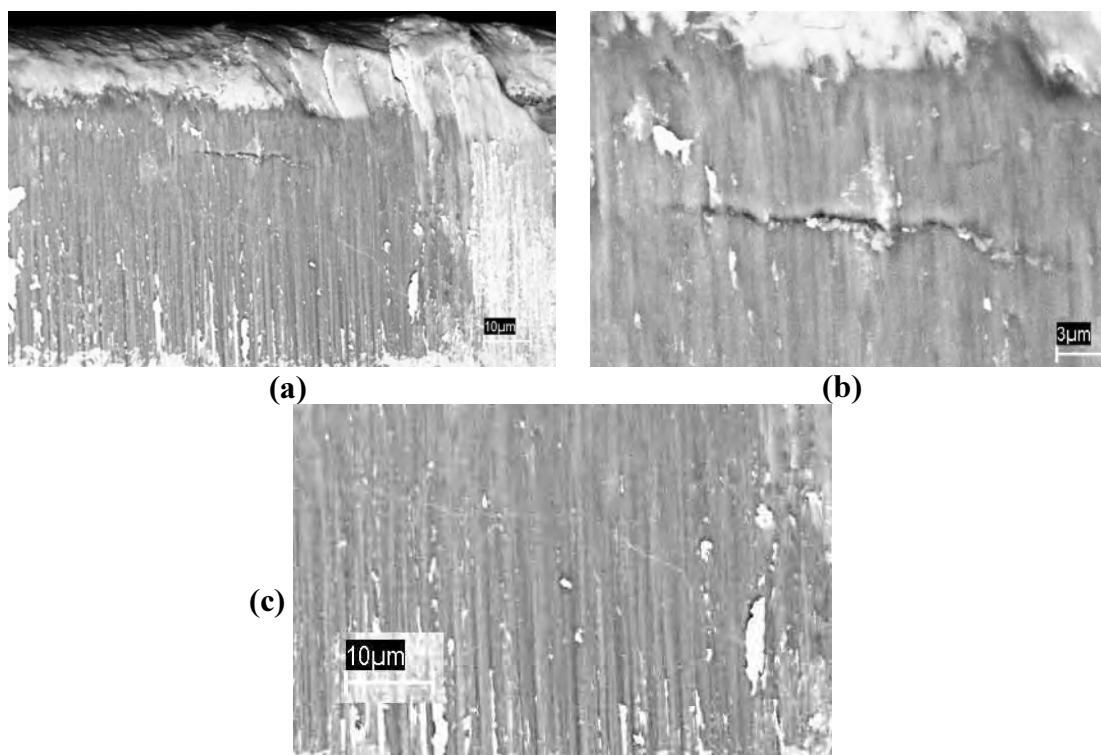


Figura 4.33 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 5 (F5): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação de trinca transversal ao deslizamento; (c) detalhe de uma fina trinca.

A região 3 na micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.31b), mostra na superfície de folga da ferramenta de corte 5 (F5), um material deformado plasticamente composto por uma mistura mecânica de nitrato de titânio (TiN), alumina (Al_2O_3) e carbeto de titânio (TiC), conforme análise química por EDS apresentada na figura 4.15. Esta mistura mecânica está sobreposta ao revestimento original de TiN, apresentando ranhuras com sulcos maiores que os encontrados nas outras ferramentas, que podem ser visualizadas de maneira bem clara nas micrografias por elétrons retroespalhados, ilustradas na figura 4.34, itens **a** e **b**.

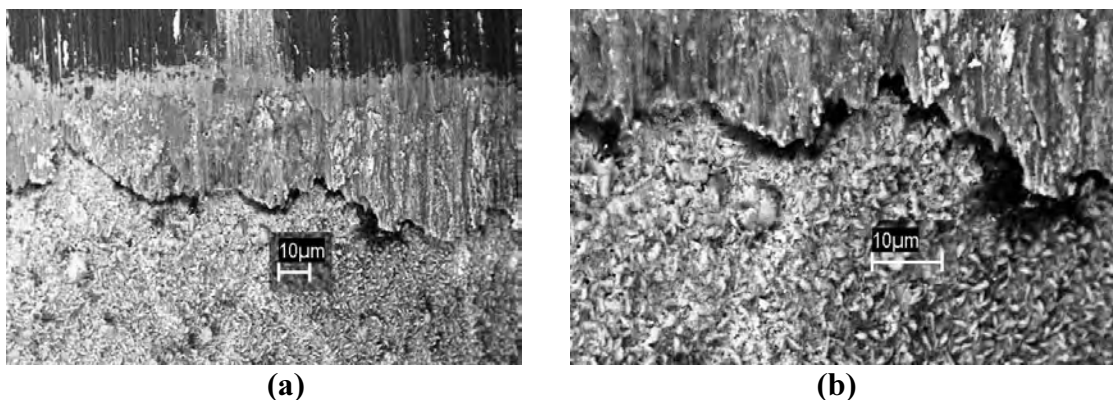


Figura 4.34 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F5): (a) região 3; (b) Detalhe da região 3.

4.4.6 Resultados da análise micrográfica das superfícies de flanco desgastadas da ferramenta de corte 6

Na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.35^a, observa-se a superfície desgastada da ferramenta de corte 6 (F6) composta das três regiões de análise, definida anteriormente neste capítulo (figura 4.9) e, apresentada em detalhe na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.35b.

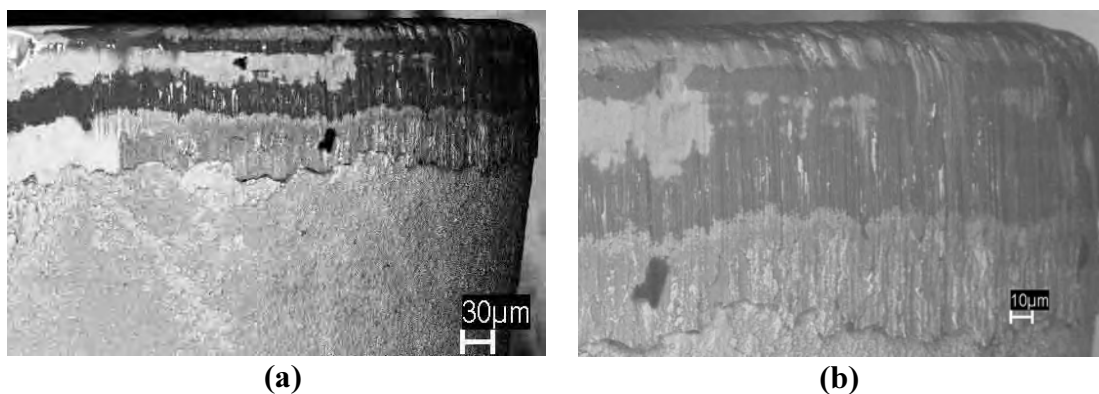


Figura 4.35 - Micrografias por elétrons retroespalhados: (a) Área desgastada da superfície de folga da ferramenta de corte 6 (F6); (b) Detalhe das regiões de desgaste 1, 2 e 3.

A região 1 detalhada na micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.36a, mostra muito bem delineado ao longo da aresta de corte o contorno do revestimento de nitreto de titânio (TiN), determinado por análise química EDS

(*Energy Dispersive Spectroscopy*), conforme mostra figura 4.12a. Observa-se que o dano por toda esta aresta encontra-se bastante acentuado, conforme detalha a micrografia por elétrons retroespalhados da figura 4.36b. Não são notadas avarias significativas nesta região da pastilha, percebe-se apenas que a perda de material se apresenta de maneira quase uniforme por toda extensão da aresta (figura 4.36b).

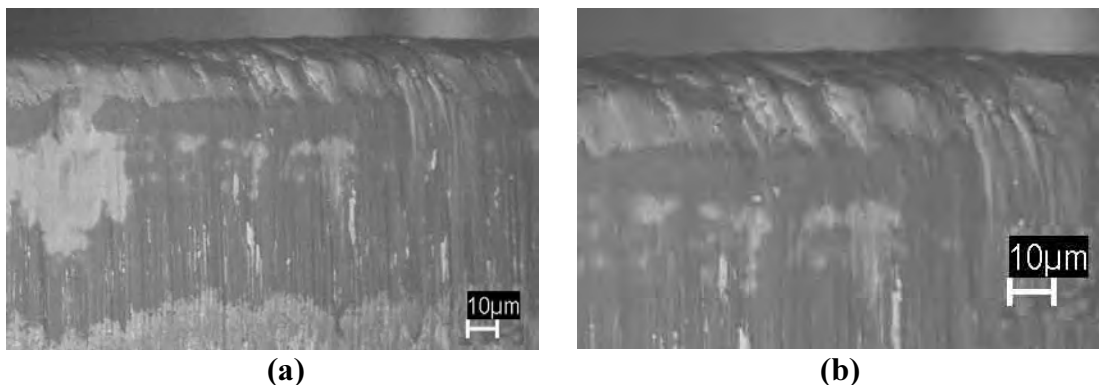


Figura 4.36 - Micrografias por elétrons retroespalhados na região 1 da superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 6 (F6): (a) delineamento do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ao longo da aresta de corte; (b) detalhe mostra dano acentuado na aresta.

A região 2 conforme ilustra a micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.35b), apresenta uma superfície extensamente ranhurada (figura 4.37a), na direção do deslizamento, composta de alumina (Al_2O_3), conforme mostra o espectro da análise química por EDS na figura 4.12b.

Nesta superfície (figura 4.37a), pode-se observar a presença de pequena quantidade de depósitos de ferro (Fe), confirmados por EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), apresentada na figura 4.13. Estes depósitos adquirem formas alongadas e estão localizados entre as ranhuras, mostrando sua presença inclusive em uma fina trinca, exposta em detalhe ampliado na figura 4.37b.

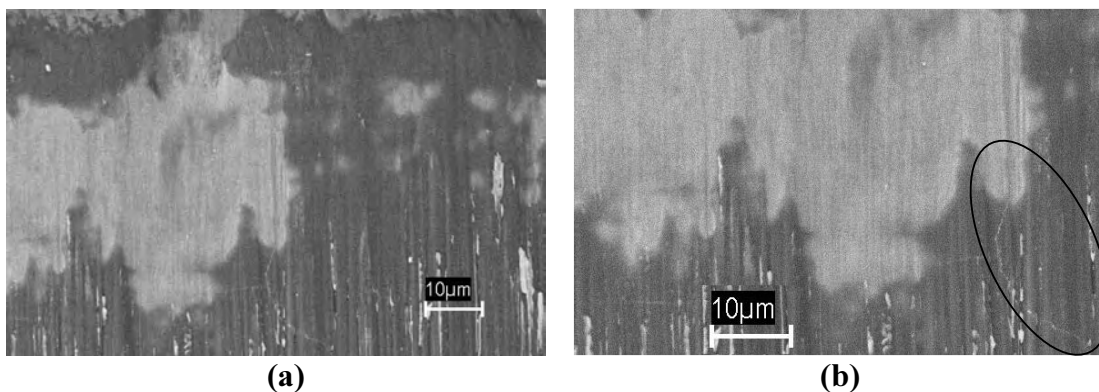


Figura 4.37 - Micrografias por elétrons retroespalhados da região 2 na superfície de folga desgastada da ferramenta de corte 6 (F6): (a) revestimento cerâmico (Al_2O_3) ranhurado com depósitos de ferro (Fe); (b) ampliação de fina trinca demarcada pela deposição de ferro.

Nesta região 2 da superfície de folga desgastada, surge para esta ferramenta uma mancha em tom claro, que pela análise química ilustrada na figura 4.37, a identifica como um pequeno filme de ferro depositado sobre uma parte lisa do revestimento de alumina (Al_2O_3).

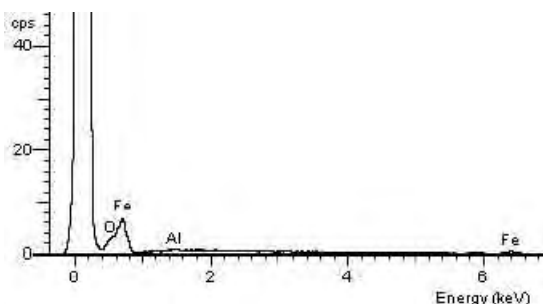


Figura 4.38 - Análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) das manchas claras na região 2.

A região 3 na micrografia por elétrons retroespalhados (figura 4.35b), mostra na superfície de folga da ferramenta de corte 6 (F6), um material deformado plasticamente composto por uma mistura mecânica de nitreto de titânio (TiN), alumina (Al_2O_3) e carbeto de titânio (TiC), conforme análise química por EDS apresentada na figura 4.39. Esta mistura mecânica está sobreposta ao revestimento original de TiN, apresentando microranhuradas e trincas, que podem ser visualizadas de maneira bem clara nas micrografias por elétrons retroespalhados, ilustradas na figura 4.40, itens a e

b. A figura 4.40b mostra a existência de trinca e partes rompidas desta mistura mecânica, evidenciando uma característica de fragilidade.

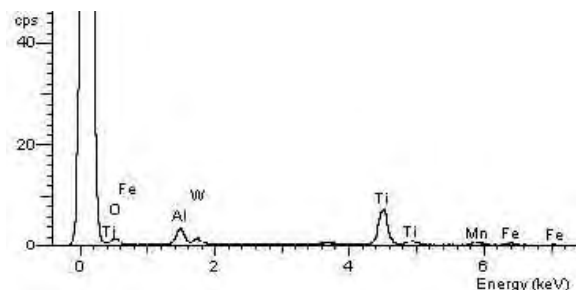


Figura 4.39 - Análise química por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da região 3.

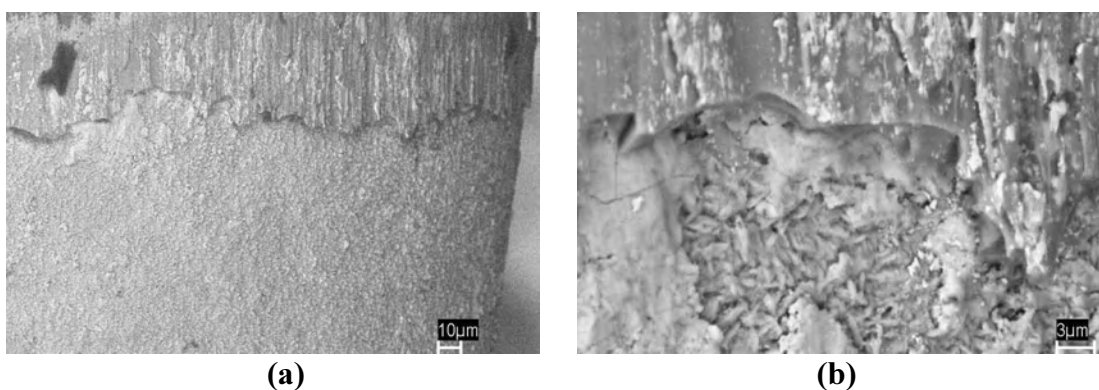


Figura 4.40 - Micrografias por elétrons retroespalhados da superfície de flanco da ferramenta de corte (F6): (a) região 3; (b) Detalhe da região 3.

4.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ANALÍSE MICROSCÓPICA DAS SUPERFÍCIES DESGASTADAS DAS FERRAMENTAS DE CORTE.

A análise microscópica, da superfície de folga desgastada, pelo uso da microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários e retroespalhados, proporcionou o exame da morfologia da superfície, ou seja, tornou possível identificar a presença de ranhuras, cavidades e defeitos. Detalhes provenientes do contato da superfície de folga da ferramenta e a peça trabalho, durante o processo de usinagem para as ferramentas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, correspondentes respectivamente aos tempos de usinagem de 2,20 min, 4,09 min, 6,14 min, 7,90 min, 14,20 min e 18,61 min.

As análises químicas por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) das superfícies desgastadas proporcionaram a caracterização de cada um dos revestimentos, utilizados durante o processo de desgaste bem como a verificação da transferência de material entre a peça trabalho e a superfície da ferramenta.

Em vista destas observações, pode-se caracterizar o comportamento das superfícies desgastadas nas devidas regiões de desgaste, como segue:

4.5.1 Região 1 – Aresta principal de corte

Observa-se que as arestas principais de corte, à medida que se aumenta o tempo de corte, ou seja, a permanência da aresta principal de corte em trabalho, amplia-se o dano sobre a aresta de corte. Torna-se evidente também, uma maior deformação plástica do revestimento de nitreto de titânio (TiN), na direção de deslizamento e constata-se o aparecimento de microfraturas.

4.5.2 Região 2 – Extensão do desgaste de flanco

Observa-se das análises desenvolvidas da superfície de desgaste de flanco, que à medida que se aumenta o tempo de corte, ou seja, aumenta-se a região de contato com a peça trabalho, não são verificadas alterações morfológicas significativas nas ferramentas de corte 1, 2, 4, 5 e 6, mas a ocorrência de microranhuradas e microtrincas é notada. Porém na ferramenta de corte 3, além das microranhuradas e microtrincas, pode ser percebida também a presença de algumas cavidades, diferenciando a superfície desta ferramenta das outras.

A presença de ferro (Fe), oriunda do material da peça trabalho, sobre a superfície desgastada da alumina (Al_2O_3), ambas confirmadas pela análise química por EDS, foi detectada em todas as ferramentas de corte, porém com maior intensidade na ferramenta de corte 3.

4.5.3 Região 3 – Acúmulo de produtos do desgaste

As análises desenvolvidas permitem a observação de que o material proveniente das regiões superiores, que foi desgastado e sujeito às altas pressões de contato, é deformado plasticamente e deslocado até esta região, onde baixas pressões de contato são as dominantes. Este material altamente deformado plasticamente, nas ferramentas de corte 1, 3, 4, 5 e 6, apresenta uma morfologia composta de microranhuradas, microtrincas e microfraturas com formas bastante similares. No entanto, para a ferramenta de corte 2, apesar da existência da mesma morfologia, ele se apresenta com características de um estágio de encruamento mais avançado, em razão das deformações plásticas à que foi sujeito.

A presença nesta região de todos os elementos químicos dos revestimentos, do substrato e da peça trabalho, confirmados pelas análises químicas por EDS, indicam que houve um deslocamento plástico dos materiais das outras regiões citadas.

4.6 MECANISMOS DE DESGASTE ATUANTES

A identificação dos mecanismos de desgaste atuantes no processo de deterioração da superfície de folga das ferramentas de metal duro revestido com nitreto de titânio (TiN), óxido de alumínio (Al_2O_3) e carbeto de titânio (TiC), do corte de aço ABNT 1050, tem por objetivo mais imediato, entender como ocorre a perda de material destas ferramentas durante o desenvolvimento da usinagem deste material.

O processo de corte no torneamento de metais constitui-se em um mecanismo de deformação plástica, acompanhado de um fluxo plástico de material ao longo das faces de saída e folga da ferramenta. O fluxo de material deformado plasticamente, sujeito a altas pressões de contato e altas temperaturas nestas regiões da ferramenta, promove áreas reais de contato bastante próximas da área aparente, produzindo grandes junções adesivas dependentes dos materiais da ferramenta e da peça trabalho bem como das condições de corte impostas.

Pesquisas desenvolvidas em relação ao mecanismo de corte em metais, admitem que em razão desta grande área real de contato formada, um mecanismo de desgaste

do tipo “travamento mecânico”, ocorre nas superfícies de saída e folga da ferramenta de corte durante o fluxo de material deformado plasticamente (TRENT; 1988, 1991). Entretanto, há considerações que o mesmo ocorre em uma determinada área a partir da aresta de corte, seguida por outra área onde o deslizamento está presente, enquanto há quem admita, que o mecanismo citado pode ocorrer em áreas delimitadas da região de contato do fluxo plástico com as faces da ferramenta (SCHEY; 1983).

O mecanismo de desgaste adesivo intenso designado por “travamento mecânico”, e conhecido na literatura como “sticking friction” e “seizure”, tem sido observado em outros processos de fabricação, sendo a extrusão onde ocorre de forma mais intensa. Este mecanismo afeta de maneira significativa o fluxo de material ao longo das faces da ferramenta, produzindo variações na amplitude da força de corte e aumentando as vibrações da ferramenta de corte.

Sabe-se que a interface de contato entre a ferramenta e a peça trabalho no processo de usinagem na superfície de flanco, está sujeita a pressões elevadas e conseqüentemente a altas temperaturas (TÖNSHOFF; BEN AMOR, 2004), levando à diminuição de dureza dos revestimentos em ferramentas de corte revestidas, pelo mecanismo de desgaste por difusão (WILLIAMS; 1996), fazendo com que a ferramenta perca sua resistência ao desgaste à medida que cresce o tempo de usinagem.

O fluxo plástico do aço ABNT 1050 da peça trabalho, deslizando sobre a superfície de flanco da ferramenta promove uma troca de elementos químicos pelo mecanismo de desgaste por difusão, citado anteriormente, facilitando a transferência de partículas da ferramenta para a peça trabalho pelo mecanismo de desgaste por adesão (KRAMER; 1980).

Em relação à superfície do material usinado, pequenas partículas da ferramenta são carregadas definitivamente para fora do processo pelo cavaco, deixando de ter, posteriormente, influência sobre o desenvolvimento do desgaste. No entanto, as partículas transferidas do material da peça trabalho para a superfície da ferramenta, poderão permanecer por algum tempo no processo, assumindo grande relevância no desenvolvimento do desgaste.

Parte das junções adesivas formadas entre o material da peça trabalho e o material da ferramenta de corte, sujeitas a elevadas tensões de deformação, produzirão arrancamento de material da ferramenta e outra parte será arrancada da peça trabalho, ficando presa à superfície de flanco da pastilha, dando um caráter bastante dinâmico de transferência de partículas entre as superfícies em contato dos elementos envolvidos.

O mecanismo de desgaste por adesão na usinagem de aços com ferramentas revestidas está sempre presente e são identificados nos resultados dos experimentos realizados por Srinivasan, Venkatesh e Raju (1977); Lim e Lee (1999) e Pirso, Letunovits e Viljus (2004). Este mecanismo é atuante também para a operação de corte intermitente do aço EM 19T, relatado no trabalho de Ezugwu e Okeke (2001).

Da análise química e morfológica da superfície de desgaste das ferramentas 1, 2 e 3, observou-se um dano crescente da aresta principal de corte 1 para a aresta 2 e desta para a 3, na região 1, composta pela camada do revestimento de nitreto de titânio (TiN). Um maior tempo de usinagem eleva o mecanismo de difusão, enfraquece o material da ferramenta, conduzindo inevitavelmente a um maior dano, como o observado.

Em virtude do estado existente de altas tensões na aresta de corte, há uma fraca ligação do titânio desta região em relação a outras regiões do revestimento de nitreto de titânio (TiN), tornando mais fácil o seu deslocamento pela ação das forças adesivas. Dois momentos distintos se apresentam, um primeiro no início do processo de corte onde a área real de contato, relativa à superfície de folga e o aço a ser usinado, é a menor possível, resumindo-se basicamente a parte da aresta de corte. Num segundo momento, onde pelo “arredondamento” da aresta de corte e pelo aparecimento do desgaste de flanco (VB), a pressão diminui em virtude do aumento da área real de contato. Porém a existência deste VB é resultado da remoção do revestimento de nitreto de titânio (TiN), deixando o titânio limítrofe da aresta em “suspensão”, ou seja, sem o apoio inferior deste revestimento na superfície de folga.

As forças de adesão entre o ferro (Fe) da peça trabalho e o titânio (Ti) do revestimento de titânio (TiN) promovem então, com maior facilidade, a remoção do revestimento pela ação das junções adesivas. Este processo gera um fluxo de partículas do revestimento, da aresta de corte e da superfície de flanco, na direção do

deslizamento, produzindo uma microabrasão sobre a região 2. Região esta, que passou a ser constituída essencialmente de alumina (Al_2O_3), uma vez que a camada de nitreto de titânio (TiN), menor que $1\ \mu\text{m}$, resiste pouco tempo ao desgaste.

Enquanto não se observa grande diferença morfológica entre as superfícies de desgaste na região 2 das ferramentas de corte 1 e 2, um dano crescente é notado na superfície da ferramenta de corte 2 para a 3, constituída principalmente pelo revestimento de alumina (Al_2O_3), onde grandes depósitos de ferro (Fe), oriundos da peça trabalho, encontram-se ancorados nas cavidades.

A nucleação e propagação de trincas subsuperficiais e/ou a propagação de trincas provenientes dos defeitos de fabricação, que ocorrem nas ferramentas 1 e 2, produzidas pelas forças adesivas entre o ferro (Fe) da peça trabalho e o alumínio (Al) do revestimento de alumina (Al_2O_3), não são ainda eficazes para desencadear o mecanismo de desgaste por delaminação. Porém, o mesmo está presente na superfície da ferramenta de corte 3, levando-a nesta região 2 a um dano maior.

O mecanismo de desgaste por fadiga superficial ou delaminação, identificado neste trabalho, é descrito por Su e Kao (1998), quando do fresamento de aço AISI 1045 com ferramentas revestidas por uma, duas ou múltiplas camadas, da seguinte maneira: o mecanismo de desgaste por adesão é o principal e induz à formação de trincas e suas propagações.

Subramanian e Strafford (1993) foram um pouco além, descrevendo que a propagação das trincas ao atingir as interfaces dos revestimentos são desviadas, assumindo uma trajetória paralela à camada para um pouco adiante, retomar o caminho originalmente perpendicular, numa clara tendência a aflorar à superfície.

As superfícies de flanco desgastadas das ferramentas de corte 4, 5 e 6, apresentam morfologias similares às superfícies de flanco das ferramentas de corte 1 e 2 e, portanto, os mesmos mecanismos de desgaste envolvidos. Porém, observam-se grandes trincas transversais na região 2 da ferramenta de corte 6, caracterizando que o mecanismo de delaminação está evoluindo.

Verifica-se das considerações anteriores, que predomina um mecanismo de desgaste adesivo entre titânio (Ti) e o ferro (Fe), respectivamente do revestimento de nitreto de titânio (TiN) e do aço ABNT 1050 da peça trabalho na região 1, que desloca

partículas de nitreto de titânio (TiN) ao longo da superfície na região 2, constituída de alumina (Al_2O_3) do revestimento e ferro (Fe) do aço ABNT 1050 da peça trabalho, produzindo um microranhuramento sobre a superfície.

Os resultados apresentados confirmam o crescimento do desgaste de flanco com o tempo de usinagem, resultando em uma área de contato maior, que sujeita às pressões superficiais extremamente elevadas nesta região 2, possibilitam a ocorrência do “travamento mecânico” (seizure) entre o aço ABNT 1050 da peça trabalho e o revestimento de alumina (Al_2O_3). Entretanto, em virtude da topografia desta superfície ser constituída por microranhuras com a presença de titânio e ferro, na forma de depósitos ou de migrações involuntárias, a área real de contato é diminuída, evitando assim o fenômeno do “travamento mecânico” e possibilitando a ocorrência de adesões entre o ferro (Fe) da peça trabalho e o alumínio (Al) do revestimento de alumina (Al_2O_3).

O produto dos mecanismos de desgaste, resultantes do aço ABNT 1050 e os revestimentos da ferramenta, são deslocados para a região 3, localizando-se na parte inferior da região 2 do desgaste de flanco (VB), e caracterizada por estar sujeita a uma baixa pressão de contato. Os detritos do desgaste à medida que se acumulam, sofrem o endurecimento pela deformação e partes são perdidas por pequenas fraturas, enquanto o restante deste produto permanece retido nesta região.

Esta região de baixa pressão, no final do contato entre a peça trabalho e o flanco da ferramenta de corte, recebe e armazena os produtos do desgaste provenientes das regiões superiores, ratificado por Lim, Lim e Lee (1999). Confirmou-se pelas análises químicas EDS, que este material deformado plasticamente e acumulado na região 3, é composto por ambos materiais em deslizamento, ou seja, titânio (Ti) e alumínio (Al) dos revestimentos e o ferro (Fe) da peça trabalho.

4.7 SÍNTESE DA ANÁLISE DA ÁREA DO DESGASTE DE FLANCO

A análise da área do desgaste de flanco, realizada anteriormente, é apresentada de maneira sintética nas tabelas 4.6, 4.7 e 4.8, correspondendo respectivamente às regiões

1, 2 e 3. Nestas tabelas relacionam-se as principais características topográficas, os mecanismos de desgaste atuantes e os respectivos tempos de usinagem.

Tabela 4.6 - Síntese da análise da Região 1 – Aresta Principal de Corte

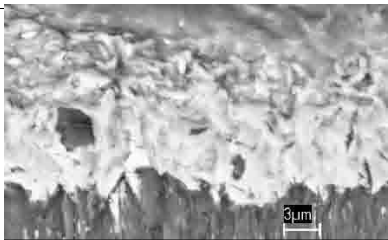
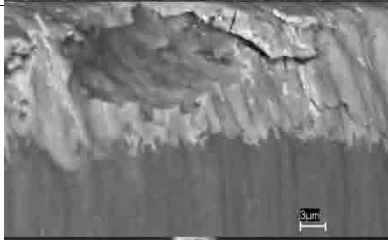
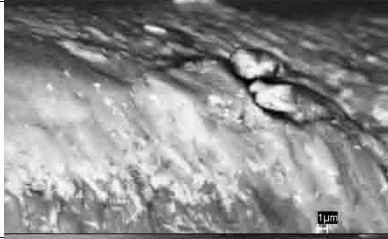
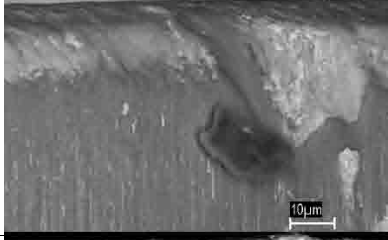
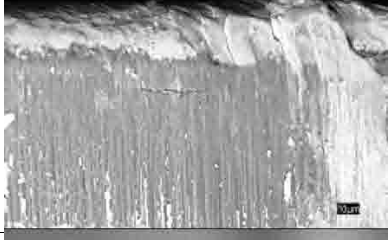
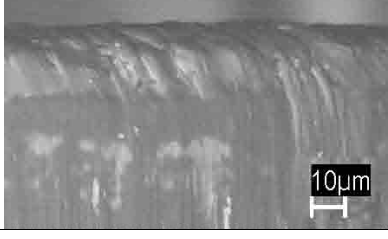
Ferramenta	Tempo de corte (min)	Micrografia	Topografia	Mecanismo de desgaste
F1	2,2		<ul style="list-style-type: none"> • Vazios, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão.
F2	4,1		<ul style="list-style-type: none"> • Trincas, • fraturas, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.
F3	6,14		<ul style="list-style-type: none"> • Trincas, • fraturas, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.
F4	7,9		<ul style="list-style-type: none"> • Trincas, • fraturas, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.
F5	14,2		<ul style="list-style-type: none"> • Trincas, • fraturas, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.
F6	18,6		<ul style="list-style-type: none"> • Trincas, • fraturas, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.

Tabela 4.7 - Síntese da análise da Região 2 – Extensão do desgaste de flanco

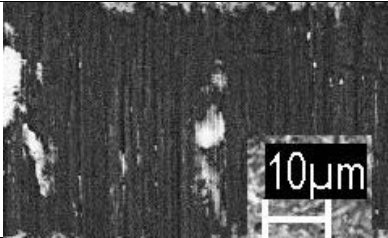
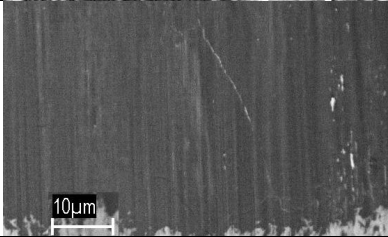
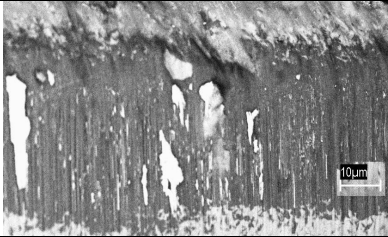
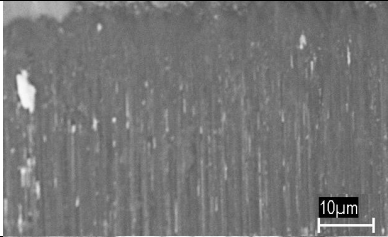
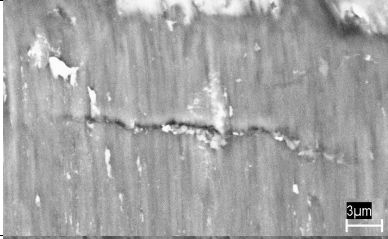
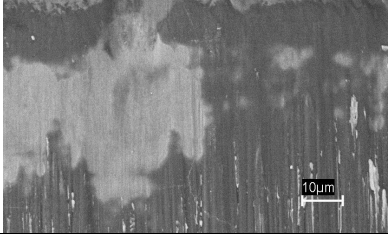
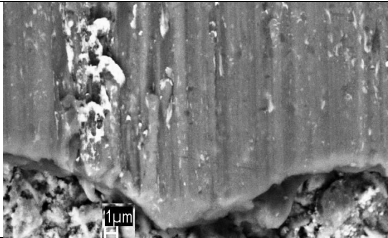
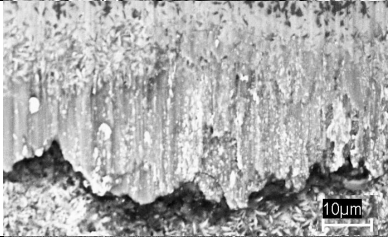
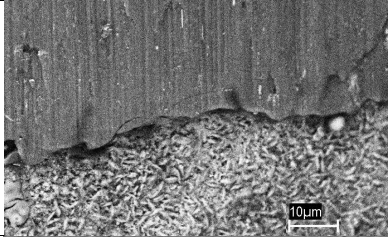
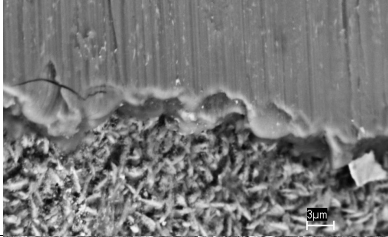
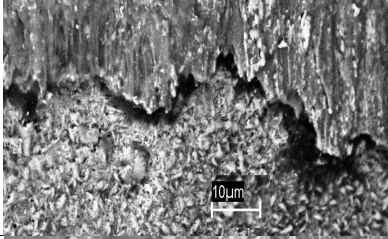

Ferramenta	Tempo de corte (min)	Micrografia	Topografia	Mecanismo de desgaste
F1	2,2		<ul style="list-style-type: none"> • Microranuras, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão.
F2	4,1		<ul style="list-style-type: none"> • Microranuras, • microtrincas, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão.
F3	6,14		<ul style="list-style-type: none"> • Microranuras, • deformação plástica, • cavidades, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • delaminação.
F4	7,9		<ul style="list-style-type: none"> • Microranuras, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão.
F5	14,2		<ul style="list-style-type: none"> • Microranuras, • Trincas, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • delaminação.
F6	18,6		<ul style="list-style-type: none"> • Microranuras, • Trincas, • deformação plástica, • presença de ferro (Fe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão.

Tabela 4.8 - Síntese da análise da Região 3 – Acúmulo de produtos do desgaste

Ferramenta	Tempo de corte (min)	Micrografia	Topografia	Mecanismo de desgaste
F1	2,2		<ul style="list-style-type: none"> • Microranhuras, • mistura de Fe, Ti e Al, • deformação plástica, • trincas, • fraturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.
F2	4,1		<ul style="list-style-type: none"> • Microranhuras, • mistura de Fe, Ti e Al, • deformação plástica, • trincas, • fraturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.
F3	6,14		<ul style="list-style-type: none"> • Microranhuras, • mistura de Fe, Ti e Al, • deformação plástica, • trincas, • fraturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.
F4	7,9		<ul style="list-style-type: none"> • Microranhuras, • mistura de Fe, Ti e Al, • deformação plástica, • trincas, • fraturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.
F5	14,2		<ul style="list-style-type: none"> • Microranhuras, • mistura de Fe, Ti e Al, • deformação plástica, • trincas, • fraturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.
F6	18,6		<ul style="list-style-type: none"> • Microranhuras, • mistura de Fe, Ti e Al, • deformação plástica, • trincas, • fraturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão, • difusão, • fadiga.

4.8 COMPORTAMENTO DO DESGASTE DE FLANCO E DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL COM O TEMPO DE CORTE E SUAS RELAÇÕES COM OS MECANISMOS DE DESGASTE ATUANTES

Verifica-se que o desgaste de flanco da ferramenta de corte cresce com o tempo de usinagem, em três estágios distintos (figura 4.1). Um primeiro estágio com um elevado gradiente de crescimento, seguido de um segundo com pequeno gradiente de crescimento e por último, um terceiro com elevado gradiente da ordem do primeiro estágio.

É notório que a dimensão do desgaste de flanco (VB) na superfície de folga da ferramenta, aumenta com o tempo de usinagem, tendo em vista que as superfícies expostas por um tempo maior a elevadas temperaturas, estão sujeitas a um mecanismo de desgaste por difusão mais intenso, que promovem um maior enfraquecimento do material da ferramenta pela perda de dureza.

Fica claro pela discussão realizada no item anterior (4.5), que o mecanismo de desgaste por adesão está presente e é predominante em quase todo o tempo de usinagem, apenas partilhando esta predominância com o mecanismo por delaminação, ocorrido no tempo relativo à ferramenta 5, e com o mecanismo por difusão, durante o último estágio de desgaste (terciário).

As diferenças dos gradientes de crescimento do desgaste de flanco da ferramenta de corte, estão relacionadas à perda de resistência dos revestimentos em função do mecanismo de desgaste predominante e as pressões na área de corte. Nas ferramentas de corte 5 e 6 (desgaste terciário) onde há um elevado gradiente de crescimento, o revestimento de alumina (Al_2O_3) diminui acentuadamente sua capacidade de resistir ao desgaste, em razão do decréscimo de dureza à quente e conseqüentemente pela perda de elementos por difusão.

Nas ferramentas de corte 2, 3 e 4 (estado constante), onde ocorre um baixo gradiente de crescimento do desgaste de flanco, o revestimento de alumina (Al_2O_3) mantém sua dureza à quente e portanto suas propriedades antidesgaste, em razão das temperaturas geradas não serem suficientemente altas para que o mecanismo de desgaste por difusão seja intenso.

No entanto, para o intervalo que contém a ferramenta 1 (desgaste inicial), a causa do elevado gradiente não deve ser creditada ao mecanismo de difusão, mas sim às elevadas pressões sobre a aresta de corte devido à pequena área real de contato entre a ferramenta e a peça.

Na figura 4.2 mostra-se que a rugosidade superficial da peça trabalho em aço ABNT 1050, cresce inicialmente com o tempo de uso da ferramenta de corte 1 para ferramenta de corte 2, e posteriormente para ferramenta de corte 3. Após este crescimento, verifica-se um decréscimo desta rugosidade com o tempo de uso da ferramenta de corte 4, voltando a crescer de forma mais intensa para as ferramentas de corte 5 e 6. Nota-se, portanto, uma inflexão para o tempo de uso (corte) da ferramenta 4, onde ocorre uma melhora da rugosidade superficial da peça trabalho.

Ao verificarmos os mecanismos de desgaste atuantes, observa-se que, para os tempos referentes às ferramentas de corte 3 e 4, há uma alteração da predominância do mecanismo de desgaste por delaminação na ferramenta 3 para um mecanismo de desgaste adesivo para a ferramenta 4. Sendo o mecanismo de desgaste adesivo menos severo, em termos de dano da superfície de folga, admite-se que para a ferramenta de corte 4, onde acontece um menor dano da superfície de folga do que na ferramenta de corte 3, ocorre uma menor instabilidade da força de corte que atua sobre ela, produzindo uma melhora na rugosidade superficial.

CAPITULO 5 CONCLUSÕES

A respeito do desgaste de flanco (VB), da rugosidade superficial da peça acabada e dos mecanismos de desgaste atuantes na operação de acabamento por torneamento do aço ABNT-1050 com ferramentas de metal duro revestido com carbeto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3) e por último o nitreto de titânio (TiN), pode-se concluir que:

1. O desgaste de flanco (VB) cresce em função do tempo de usinagem com três gradientes distintos, sendo o primeiro gradiente explicado pela alta pressão na aresta de corte, o segundo devido ao decréscimo desta pressão e o terceiro gradiente por influência do mecanismo de desgaste por difusão.
2. O crescimento do desgaste de flanco (VB) nas condições de corte especificadas neste trabalho, é dependente do enfraquecimento da ferramenta, ou seja, perda de dureza pela ação do mecanismo de desgaste por difusão, devido às altas temperaturas inerentes ao processo de corte, não dependendo de outros mecanismos de desgaste atuantes.
3. A rugosidade superficial cresce com o tempo de usinagem, porém apresenta uma inflexão para um tempo de usinagem de 6,14 min (ferramenta 3) a 7,9 min (ferramenta 4).
4. A inflexão da rugosidade com o tempo de usinagem, está relacionada a uma instabilidade da força de corte, produzida na ferramenta pelo mecanismo de desgaste por delaminação, que altera o fluxo plástico na região de corte, alterando a rugosidade superficial.
5. O mecanismo de desgaste por adesão é predominante durante todo o processo de usinagem, com exceção ao período relativo à ferramenta de corte 3 (F3)

(aproximadamente 6,14 min). Neste período a delaminação, ou seja, o mecanismo de desgaste por fadiga superficial assume a predominância.

6. O revestimento de nitreto de titânio (TiN), atua como um elemento inibidor do mecanismo de desgaste por “travamento mecânico”, pois isola e produz um microranhuramento sobre o revestimento de alumina (Al_2O_3) diminuindo a área real de contato entre a superfície de flanco da ferramenta e o material da peça trabalho.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- 1 - Identificação dos mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de metal duro revestido, com variação da espessura da camada externa de nitreto de titânio (TiN).
- 2 - Influência da velocidade de corte na predominância do mecanismo por delaminação no desgaste de flanco de ferramentas de metal duro com revestimento triplo.
- 3 - Identificação dos mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de metal duro revestido, principalmente com camada externa de nitreto de titânio alumínio (TiNAl).
- 4 - Análise da evolução do mecanismo de desgaste por difusão em função do tempo de usinagem, utilizando seções transversais das ferramentas revestidas.
- 5 - Análise da evolução do mecanismo de desgaste por delaminação em função do tempo de usinagem, utilizando seções transversais das ferramentas revestidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELE, E., DÖRR, J. Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica. **Máquinas e Metais**, agosto, p. 38-53, 2002.

BHATTACHARYYA, A., HAM, I. Analysis of Tool Wear. **ASME Journal of Engineering for Industry**, v.august, p.28-41, 1969.

BLAU, P. J. Fifty years of research on the wear of metals. **Tribology International**, v. 30, p. 321-331, 1997.

BLAU, P. J. Glossary of terms. In: ASM Handbook: Friction, lubrication, and wear technology: USA, v.18, 1995. p. 1-213.

BUQUOI, D. J. **Solid particle erosion: Its causes, effects and solutions**. Altamonte Springs: Engineering & Operations Workshop, 1989 apud BLAU, P. J. **Glossary of terms**. USA: ASM Handbook, v. 18, 1995.

CAMPOS JUNIOR, W. M. Novas coberturas utilizadas em ferramentas de usinagem: In: CONGRESSO DE USINAGEM 2002, 1, 2002, São Paulo. **Anais do 1º Congresso de Usinagem 2002** (CD-ROM) São Paulo: Monferrer Produções Gráficas e Digitais, 2002.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. metalurgia, 5ª ed. ABM, São Paulo: 1984, p.154-7 e 255-62.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 3ª ed. Edgar Blücher, São Paulo, 1974. p.165-78.

COOK, N. H. Tool wear and tool life. **Journal of Engineering for**

Industry, New York, november, p. 931-938, 1973.

CRNKOVIC, S. J. **Comportamento de um aço ABNT-1020 bifásico revenido quanto ao atrito e desgaste**. 1993. 276f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CSELLE, T. As opções do mercado para o desenvolvimento de ferramentas. **Máquinas e Metais**, NOVEMBRO, P. 32-45, 2001.

DEARNLEY P. A., TRENT E. M. Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools. **Metals Technology**, v. february, p.42-9, 1982.

DEGARMO, E. P., BLACK, J. T., KOHSER, R. A. **Cutting tools for machining**. In: Materials and processes in manufacturing: machining. 8^a ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. 618-43p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais: usinagem**. 4^a ed. São Paulo: Artliber Editora, 2003. 248p.

ENGQVIST, H., UHRENIUS B. Determination of average grain size of cemented carbides. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 21, p. 31-35, 2003.

EZUGWU, E. O.; OKEKE, C. I. Tool life and wear mechanisms of TiN coated tools in an intermittent cutting operation. **Materials Processing Technology**, v. 116, p. 10-15, 2001.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. usinagem. 1^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 751p.

FERREIRA, J. M.; BRANCO, C. M. Influence of weld and plate geometry on the fatigue-strength of cruciform joints. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 9 (1), february, p. 23-32, 1988.

GOH, G. K. L. et al. Transitions in Wear Mechanisms of Alumina Cutting Tools. **Wear**, v.201, p.199-208, 1996.

GOH G. K. L., LIM L. C., RAHMAN M., LIM S. C., Effect of grain size on wear behaviour of alumina cutting tools. **Wear**, v. 206, p. 24-32, 1997.

GONZÁLES R. V. B., **Rugosidade superficial: Uma abordagem prática**. metrologia. Ed. Mitutoyo, São Paulo, 33 p., 1997.

HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A.; RONKAINEN, H. Coatings tribology - contact mechanism and surface design. **Tribology International**, v. 31, p. 107-120, 1998

KENDALL, L. A. **Friction and wear of cutting tools and cutting tool materials**. In: ASM Handbook: Friction, lubrication, and wear technology: USA, v.18, 1995. p. 609-620.

KOMANDURI, R., **Ceramic cutting tools**. In: Friction and wear of ceramics. usinagem. 1^a ed. New York: Marcel Dekker, 1994. p. 289-311.

KRAMER, B. M., SUH, N. P. Tool wear by solution: A quantitative understanding. **Journal of Engineering for Industry**, New York, v. 102, p. 303-311, 1980.

KHRUSCHOV, M. M.; Principles of abrasive wear. **Wear**, v. 28, p.69-88, 1974.

KUDAPA S., NARASIMHAN K., BOPPANA P., RUSSEL W.C., Characterization and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN

coatings, **Surface and Coatings Technology**, Troy-USA, v. 120-121, p. 259-264, 1999.

LARSSON A., RUPPI S., Microstructure and properties of CVD $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ coatings. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 19, p. 515-522, 2001.

LEWIS, C. F. Complex coatings with CVD. **Materials Engineering**. p. 35-38. june, 1989.

LIN, S. C., TING, C. J. Tool Wear Monitoring in Drilling Using Force Signals. **Wear**, v.180, p.53-60, 1995.

LIM C.Y.H., LIM S.C., LEE K.S. Wear of tic-coated carbide tools in dry turning. **Wear**, V. 225–229, P. 354–367, 1999.

LIM, S. C., ASHBY, M. F. Wear-Mechanism maps. **Acta Metallurgica et Materialia**, V. 35, P. 1-24, 1987.

LIMA C.R.P. de, **Caracterização de Coberturas Depositadas por Aspersão Térmica a Plasma**. 2001. 143f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

LUDEMA, K. C. **Wear**. In: ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology: USA, v.18, 1995. p.184-280.

MARCONDES, F.C. **A história do metal duro**. Usinagem, 1^a ed. São Paulo: CPA, 1990. p. 13-50.

MESQUITA, R. M. D. **O desgaste das ferramentas de corte e a sua relação com as**

forças de corte: 1988. 305f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

MCCLOSKEY, T. H.; BELLANCA, C. **Minimizing solid particle erosion in power plant steam turbines.** Power Engineering, 1981 apud BLAU, P. J. Glossary of terms. USA: ASM Handbook, v. 18, 1995.

MICHELETTI, G. F. **Mecanizado por arranque de viruta:** usinagem. 2^a ed. Barcelona: Editorial Blume, 1980. 426p.

NOVAK, S., KOMAC, M. Wear of Cermet Cutting Tools Coated with Physically Vapour Deposited TiN. **Wear**, v.205, p.160-8, 1997.

TÖNSHOFF, T.; BEN AMOR, R. “Machinability of GJV – Theories and Test Results”. In: PEREIRA, A. A.; BOEHS L. Análise da integridade da superfície de uma ferramenta de metal duro. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Anais do III CONEM, 2004, Belém – PA. Universidade Federal do Pará, CD-ROM.

PIRSO, J.; LETUNOVITS, S.; VILJUS, M. Friction and wear behaviour of cemented carbides. **Wear**, 2004, disponível em: www.elsevier.com/locate/wear.

PRENGEL, H. G.; PFOUTS, W. R.; SANTHANAM, A. T. Coating carbide cutting tools. **Manufacturing Engineering**, p. 82-88, july, 1996.

RODRIGUES, H. L.; CRNKOVIC, S. J. Métodos determinísticos na determinação da vida de ferramentas de metal duro com revestimento triplo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Anais do 15^o CBECIMAT, 2002, Natal - RN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, CD-ROM.

RODRIGUES, H. L.; CRNKOVIC, S. J. Variação da vida de ferramentas de metal duro multi-revestido no processo de torneamento em operação de acabamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 1998, Curitiba - PR. Anais do 13º CBECIMAT Curitiba: Universidade Federal do Paraná, CD-ROM.

RODRIGUES, H. L.; CRNKOVIC, S. J. Comportamento da rugosidade superficial no torneamento de acabamento com ferramentas de metal duro com revestimento múltiplo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 1998 Curitiba - PR. Anais do 13º CBECIMAT Curitiba: Universidade Federal do Paraná, CD-ROM.

RODRIGUES, H. L.; SILVA, D. F.; RIBEIRO, R. B.; CRNKOVIC, S. J.; PEREIRA, M. S. Caracterização Microestrutural de Pastilha de Metal Duro com Recobrimento Aplicada no Acabamento em Operações de Torneamento. In: 59º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS - INTERNACIONAL, 2004, São Paulo - SP. CD-ROM.

RODRIGUES, H. L. **Variação da vida de ferramentas de metal duro com revestimento triplo em operação de acabamento no processo de torneamento.** 1997. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá.

RUBENSTEIN, C. An Analysis of Tool Life Based on Flank-Face Wear. **ASME Journal of Engineering for Industry**, v. february, p.13-21, 1976.

SANDVIKEN. **Historical metal cutting.** In: Modern metal cutting a practical handbook: usinagem. 1ª ed. Sweden: Tofters Tryckeri AB, 1994. 1-45p.

SANDVIKEN. **Tool wear**. In: Modern metal cutting a practical handbook: machining. 1^a ed. Sweden: Tofters Tryckeri AB, 1994. IV1-27p.

SCHALLBROCH, H.; BETHMANN, H. Kursprüfverfahren der zerspanarbeit. In: FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**: usinagem. 1^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970, p.436-39.

SCHEY, J. A. **Tribology in metalworking: Friction, lubrication and wear**: tribologia. 2^a ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1984. 736p.

SCHOLL, M. Abrasive Wear of Titanium Nitride Coatings. **Wear**, v.203-204, p.57-64, 1997.

SCHULZ, H., EMRICH, A. K., FINZER, T., DÖRR, J. Quais são e para que servem os revestimentos. **Máquinas e Metais**, setembro, p. 38-45, 2000.

SCHALLBROCH, H., BETHMANN, H. KURSPRÜFVERFAHREN DER ZERSPANARBEIT. In: FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970, p.436-39.

SCUSSEL, H. J. **Friction and wear of cemented carbide**. In: ASM Handbook: Friction, lubrication, and wear technology: USA, v.18, 1995. p. 795-800.

SEMIATIN, S. L.; SOPER, J. C.; SHIVPURI, R. A simple-model for conventional hot-rolling of sheet materials. **Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy And Materials Science**, v. 25 (8), august, p. 1681-1692, 1994.

SRINIVASAN, K.; VENKATESH, V. C.; RAJU, A. S. Wear mechanisms in coated carbide tools. **Tribology International**, December, p. 313-318, 1977.

STACHOWIAK, G. W. BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology: tribologia**. 2^a ed. Butterworth Heinemann, Boston, 872p. 2001.

SU, Y. L.; KAO, W. H. Optimum multilayer TiN-TiCN coatings for wear resistance and actual application. **Wear**, v. 223, p. 119-130, 1998.

SUBRAMANIAN, C.; STRAFFORD, K. N. review of multicomponent and multilayer coatings for tribological applications. **Wear**, v. 165, p. 85-95, 1993.

SUNDARARAJAN, G. A New Model for two-body Abrasive Wear Based on the Localization of Plastic Deformation. **Wear**, v. 117, p.1-36, 1987.

SWAIN, M. V. Microscopy observations of abrasive wear of polycrystalline alumina. **Wear**, v. 35, p. 185-189, 1975.

TAKEYAMA, H.; MURATA, R. Basic investigation of tool wear. **Journal of Engineering for Industry**, New York, november, p. 83-94, 1963.

TAYLOR, F. W. On the art of cutting metals. **Transactions ASME**, v. 28, p 50, 1907.

THOORS, H., CHANDRASEKARAN, H., ÖLUND, P. Study of Some Active Wear Mechanisms in a Titanium-Based Cermet when Machining Steels. **Wear**, v.162-4, p.1-11, 1993.

TRENT, E. M. Metal cutting and the tribology of seizure: II Movement of work material over the tool in metal cutting. **Wear**, Birmingham, v. 128, p. 47-64, 1988.

TRENT, E. M. **Metal cutting**. usinagem. 3^a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991. 273p.

TRIGGER, K. J., CHAO B. T. The Mechanism of Crater Wear of Cemented Carbide

Tools. **ASME Journal of Engineering for Industry**, v.july, p.19-35, 1956.

WILKINSON, P; REUBEN, R. L.; JONES, J. D. C.; BARTON, J. S.; HAND, D. P.; CAROLAN, T. A.; KIDD, S. R. Surface finish parameters as diagnostics of tool wear in face milling. **Wear**, v.205, p. 47-54, 1997.

WILLIAMS, J. A. **Wear and surface damage**. In: Engineering tribology. tribologia, 2^a ed., Avon: Bookcraft Ltd., 1996, 488p.

WITTING, H. Torneamento de superligas. **Máquinas e Metais**, setembro, p. 156-165, 2002

WRIGHT, P. K., TRENT, E. M. Metallurgical Appraisal of Wear Mechanisms and Processes on High-Speed-Steel Cutting Tools. **Metals Technology**, v. january, p.21-32, 1974.